



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**SCALE-UP DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO TÉRMICO  
DE BIOMASSA POR TORREFAÇÃO**

Gabriel do Prado Malagutti

Mateus Sfalsin de Ascensão

Brasília, Junho de 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

PROJETO DE GRADUAÇÃO

SCALE-UP DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO TÉRMICO  
DE BIOMASSA POR TORREFAÇÃO

Gabriel do Prado Malagutti  
Mateus Sfalsin de Ascensão

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Mecânica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico*

Banca Examinadora

Prof. Armando de Azevedo C. Pires, ENM/UnB \_\_\_\_\_  
*Orientador*

Prof. Mário B. B. de Siqueira, ENM/UnB \_\_\_\_\_  
*Examinador*

Dra. Lucélia Alves de Macedo \_\_\_\_\_  
*Examinador*

## **Dedicatórias**

*À Luzia Glória, por me educar e acreditar em mim. Seu cuidado e dedicação me deram a esperança para seguir.*

*Mateus Sfalsin de Ascensão*

*À todos que me apoiaram durante essa jornada, principalmente para meus pais, minha namorada e meu colega de projeto, Mateus.*

*Gabriel do Prado Malagutti*

## Agradecimentos

*Agradeço a todos os profissionais que nos orientaram durante o projeto, em especial o nosso orientador e professor Armando Caldeira. Agradeço, também, pelo apoio e conforto que minha família sempre me deu.*

*Gabriel do Prado Malagutti*

*Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, aos meus pais por toda assistência e palavras de conforto, ao meu orientador Armando Caldeira, por me auxiliar a concluir essa etapa importante na minha vida, à minha namorada Ana Carolina Castro, pelo apoio e incentivo, ao meu colega de projeto Gabriel Malagutti, pelo companheirismo, aos meus amigos, em especial: Natália Oliveira, Fernanda Meneses, Mateus Borges, Lucas Rincon e Claudio Modesto, que fizeram parte da minha formação e vão continuar presentes na minha vida, e, por fim, aos meus professores, que me fizeram contruir todo o conhecimento que tenho hoje.*

*Mateus Sfalsin de Ascensão*

---

## RESUMO

A biomassa é vista como uma fonte de energia renovável e vem sendo aproveitada para substituir os combustíveis fósseis. Sua aplicação, desde que controlada, não agride o meio ambiente; porém, para sua produção, grandes áreas florestais podem ser destruídas, sendo considerado um enorme impacto ambiental. Visando diminuir este efeito, indústrias madeireiras usufruem de tratamentos térmicos, a fim de melhorar as propriedades de seus produtos. Dentre os diversos processos, encontra-se a torrefação, processo no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas ( $200^{\circ}\text{C}$  à  $300^{\circ}\text{C}$ ) garantindo o aumento das qualidades estruturais, tais como diminuir o teor de umidade e voláteis, melhorar as propriedades mecânicas do material e diminuir o risco de deterioração biológica, mantendo, em média, 70% da massa inicial. O presente projeto teve por finalidade o estudo de um *scale-up* de um sistema laboratorial de tratamento térmico de biomassa para uma escala semi-industrial, adotando as condições operacionais industriais de um reator de torrefação e empregando a condução térmica como principal meio de transferência de calor. Foi realizado o dimensionamento por meio de um software de representação em três dimensões, selecionado os materiais e equipamentos mais adequados e analisado os fenômenos térmicos que ocorrem dentro do reator por meio de simulações numéricas de análise de transferência de calor, utilizando a plataforma *COMSOL Multiphysics*.

---

## ABSTRACT

Biomass is seen as a renewable energy source and has been used instead of fossil fuels. Its application, if controlled, does not harm the environment, but for its production, large forest areas can be destroyed, which is considered a huge environmental impact. In order to reduce this effect, timber industries enjoy thermal treatments to improve the properties of their products. Among the various processes, is the torrefaction, a process in which the biomass is heated at relatively low temperatures ( $200^{\circ}\text{C}$  to  $300^{\circ}\text{C}$ ) ensuring an increase in structural qualities, such as decreasing the moisture and volatile content, improving mechanical properties of the material and reducing the risk of the biological deterioration, maintaining an average of 70% of the initial mass. The purpose of this project was to study a scale-up of a laboratory system of biomass thermal treatment for a semi industrial scale, adopting the industrial operating conditions of a torrefaction reactor, employing thermal conduction as the main means of heat transfer. Dimensioning was performed through a three dimensions representation software, selected the most appropriate materials and equipment, and analyzed the thermal phenomena that occur inside the furnace by means of numerical simulations of heat transfer analysis using the platform *COMSOL Multiphysics*.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1	BIOMASSA	3
2.1.1	CONCEITO E COMPOSIÇÃO	3
2.1.2	CENÁRIO ENERGÉTICO	4
2.2	MADEIRA	5
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA	5
2.2.2	USO ESTRUTURAL	7
2.2.3	EUCALIPTO	10
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS	12
2.3.1	CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA	12
2.3.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS PARA MADEIRA	13
2.4	TORREFAÇÃO	17
2.4.1	BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA DE TORREFAÇÃO	18
2.4.2	CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DA MADEIRA TORRIFICADA	20
2.4.3	TÉCNOLOGICA DA TORREFAÇÃO	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>24</b>
3.1	ETAPAS DO PROJETO	24
3.2	CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA PROPOSTA	25
3.3	DEFINIÇÕES INICIAIS	26
3.3.1	ESPÉCIE DA MADEIRA	26
3.3.2	REATOR DE TORREFAÇÃO	28
3.3.3	SELEÇÃO DAS PLACAS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA E ISOLANTE TÉRMICO	29
3.4	REPRESENTAÇÃO ESTRUTURAL	30
3.5	MATERIAIS NECESSÁRIOS	34
3.6	COMSOL MULTIPHYSICS	38
3.6.1	HEAT TRANSFER MODULE	38
3.7	INSTRUÇÕES PARA POSSÍVEIS EXPERIMENTOS	41
3.7.1	MANUSEIO DA AMOSTRA	41

3.7.2	MANUSEIO DO REATOR.....	41
3.7.3	MANUSEIO DOS CONTROLADORES E ANALISADORES .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1	CONDUÇÃO TÉRMICA .....	43
4.2	RADIAÇÃO.....	50
4.3	ISOLANTE TÉRMICO .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>63</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Parcela de utilização da biomassa no consumo global de energia e a participação da biomassa nos diferentes setores de uso de energia [1].	4
2.2	Orientações dimensionais da madeira [2].	7
2.3	Biblioteca Paulo Freire - Parque Tecnológico Itaipu [3].	9
2.4	Casa construída com madeira empilhada.	10
2.5	Mesa de eucalipto.	11
2.6	Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos (Adaptado) [4].	13
2.7	Mecanismo de reação da madeira modificada termicamente [5].	14
2.8	Reator de ThermoWood [6].	15
2.9	Reator de hidrotérmlise.	16
2.10	Amostras de diferentes espécies de madeira antes e depois do processo Oil Heat Treatment [7].	17
2.11	Balço de massa e energia típicos de um processo de torrefação. M é unidade de massa, E é unidade de energia (Modificado)[8].	19
2.12	Planta de torrefação da Pillard [9].	22
2.13	Planta de torrefação com vapor superaquecido (Modificado) [10].	23
3.1	Etapas do projeto.	24
3.2	Diagrama esquemático simulado do reator em escala laboratorial com quatro subsistemas: acústico (A), tratamento térmico (B), energia e registro (C) e alimentação a gás (D) [11]. Lista de equipamentos: 1) Gerador de sinal acústico; 2) Alto-falante de som 3) Cilindro de gás $N_2$ ; 4) Bomba de gás; 5) controle de $O_2$ ; 6) Câmara cilíndrica do reator; 7) Suporte de amostra de madeira; 8) Resistências elétricas para aquecimento por convecção; 9) Termopares; 10) Controle do sistema; 11) Computador; 12) Equilíbrio elétrico de peso 13) Visor.	25
3.3	Eucalyptus grandis.	27
3.4	Reator de torrefação do LPF.	28
3.5	Sentido do fluxo de calor.	29
3.6	Vista frontal inicial do reator.	30
3.7	Vista isométrica do reator.	31
3.8	Vista lateral do suporte do corpo de prova.	32
3.9	Balança semi-analítica BK8000.	32
3.10	Vista isométrica da caixa de acrílico.	33

3.11	Vista isométrica final do reator. ....	33
3.12	Termopar Tipo K. ....	35
3.13	Controlador de Potência TH 6000. ....	36
3.14	Painel de Operação IHM. ....	36
3.15	Indicador TH 2064. ....	37
3.16	Controlador de gases. ....	37
3.17	Fluxograma das etapas da simulação numérica. ....	39
3.18	Modelo ilustrativo da seção em corte do corpo de prova. ....	39
3.19	Arestas para aplicação das condições de contorno. ....	40
3.20	Malha para simulação térmica. ....	40
3.21	Formato do posicionamento do corpo de prova. ....	41
3.22	Posicionamento do termopar na estufa. ....	42
4.1	Resultado à $0,5^{\circ}C/min$ . ....	44
4.2	Resultado à $1,0^{\circ}C/min$ . ....	44
4.3	Resultado à $2,0^{\circ}C/min$ . ....	45
4.4	Resultado à $3,0^{\circ}C/min$ . ....	45
4.5	Análise aproximada do perfil de temperatura para $0,5^{\circ}C/min$ . ....	46
4.6	Análise aproximada do perfil de temperatura para $3,0^{\circ}C/min$ . ....	46
4.7	Perfis de temperatura à diferentes taxas de aquecimento. ....	47
4.8	Simulação à $0,5^{\circ}C/min$ . ....	48
4.9	Simulação à $1,0^{\circ}C/min$ . ....	48
4.10	Simulação à $2,0^{\circ}C/min$ . ....	48
4.11	Simulação à $3,0^{\circ}C/min$ . ....	49
4.12	Hipótese com isolamento térmico na região interna do reator. ....	51

# LISTA DE TABELAS

2.1	Classes de umidade de acordo com a NBR 7190 (1997) [12].....	9
2.2	Influência da temperatura do processo na composição da madeira de pinho torrefi- cada por 45 minutos (Modificado) [13]. .....	18
3.1	Condições operacionais iniciais do reator de torrefação. ....	26
3.2	Características do <i>Eucalyptus grandis</i> [14].....	27
3.3	Principais componentes do reator semi-industrial de torrefação. ....	29
3.4	Descrição operacional da placa de resistência e do isolamento térmico. ....	30
3.5	Listagem de materiais necessários para confecção do reator de torrefação. ....	34
3.6	Propriedades do Aço Carbono SAE 1020. ....	35
3.7	Propriedades dos materiais do corpo de prova. ....	40
4.1	Resultados da simulação numérica à diferentes taxas de aquecimento. ....	45
4.2	Resultados do intervalo de tempo que o centro da amostra leva para atingir tempe- raturas próximas à temperatura da superfície. ....	47
4.3	Fluxo de calor transmitido do corpo de prova às paredes internas do reator. ....	50

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Área da superfície	[m <sup>2</sup> ]
$x$	Espessura	[m]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$m$	Massa	[Kg]
$M_i$	Massa seca inicial	[Kg]
$M_t$	Massa da biomassa torrificada	[Kg]
$C_p$	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
$h$	Entalpia específica	[kJ/kg]
$k$	Condutividade térmica	[W/m.K]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$T$	Temperatura	[K]
$h_0$	Coefficiente global de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> .K]
$PCS$	Poder Calorífico Superior	[MJ/kg]
$D_e$	Densidade energética	[MJ/m <sup>3</sup> ]
$\dot{Q}_c$	Taxa de transferência de calor por condução	[W]
$\dot{Q}_r$	Taxa de transferência de calor por radiação	[W]
$\dot{Q}_p$	Taxa de calor por radiação emitida pela placa	[W]
$\dot{Q}_m$	Taxa de calor por radiação emitida pela biomassa	[W]
$\dot{Q}_R$	Taxa de calor por radiação resultante	[W]
$C$	Carbono	
$H$	Hidrogênio	
$O$	Oxigênio	
$N$	Nitrogênio	

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\Delta$	Varição entre duas grandezas similares	
$\rho$	Densidade	[m <sup>3</sup> /kg]

## Grupos Adimensionais

<i>Nu</i>	Número de Nusselt
<i>Re</i>	Número de Reynolds

## Subscritos

<i>amb</i>	ambiente
<i>ext</i>	externo
<i>in</i>	entrada
<i>out</i>	saída

## Sobrescritos

·	Variação temporal
–	Valor médio

## Siglas

LPF	Laboratório de Produtos Florestais
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
LERMAB	Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois
BEN	Balanço Energético Nacional
SBS	Sociedade Brasileira de Silvicultura
SAE	Society of Automotive Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
PGA	Portable Gas Analyser
USB	Universal Serial Bus
QTDE	Quantidade

# Capítulo 1

## Introdução

O Brasil possui um vasto território dotado de recursos naturais, com enorme potencial em segmentos florestais [15]. A atividade madeireira contruibui, de forma efetiva, para o crescimento e desenvolvimento sócio-econômico do país, destacando-se por ser uma parcela de grande representatividade na economia, gerando renda, empregos, tributos e, atualmente, agregando na preservação do meio ambiente.

A madeira tem sido, ao longo dos anos, um dos materiais mais utilizados pelo ser humano, devido a grande versatilidade para as mais diversas finalidades, sua ampla disponibilidade e sua fácil extração, manejo e trabalhabilidade. Desta forma, ela vem sendo empregada na obtenção de produtos dos mais diversos setores, desde móveis à construção civil.

As edificações feitas deste material estão entre as mais antigas formas de abrigo realizadas pela humanidade, sendo responsável por grandes construções ao longo da história. Os carpinteiros desenvolviam um conhecimento intuitivo acerca da capacidade estrutural de madeiras de diferentes espécies e, portanto, eram capazes de construir grandes estruturas [16].

Além disto, a biomassa lenhosa pode ser considerada como uma importante fonte primária de energia renovável. Dentre as diversas fontes naturais utilizadas para geração de energia, a biomassa florestal se destaca pela queima da madeira e aproveitamento de resíduos de exploração, produção de carvão, alcatrão e ácido pirolenhoso [17].

A madeira pode sofrer diversos processos de conversões termoquímicas, para homogeneizar suas características e adaptar-se ao uso final. Essas técnicas consistem em tratamentos térmicos, apropriados para cada ocasião.

Uma alternativa de tratamento térmico é a torrefação que ocorre em temperaturas entre  $200^{\circ}C$  e  $300^{\circ}C$ , e tem como objetivo aperfeiçoar algumas características do material, tais como diminuir o teor de umidade e voláteis, melhorar suas propriedades mecânicas e diminuir o risco de deterioração biológica.

O presente projeto de graduação dedica-se ao aprofundamento dos conhecimentos em processos de termo-degradação de biomassas para a elaboração de uma instalação semi-industrial, com finalidade de testes laboratoriais de tratamentos térmicos por torrefação. O intuito destes testes em

amostras de madeira é o entendimento à respeito de suas propriedades químicas e físicas, incluindo colorimétricas e mecânicas, para o uso estrutural.

Esta instalação será projetada a partir da redimensionalização de uma unidade experimental já existente no Laboratório de Produtos Florestais (LPF).

O cumprimento deste trabalho reforçará a cooperação entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, o Laboratório de Produtos Florestais (LPF), o Centro de Cooperação internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento (CIRAD) e o Laboratório de Pesquisa e Estudos em Materiais de Madeira (LERMAB) da Universidade de Lorraine, na França.

## 1.1 Objetivos

O objetivo consiste no aprimoramento tecnológico e *scale-up* de um sistema laboratorial de torrefação para uma instalação experimental semi-industrial, a fim de examinar os processos de transferência de calor, massa e cinética química que ocorrem durante o tratamento térmico, em condições mais próximas às condições industriais de operação. Sendo assim, o projeto permitirá a otimização de modelos numéricos de simulação, com condições de contorno associadas às novas dimensões e condições operacionais.

Além disto, o trabalho visa demonstrar a capacidade operacional da instalação por meio da caracterização da biomassa tratada, examinando suas propriedades físicas e químicas, e avaliar as emissões gasosas oriundas da transformação da madeira.

Por fim, efetuar uma avaliação do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida deste processo produtivo, demonstrando o desempenho ambiental dos produtos gerados pelo tratamento térmico da madeira.

## 1.2 Apresentação do manuscrito

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema de estudo. Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto. Resultados experimentais são discutidos no capítulo 4, seguido das conclusões no capítulo 5. Os anexos contêm material complementar.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Biomassa

#### 2.1.1 Conceito e Composição

O termo biomassa é utilizado para designar todo material orgânico, não fóssil, que possua energia química em sua estrutura, o que inclui todos os tipos de vegetações, resíduos florestais, resíduos de origem animal, lixo orgânico, entre outras formas de resíduos industriais [18]. Os biofluidos são também fontes de biomassa, como os óleos vegetais [19].

Também pode ser classificada como material à base de carbono, composto por misturas de moléculas orgânicas incluindo ainda os elementos de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio [20].

Em geral, é um material orgânico ou biológico que pode servir como fonte de energia renovável, convertendo, de forma indireta, a energia luminosa, oriunda da radiação solar, em energia química, por meio da fotossíntese, não havendo limitações de sua produção.

As fontes de biomassa se diferenciam de acordo com suas características e origens. Esta diferenciação deve ser considerada quando se pretende utilizá-la como fonte eficiente de geração de energia. É muito importante determinar o processo tecnológico a ser empregado para obter e transformar energia da biomassa [21] [22].

A composição da biomassa varia em função de fatores geográficos e geológicos, e é de fundamental importância para a compreensão do seu comportamento frente a diferentes tratamentos térmicos. Cortez *et al.* (2008) [19] ressaltam que a composição química é a base para a análise dos processos de combustão, sendo útil para o cálculo dos volumes de ar, volumes de gases, entalpia e para determinar a eficiência calorífica do combustível.

Ela pode ser dividida em suas frações nobres, que consiste em açúcares, óleos e lipídios, e em frações mais complexas, como celulose, hemicelulose, lignina e proteínas [22].

Os carboidratos são componentes da biomassa que podem ser convertidos em açúcares pelo processo de hidrólise. Já a lignina e proteínas são estruturas mais variáveis e complexas, comumente usadas na queima direta para geração de energia. No entanto, existe uma série de outras

possibilidades para o uso desta fração de biomassa: em proporções menores, podem ser encontradas resinas, taninos, ácidos graxos, fenóis, compostos nitrogenados e sais minerais [22].

A biomassa lignocelulósica é considerada um composto de fibra celulósica, constituída por substâncias macromoleculares que se mantêm unidas por uma matriz constituída de polissacarídeos e lignina, seus componentes majoritários, e por substâncias de baixo peso molar, como os extrativos orgânicos e os minerais inorgânicos [23].

Os vegetais não lenhosos são fontes de bioenergia tradicionalmente produzidos a partir de cultivos anuais. Usualmente são classificados de acordo com sua substância de armazenamento de energia, podendo ser: sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos. O maior representante desta classe é a cana-de-açúcar.

Estão em estudo outros vegetais pouco conhecidos, que podem proporcionar vantagens importantes como resistência a secas, produtividade razoável em terras pobres e facilidade no cultivo [21].

### 2.1.2 Cenário Energético

A biomassa florestal apresenta um grande potencial para geração de energia, com vantagens para redução da emissão de gases do efeito estufa [24]. É uma alternativa de energia limpa, renovável, equilibrada com o meio ambiente e produtora de tecnologia própria. Ela pode ser convertida em outras formas energéticas, tanto diretamente, na queima de lenha para geração de calor, como indiretamente, na carbonização ou na produção de etanol [25]. A Fig. 2.1 ilustra a parcela de utilização de biomassa no consumo global de energia em 2016.

Como toda fonte energética, a biomassa também apresenta desvantagens quando utilizada na queima direta, pois esse material apresenta menor poder calorífico superior quando comparada a

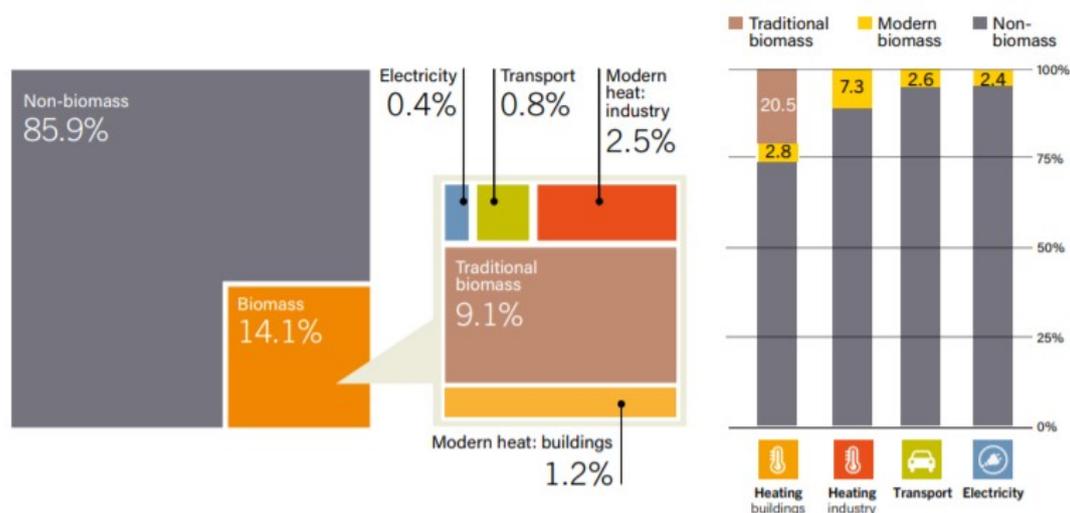


Figura 2.1: Parcela de utilização da biomassa no consumo global de energia e a participação da biomassa nos diferentes setores de uso de energia [1].

combustíveis à base de petróleo, maior teor de umidade devido às características do ambiente de origem, maior possibilidade da geração de material particulado para a atmosfera e dificuldade no estoque e armazenamento [26].

## 2.2 Madeira

Madeira provém da palavra em latim *materiae*, que significa matéria. No português, seu significado engloba todo tipo de celulose que tem por principal função a sustentação mecânica. É uma fonte de biomassa constituída de vegetais lenhosos. A sua obtenção pode-se dar por florestas nativas ou plantadas.

A madeira seca é definida como um biopolímero composto de uma rede de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos orgânicos e inorgânicos [27]. Contém cerca de 48% de celulose, 30% de hemicelulose e 20% de lignina [28]. Apresenta uma composição química elementar bastante uniforme entre as espécies, em torno de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 43% de oxigênio e 0,5% de nitrogênio [29].

A celulose é a substância orgânica mais abundante da madeira [30], compondo 45% do seu peso [20]. Com sua estrutura fibrosa e forte ligação de hidrogênio, a celulose é importante para resistência mecânica da madeira, sendo insolúvel na maioria dos solventes [30]. A sua degradação começa em temperaturas altas devido à alta resistência da sua estrutura cristalina [31].

A hemicelulose é um polímero de carboidratos complexos com um peso molecular mais baixo do que a celulose e representa 25% a 30% do peso seco total da madeira [20]. Em contraste com a celulose, a hemicelulose são polímeros facilmente hidrolisáveis e não formam agregados [30] [32]. A sua degradação térmica ocorre em temperaturas mais baixas, com a maior parte da perda percebida acima dos 180°C [33].

A lignina é um composto polifenólico altamente ramificado e representa 20% do peso da madeira. As suas propriedades físicas e químicas variam significativamente entre as espécies, sendo o principal aglutinante para a aglomeração de componentes celulósicos fibrosos [32]. A lignina, geralmente, não pode ser dividida em unidades monoméricas simples, sendo insolúvel na maioria dos solventes [30], de difícil desidratação e mais complexo para converter-se em carvão do que a celulose ou hemicelulose [31] [32].

Os extrativos são compostos não estruturais, incluindo proteínas, óleos, amidos e açúcares. Eles proporcionam odor, cor e durabilidade às plantas, podendo ser extraídos por água quente ou outros solventes [31].

### 2.2.1 Características da Madeira

A madeira é um material que armazena carbono. Utilizar um objeto em madeira é estocar gás carbônico, para que, desta forma, ele não retorne à natureza. Sua fonte energética é renovável e, para sua produção, a única energia necessária é a luz solar. Seu beneficiamento também consome

menos energia do que outros materiais utilizados na construção civil [34].

De acordo com Shimoyama (1990) [35], a qualidade da madeira refere-se à sua adequação para um determinado uso ou à sua capacidade de preencher os requisitos à fabricação de um dado produto. Assim, conhecendo a matéria-prima e o processos à serem utilizados, é possível obter a otimização do produto final.

Sua densidade é a propriedade física que possui relação direta com o teor de umidade. A densidade ou massa específica reflete a quantidade de madeira por unidade de volume, que é expressa em  $g/cm^3$  ou  $kg/m^3$  [25]. Madeira com maior densidade tem maior relevância para uso energético, já que apresenta vantagens como: menor área de estocagem e manuseio, maior rendimento energético no transporte e maior rendimento de caldeiras para queima direta [36].

O teor de umidade apresentada pela madeira ocorre em uma faixa muito ampla, variando significativamente da casca até a medula e está inversamente relacionado com o poder de combustão, devido ao consumo de energia no processo de evaporação da água [37]. Esta taxa é definida como sendo a relação entre o teor de pesos de água livre e impregnações contidas no corpo e o teor de pesos secos, e é representada na equação 2.1.

$$(Tu)\% = \frac{M_u \times M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.1)$$

onde  $(Tu)\%$  representa a taxa de umidade,  $M_u$  teor de massa úmida e  $M_s$  teor de massa seca.

Por ser um material higroscópico, a madeira exhibe uma sensibilidade em sua taxa de umidade. Essa sensibilidade influencia nas propriedades físicas e mecânicas, no comportamento da secagem, na eficiência dos processos de preservação, na trabalhabilidade e no acabamento [38]. É fator determinante para propriedades como massa, estabilidade dimensional, resistência do material, e entre outras [25].

A madeira cortada e seca ao ar por 6 meses à 1 ano, abrigada das intempéries, apresenta teor de umidade variando entre 15 e 25% [39].

Por ser anisotrópico, apresenta propriedades mecânicas que variam de acordo com a direção de suas fibras. A figura 2.2 ilustra estas orientações. As distinções mais significativas ocorrem nos sentidos longitudinal e radial das fibras [40].

A estabilidade dimensional do material é a capacidade da madeira de se retrair ou se expandir com a perda ou ganho de umidade, respectivamente. Abaixo do ponto de saturação das fibras, a variação deste teor é acompanhada de alterações nas dimensões da peça. A sua contração na direção tangencial é sempre maior do que na direção radial, e na direção longitudinal a contração é muito pequena, variando em torno de 0,5% [38].

Segundo as normas da ABNT (1997) [12], as propriedades de resistência e rigidez da madeira devem ser ajustadas em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas, visto que a umidade é um fator que influencia na alteração dessas propriedades.

Na madeira, o poder calorífico superior pode variar de  $3.000kcal/kg$  até  $5.400kcal/kg$  e apresenta-se maior em coníferas, devido ao maior teor de lignina e presença de resina, que possui poder

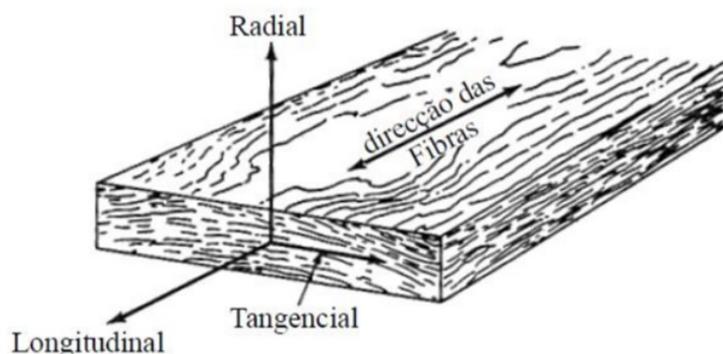


Figura 2.2: Orientações dimensionais da madeira [2].

calorífico médio de  $9.460\text{kcal/kg}$  [39].

A densidade energética, produto entre o poder calorífico e a densidade da biomassa, é um parâmetro importante que indica a quantidade de energia armazenada por volume de material. A baixa densidade energética da biomassa em relação a fontes fósseis, implica em altos custos de transporte e armazenamento [41], dando-se assim, a importância de tratamentos térmicos.

Apesar do fato da madeira ser inflamável, diante de altas temperaturas provavelmente terá maior resistência do que o aço. Assim, em um incêndio, ela pode ser responsável pela propagação do fogo, mas, em contrapartida, suportará a ação do fogo em alta temperatura durante um período maior de tempo [42] [34].

A degradação do material surge a partir da ação de agentes físicos, químicos, biológicos e mecânicos. Esses agentes podem atuar de forma associada, ou não, e eventualmente não podem ser controlados. As estruturas de madeira podem durar centenas de anos, e apresentarem bom estado de conservação, desde que estejam em condições ambientais que não favoreçam a sua deterioração [34].

### 2.2.2 Uso Estrutural

Os primitivos utilizavam a madeira para diversos fins em favor à sobrevivência e desenvolvimento. Além de edificações, era também usada para meios de transporte, ferramentas de caça, matéria-prima para obtenção de energia e, até mesmo, para fabricação de instrumentos musicais. Entretanto, apenas no século XIX, a madeira ganhou impulso como elemento estrutural devido às evoluções de técnicas e tecnologias construtivas [43].

Para a produção de elementos estruturais de madeira, as principais estruturas celulares utilizadas são o borne e o cerne. O borne, formado por células vivas, é responsável pelo armazenamento de alimento e pelo transporte mecânico da seiva, enquanto o cerne, composto por células mortas,

promove essencialmente o suporte mecânico da árvore [44]. Dois aspectos que distinguem estas duas camadas são a cor e a resistência à decomposição: o borne é, em geral, de cor mais clara e menos resistente à decomposição [45].

As suas vantagens para esta aplicação são: é um material renovável, apresenta boa trabalhabilidade e resistência mecânica, não sofre corrosão e apresenta estética agradável. Suas desvantagens são: estar suscetível à agentes externos, limitações de uso em certas espécies, material higroscópico, estar sujeito à variações volumétricas e possui propriedades bastante variáveis [46].

A complexidade de critérios existentes para classificar os sistemas edificativos em madeira envolve o grau de industrialização, a tipologia da estrutura, o material utilizado para fabricação, as condições de construção e os tipos de pré-fabricação.

Segundo Rosário (1996) [47], a industrialização das casas de madeira desenvolveu-se a partir do Sistema Plataforma, nos países da América do Norte e Escandinávia, onde o uso é mais difundido, e conservou suas características originais, de maneira que a pré-fabricação se restringe ao material básico.

No Brasil, o uso deste material em obras de construção civil variam desde pilares, vigas e treliças até acabamentos em forros, pisos e esquadrias. A sua presença em obras no país é modesta, se comparada à países como Canadá e Estados Unidos da América, que compõem-se de 80% e 90% de casas construídas, respectivamente. A desconfiança com relação à durabilidade inibe os consumidores a adotarem a madeira como material para a moradia principal, à exceção do sul do país por causa da cultura trazida pelos imigrantes alemães e poloneses [48].

A industrialização está longe de ser completa, mas já é visível o ingresso dos kits de construção, a maioria de origem norte-americana. Empresas brasileiras integram um movimento de nacionalização de sistemas industrializados construtivos e tentam vencer as muitas barreiras apresentadas pelo mercado nacional.

No âmbito rural, a madeira é um excelente material para construções de pontes em estradas vicinais pelo seu potencial de resistência e durabilidade.

Outras finalidades para este material, relacionadas à construção civil, são de poder servir como matéria-prima para tapumes, pallets, padiolas, escadas, mesas, prateleiras, entre outros.

De acordo com a NBR 7190 (1997) [12], o projeto de estruturas de madeira deve ser realizado admitindo uma das classes de umidade especificadas na tabela 2.1, e têm por objetivo ajustar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira no exercício das condições do ambiente em que as estruturas permanecerão.

O consumo de madeira no país é, basicamente, destinado à produção de energia, papel e celulose. Somente 18% de seu uso é destinado à indústria madeireira [49], onde suas aplicações são direcionadas à telhados (42%), fôrmas (28%), móveis (16%), forros e esquadrias (11%) e produção de casas pré-fabricadas (3%) [50]. A suma comercialização estrutural se resume em Madeira Laminada Colada (MLC), madeira empilhada, vigas e painéis.

A Madeira Laminada Colada é obtida por meio de técnicas de colagem aliadas ao processo

Tabela 2.1: Classes de umidade de acordo com a NBR 7190 (1997) [12].

Classe de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente ( $U_{amb}$ )	Umidade de Equilíbrio da Madeira ( $U_e$ )
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12 %
2	$65\% \leq U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% \leq U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$	$\geq 25\%$

de laminação, no qual a disposição das tábuas contribui para o aumento da resistência mecânica. Suas vantagens são permitir atingir grandes envergaduras e possuir boa flexibilidade devido a alta capacidade de carga. O objetivo da colagem é eliminar os pontos fracos naturais das peças. Como exemplo tem-se a figura 2.3.

Construções com madeiras empilhadas consiste no empilhamento de peças de madeira maciça, possuindo um ótimo desempenho térmico, mas com baixa flexibilidade. Elas são perfiladas e reunidas com precisão, não permitindo infiltrações de água. Um exemplo é ilustrado pela figura 2.4.

Para obtenção de produtos com boa qualidade estrutural, a madeira bruta e úmida deve, primeiramente, passar pelo processo de secagem antes de ser processada. No Brasil, a secagem se dá, majoritariamente, por estufas convencionais. De acordo com Jankowsky (1995) [51], isto se deve ao fato de que as estufas permitem maior flexibilidade de controle nos vários processos empregados para madeira serrada.



Figura 2.3: Biblioteca Paulo Freire - Parque Tecnológico Itaipu [3].



Figura 2.4: Casa construída com madeira empilhada.

Segundo Zenid (2009) [52], os setores madeireiros que produzem pisos, esquadrias, forros e móveis são os que mais carecem de melhorias com relação a qualidade de seus produtos, uma vez que se o material utilizado apresentar defeitos, pode resultar em grandes perdas monetárias.

Em edificações, a secagem é uma etapa fundamental que proporciona o aumento da resistência mecânica, minimiza a deterioração de organismos xilófagos e permite a utilização de entalhes, uniões metálicas e adesivas. Também reduz os custos de transporte e armazenamento de peças.

### 2.2.3 Eucalipto

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae* e possui como centro de origem a Austrália e regiões próximas como Timor, Indonésia, Papua Nova Guiné, Ilhas Molucas, Papua Ocidental e sul das Filipinas [53]. Conta com cerca de seiscentas espécies, grande número de variedades e alguns híbridos [54].

É atualmente cultivado em regiões de clima tropical e subtropical, entre latitudes de  $40^{\circ}N$  e  $45^{\circ}S$  e altitudes que variam de 30 à 1000 metros. Possui espécies adaptadas à diversas condições de solo, inclusive aqueles com salinidade de 2 à 3% [55]. Sua coloração varia de castanho amarelado à castanho rosado e pode chegar a alturas entre 25 e 40 metros.

O rápido crescimento associado à produção de fibras e polpa de madeira de alta qualidade, com baixo custo sobre um curto período de tempo, em um regime de até três rotações sucessivas e econômicas, com ciclo de vinte e um anos, são as principais razões do extensivo uso de Eucalipto em reflorestamentos comerciais em várias partes do mundo [56].

É um gênero com grande plasticidade e dispersão mundial, crescendo satisfatoriamente em grande amplitude edafoclimática, extrapolando as regiões de origem [57].

A ótima adaptação do eucalipto às condições de solo e clima levaram o Brasil a tornar-se o maior produtor mundial, possuindo uma área estimada em 2.965.880 hectares [58]. O país, hoje, possui um dos mais importantes bancos de germoplasma do gênero *Eucalyptus*, com alta produtividade e adaptabilidade ao nosso ambiente [59].

Atualmente a sua utilização para fins de madeira serrada e laminação tem sido crescente. Esta aplicação crescente se deve às suas características de alta qualidade, à sua viabilidade econômica e sobretudo, à necessidade crescente de se encontrar alternativas para a substituição de madeira de espécies nativas das florestas tropicais e atlânticas, cada vez mais escassas e sujeitas às fortes pressões ecológicas de entidades ambientalistas visando sua conservação [60] [54].

Andr[61] afirma que os exemplos de uso da madeira de eucalipto em marcenaria existem desde longa data, estendendo-se por diferentes regiões do mundo. Mendonza (1995) [62] reitera que o eucalipto é utilizado no Chile para abastecer a indústria de móveis e construção civil.

Desde a década de 1950, na Austrália, África do Sul e Argentina, são fabricados móveis com algumas espécies de eucaliptos que produzem madeiras leves, de fácil trabalhabilidade mecânica e boas características para tratamentos superficiais, sobretudo para colagem e polimento [63]. A figura 2.5 ilustra um exemplo de móvel feito de eucalipto.

Apesar da grande demanda do eucalipto, a viabilidade ainda é um fator limitante para sua aplicação em alguns setores, sendo necessárias melhorias tecnológicas, que vão além do melhoramento genético e práticas silviculturais.

Brito (2006) [64] destaca o tratamento utilizando calor, ou termorreificação, como sendo o mais importante processo controlado de modificação das propriedades do eucalipto. Araújo (2010) [5] concluiu que, com a termorreificação, a estabilidade dimensional da madeira de eucalipto melhorou consideravelmente, assim com a dureza e resistência às flexões estáticas.



Figura 2.5: Mesa de eucalipto.

## 2.3 Tratamentos Térmicos

### 2.3.1 Conversão Energética da Biomassa

Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em processos físicos, químicos e biológicos [21].

Os processos físicos são caracterizados pela alteração da resistência do material e da densificação energética, teor de umidade, redução de massa e obtenção de óleos. Os processos biológicos são realizados com temperaturas próximas ao ambiente e umidades altas com a presença de agentes biológicos como as leveduras. A fermentação alcoólica e a digestão anaeróbica são os métodos mais utilizados [41]. Os processos termoquímicos tem como característica a utilização do aquecimento térmico e geralmente é realizado sob baixo teor de umidade [65].

O uso de resíduos florestais implica em processos de conversão termoquímica, havendo como principais exemplos a liquefação, pirólise, combustão e gaseificação. Atualmente, os processos industriais mais representativos são os de combustão e co-combustão (combustão simultânea de biomassa e carvão) porque estes processos são dominados e explorados há vários anos, já permitindo a produção de calor e eletricidade [66][67].

A rota termoquímica utiliza o insumo de calor para geração direta de energia ou para produzir combustíveis secundários de maior densidade energética. As diferentes rotas termoquímicas da biomassa estão esquematizadas na Fig. 2.6.

A pirólise é um processo térmico realizado, convencionalmente, em temperaturas entre  $500^{\circ}C$  à  $1000^{\circ}C$ , sob uma atmosfera inerte. Durante o acréscimo de temperatura a biomassa passa, primeiramente, por uma etapa de secagem seguido por um processo termoquímico que ocasiona a liberação de materiais voláteis. Estes materiais voláteis são compostos por gases condensáveis, gases não-condensáveis e um resíduo sólido, denominado carvão. Estes três componentes são quimicamente e energeticamente recuperáveis. Os teores de cada componente são controlados, principalmente, pela taxa de aquecimento e pela temperatura do processo [68].

A gaseificação é um processo térmico realizado em temperaturas acima de  $900^{\circ}C$  sob uma atmosfera levemente oxidante ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  ou ar subestequiométrico). No gaseificador, a biomassa é, inicialmente, submetida a uma etapa de secagem e, em seguida, uma etapa de pirólise. O carvão obtido, assim como os gases da pirólise, são submetidos a reações de gaseificação para produzir gases combustíveis, tais como  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , e gases não combustíveis,  $CO_2$ . Os gases combustíveis gerados podem ser recuperados por combustão, em uma caldeira ou em um motor, para produzir calor e/ou eletricidade. Outra forma de valorização desses gases é a produção de biocombustíveis (biodiesel, DME, metanol) por meio de uma etapa de síntese química [69].

Na combustão direta, é necessário uma etapa de pré-tratamento quando a biomassa precisa ser transportada por longas distâncias. De fato, devido à baixa densidade energética aparente da madeira ( $2.2$  à  $4 \text{ GJ}/m^3$ ) [70], a densificação da biomassa permite uma redução significativa nos custos de transporte e manuseio [71]. O pré-tratamento convencional é a pelletização, responsável na obtenção de densidades energéticas de  $7.8$  à  $10.5 \text{ GJ}/m^3$  [70]. Entretanto, a pelletização necessita

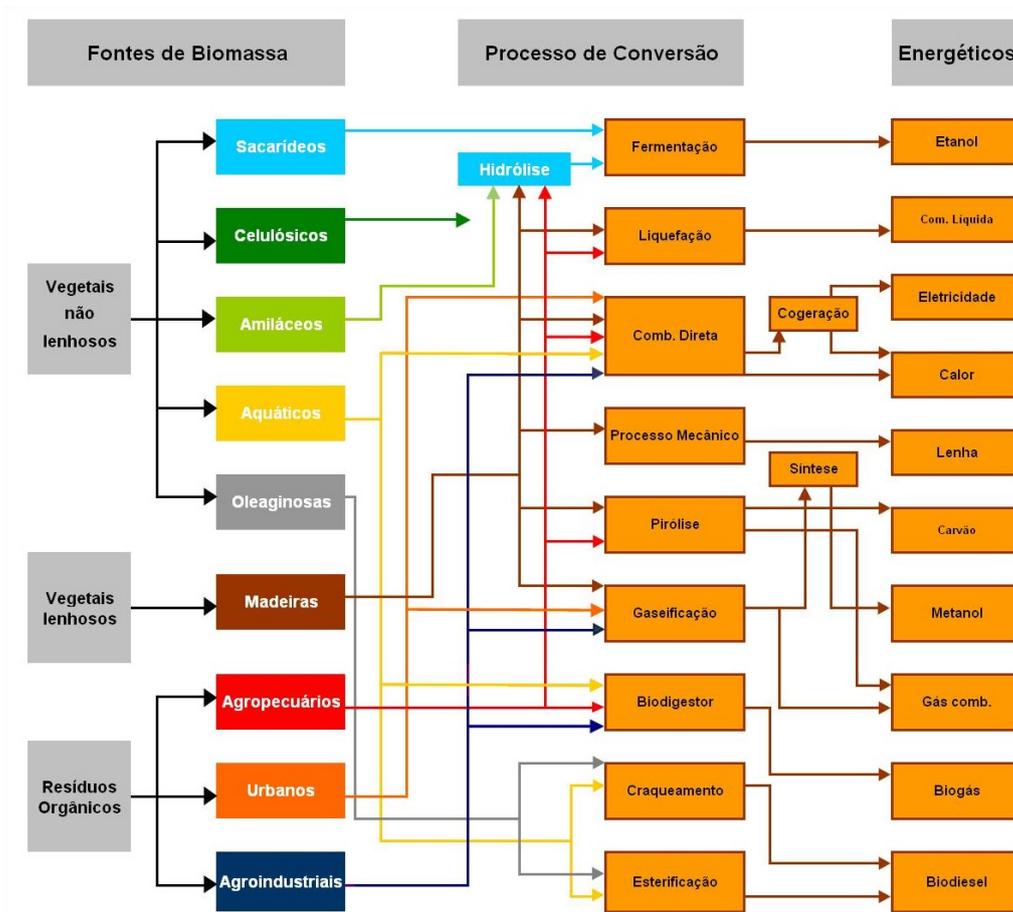


Figura 2.6: Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos (Adaptado) [4].

que as partículas de biomassa estejam da magnitude de milímetros [72][73], representando um custo alto de energia [8].

Outros processos como a co-combustão necessitam de injeção de biomassa em forma pulverulenta. Uma etapa de moagem fina é, portanto, indispensável [74]. Os elevados custos de operação destas moagens impulsionam a pesquisa de pré-tratamentos capazes de enfraquecer o material. Este é o caso da torrefação, que é um dos processos térmicos mais promissores de integrar eficientemente as cadeias de produção de energia a partir da biomassa [75][76].

### 2.3.2 Tratamentos Térmicos para Madeira

O objetivo é melhorar as propriedades do material utilizando transferência de calor como recurso. A extensão das alterações térmicas depende de fatores como espécie da madeira, temperatura, metodologia, atmosfera predominante e tempo de duração.

O tratamento térmico pode ser considerado um tratamento preservativo que melhora as condições sem a necessidade de adicionar compostos químicos e que pode tornar algumas espécies de clima temperado bem mais competitivas no mercado, devido ao aumento da sua durabilidade

natural [77]. A madeira tratada aumenta sua estabilidade dimensional e escurece sua cor, podendo torna-la mais próxima a espécies tropicais amplamente usadas [78].

Homan (2004)[79] considera como tratamento térmico todo o aquecimento da madeira à temperaturas maiores que  $180^{\circ}\text{C}$  em atmosfera redutora (com nitrogênio), vapor e óleo quente. Brito (2006)[64], entretanto, considera como termorreificação o aquecimento da madeira em temperaturas inferiores às que causam a degradação de seus componentes químicos fundamentais. Shi *et al.* (2007)[80] relata que, em madeiras submetidas a tratamentos com temperaturas acima de  $200^{\circ}\text{C}$ , geralmente, a redução no módulo de elasticidade é menor que no módulo de ruptura.

Termorreificação é um processo em que o calor é aplicado à madeira em temperaturas inferiores às que provocam o início da degradação da maioria de seus componentes químicos fundamentais, entre  $100^{\circ}\text{C}$  e  $220^{\circ}\text{C}$ , e tem a finalidade de obter um produto sólido que apresente características diferenciadas, comparativamente à sua madeira original, algumas delas podendo tornar-se interessantes para aplicações estruturais.

A figura 2.7 ilustra os mecanismos de reações de cada composição da madeira, suas implicações e resultados.

Na indústria florestal, a madeira é exposta a temperaturas elevadas, dependendo do tipo de processo escolhido, seja ele secagem convencional, polpação, fabricação de painéis reconstituídos ou estabilização dimensional [81]. O aperfeiçoamento na estabilidade dimensional pode ser explicada pela alta degradação das hemiceluloses e, por consequência, a redução dos sítios de sorção da

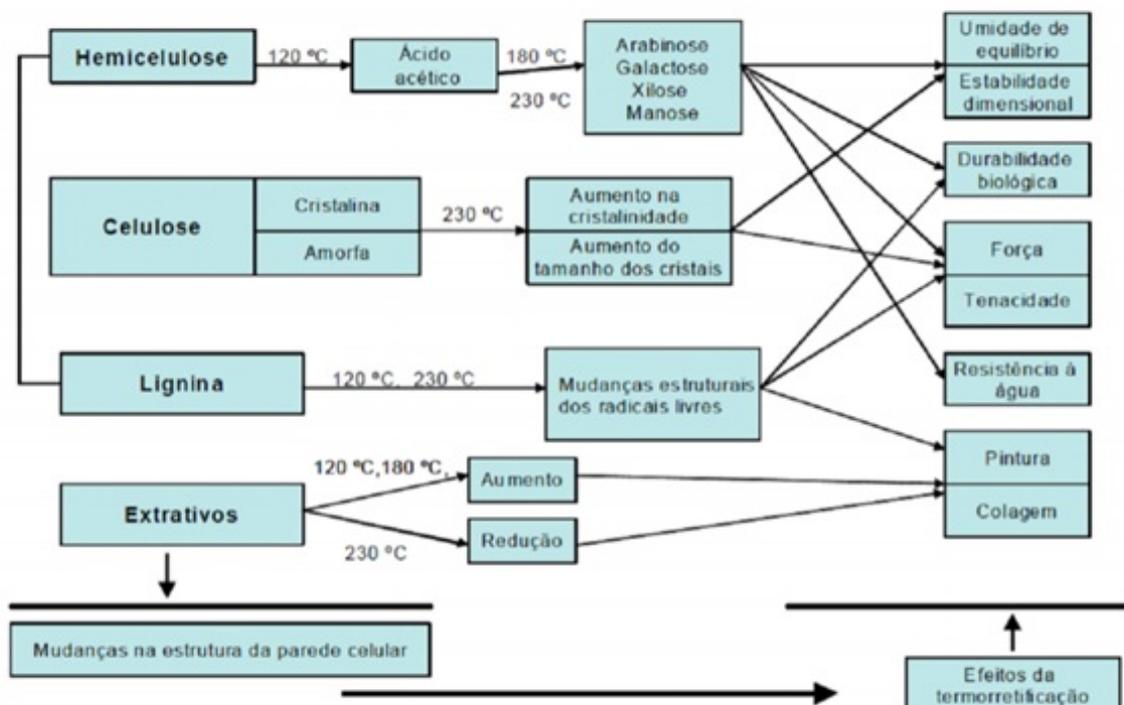


Figura 2.7: Mecanismo de reação da madeira modificada termicamente [5].

madeira, principalmente as hidroxilas [64] [77].

É um processo utilizado em escala industrial em diversos países europeus. A Finlândia, juntamente com a França, são os países mais especializados nos processos industriais de tratamento térmico [82]. Entretanto, a maioria destes processos são de temperatura mais baixas e normalmente não visa um uso energético da madeira tratada.

De acordo com Esteves e Pereira (2009), existem cinco principais tratamentos térmicos comerciais na linha da termorreificação. São elas: Thermowood, Plato Wood, Oil Heat Treatment, Bois Perdure e Rectification. Outros novos processos também estão emergindo em outros países, como Dinamarca e Áustria. Ainda, segundo o autor, nestes países a madeira tratada tem larga aplicação para construções civis, móveis, molduras, painéis decorativos e saunas.

Em um processo térmico na Finlândia, conhecido como ThermoWood, a madeira é seca à  $100^{\circ}\text{C}$  por até dois dias e, em seguida, é aquecida com vapor d'água em uma faixa de temperatura de entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $240^{\circ}\text{C}$ , em um período de 0,5 a 4 horas. Este método se difere de outros porque utiliza gás nitrogênio como proteção e alguns processos são realizados sob pressão. Esta técnica escurece a madeira, tornando-a mais estável sob diferentes condições de umidade e melhora suas propriedades de isolamento térmico. A figura 2.8 ilustra um exemplo de reator deste tratamento. A produção de madeira tratada termicamente por este processo, ao final de 2001, foi de  $40.000\text{ m}^3$  [81] [80].

O método conhecido como Le Bois Perdure consiste em submeter a madeira à altas temperaturas, em uma única vez, pelo processo de pirólise em atmosfera controlada. O aquecimento é realizado por temperaturas acima de  $200^{\circ}\text{C}$  e nenhum produto químico é aplicado. Ao final do



Figura 2.8: Reator de ThermoWood [6].

tratamento, o resfriamento ocorre por injeção de vapor de água no interior do forno, com objetivo de evitar a deterioração do material. Este processo melhora as propriedades físico-mecânicas da madeira e sua resistência à demanda biológica [83].

O processo holandês Dutch Plato Wood, desenvolvido pela companhia Plato International BV, é dividido em três estágios: hidrotermólise, secagem e cura. Na hidrotermólise, a madeira é aquecida entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $180^{\circ}\text{C}$ , com umidade entre 14 e 20%, sob alta pressão, aproximadamente 7 atm, por um período de 4 à 5 horas. A secagem é realizada em um forno industrial, de maneira convencional, por um período de 3 à 5 dias. Na cura, a madeira é aquecida novamente, entre  $150^{\circ}\text{C}$  e  $190^{\circ}\text{C}$ , em ambiente seco, por um período de 14 à 16 horas [83]. A figura 2.9 apresenta diversos grupos de madeiras momentos antes de entrar em um reator de hidrotermólise.

A técnica alemã, Oil Heat Treatment, baseia-se no aquecimento da madeira com óleo quente dentro de autoclaves, controlando a temperatura entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $260^{\circ}\text{C}$  e a pressão entre 2 e 14 bar, e, posteriormente, no aquecimento, entre  $60^{\circ}\text{C}$  e  $220^{\circ}\text{C}$  ao ar [82]. A figura 2.10 mostra que, para determinadas espécies, esta técnica causava uma mudança na coloração, conforme o aumento da temperatura do tratamento.

O método francês, French Rectification, consiste no aquecimento lento de madeira pré-seca a 12% de teor de umidade em  $210^{\circ}\text{C}$  a  $240^{\circ}\text{C}$ , em atmosfera com nitrogênio.

No Brasil, alguns processos já patenteados estão sendo introduzidos para fazer frente a sustentabilidade ambiental, visando a utilização da madeira de eucalipto, sem aplicação de produtos



Figura 2.9: Reator de hidrotermólise.

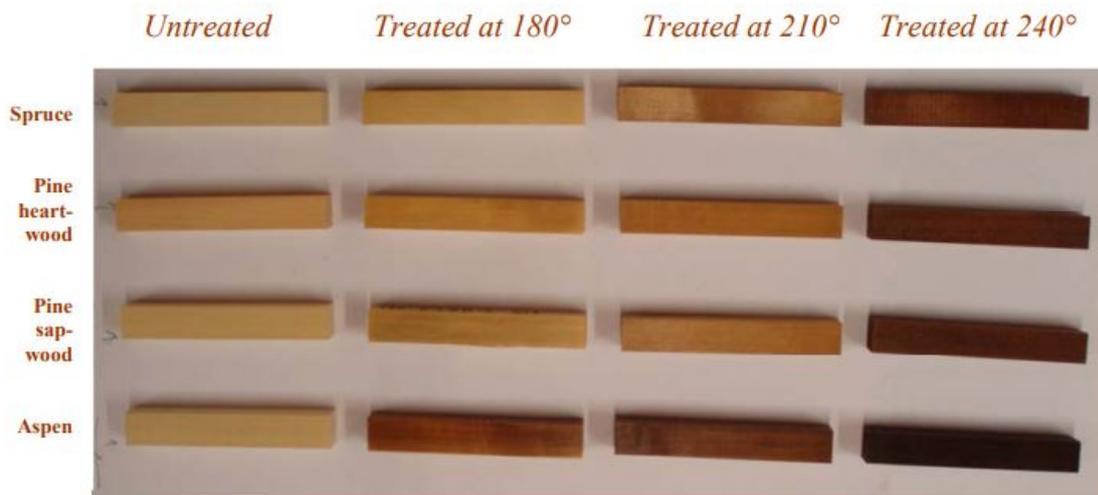


Figura 2.10: Amostras de diferentes espécies de madeira antes e depois do processo Oil Heat Treatment [7].

químicos preservantes para melhorar a durabilidade natural. Infelizmente, com o custo relativamente alto e a falta de conhecimento à respeito dos tratamentos, faz com que o material encontrado no mercado fique limitado à determinadas condições de uso.

## 2.4 Torrefação

A torrefação é um processo de tratamento térmico que se desenvolve na fase endotérmica da pirólise, entre 200 à 300°C, em atmosfera inerte [84], onde a hemicelulose, fração mais reativa da biomassa e principal fonte de voláteis de baixo poder calorífico, é decomposta [8] [84] [33].

A técnica, utilizado como pré-tratamento, tem como objetivo concentrar energia da biomassa em curto período de tempo e obter altos rendimentos, operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido, denominado biomassa torrificada [85].

Temperaturas acima de 300°C não são interessantes para esta etapa, devido ao processo de volatilização da biomassa decorrente do início da pirólise [86].

A torrefação ocorre sob atmosfera inerte para evitar a combustão e para que não haja adição dos voláteis oriundos do processo com o vapor, ar ou outro tipo de gás da atmosfera de trabalho [87]. O resultado deste processo é um material sólido intermediário entre biomassa e o carvão, com altos rendimentos energéticos [88], além de gases voláteis que podem ser condensáveis e servir de matéria-prima para produtos químicos [31].

O princípio deste tratamento tornou-se conhecido como pré-tratamento na década de 1930, na França, quando a produção de madeira torrificada foi pesquisada para uso em gaseificador [20]. Nos últimos anos, as pesquisas sobre torrefação foram voltadas para melhorar o desempenho da

Tabela 2.2: Influência da temperatura do processo na composição da madeira de pinho torrificada por 45 minutos (Modificado) [13].

<b>Temperatura de Torrefação (<math>^{\circ}C</math>)</b>	<b>Teor de C (%)</b>	<b>Teor de H (%)</b>	<b>Teor de O (%)</b>	<b>Teor de N (%)</b>	<b>Carbono Fixo (%)</b>	<b>PCS (<math>KJ/Kg</math>)</b>
250	51,45	6,13	41,59	0,13	23,26	20450
260	53,26	6,14	40,48	0,12	24,92	21000
270	54,03	6,03	39,84	0,10	27,01	21500
280	56,37	5,80	37,23	<0,10	31,99	22500
285	58,62	5,65	34,87	<0,10	35,23	22850

gaseificação e da produção de madeira torrificada de qualidade para substituir carvão térmico e carvão metalúrgico em usinas e altos-fornos [32].

Produtos procedentes da degradação dos compostos da madeira são formados durante o processo. A proporção de cada um está fortemente ligada às condições de operação, assim como às propriedades da biomassa [89] [90]. Na tabela 2.2 são apresentados os resultados obtidos da torrefação de pedaços de madeira à diferentes temperaturas [13]. Nota-se que o poder calorífico superior é diretamente proporcional à temperatura do processo.

A reatividade da biomassa no tratamento térmico está relacionada com sua composição, principalmente quanto ao seu teor de celulose e hemicelulose. As biomassas com maior porcentagem de xilanas são mais reativas do que os materiais lenhosos, conduzindo uma maior perda de massa no processo [91] [84] [92].

Pesquisas recentes sugerem que a torrefação proporciona uma melhora nas propriedades energéticas da biomassa [93]. Os benefícios deste método incluem maior poder calorífico, maior densidade energética, baixo teor de umidade, e maior homogeneidade das propriedades da biomassa.

Este processo também faz com que a logística de transporte e armazenamento de biomassa seja mais eficiente, visto que estes custos estão relacionados com base no volume do material, e a torrefação diminui este volume, tornando-se um tratamento economicamente favorável.

#### 2.4.1 Balanços de Massa e de Energia de Torrefação

A distribuição dos subprodutos é de 70% ou mais de biomassa torrificada e 30% de gases, condensáveis e não-condensáveis [8]. A Fig. 2.11 apresenta o balanço de massa e de energia de um processo de torrefação de biomassa.

Segundo Prins *et al.* (2006)[84], a madeira torrificada retém entre 70% a 90% da massa inicial, diminui de 80% para 60 à 75% o seu teor de materiais voláteis, e diminui de 10% para 3% o seu teor de umidade. O processo de torrefação tem um rendimento energético de até 80% [94].

Quando as camadas de matriz sólida atingem temperaturas superiores a  $180^{\circ}C$ , desencadeiam-

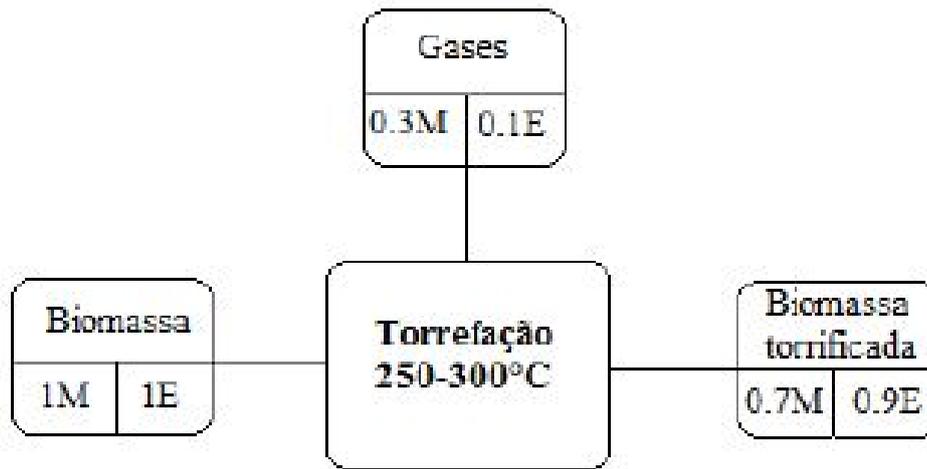


Figura 2.11: Balanço de massa e energia típicos de um processo de torrefação. M é unidade de massa, E é unidade de energia (Modificado)[8].

se as reações químicas, que avançam na direção do fluxo de calor à medida esta temperatura é ampliada. Este efeito cria uma fonte de reações de degradação primária, com caráter endotérmica [88].

A decomposição térmica tem início com a evaporação da água e de extrativos mais leves, até temperaturas de  $150^{\circ}\text{C}$ . Entre  $150$  e  $200^{\circ}\text{C}$  a decomposição se inicia, ocorrendo um processo lento de despolimerização da hemicelulose com emissão de ácido acético, fenóis e outros compostos lipofílicos de baixo poder calorífico [85] [31]. Entre  $200$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , a torrefação aumenta de intensidade, ocorrendo a volatilização e carbonização da hemicelulose, e a despolimerização e volatilização parcial da lignina e celulose. Além disso, extrativos hidrofilicos como compostos oxigenados, ácidos carboxílicos de alto peso molecular, alcoóis e aldeídos entre outros gases também são liberados, levando à destruição da estrutura celular vegetal que resulta em um material mais quebradiço [85] [31] [95].

Os rendimentos e as propriedades dos produtos da torrefação são influenciadas por diversos fatores incluindo a composição da biomassa, o tamanho da partícula, temperatura do processo, tempo de resistência, taxa de aquecimento [25] e teor de oxigênio na atmosfera de trabalho [96].

A composição da biomassa é um parâmetros muito importante na distribuição dos produtos da torrefação, principalmente em termos de conteúdo de hemicelulose, celulose e lignina [97]. Rousset *et al.* [90] afirmam que a grande dificuldade é controlar a qualidade da biomassa através de parâmetros da torrefação, tais como tempo e temperatura.

A temperatura tem forte influência sobre a composição química da madeira. A medida que é aumentada, o teor de carbono aumenta proporcionalmente e os teores de oxigênio e hidrogênio diminuem ostensivamente [85]. O balanço de massa e de energia evidencia o papel da temperatura final do processo: temperaturas mais altas causam maior formação de voláteis, portanto, maiores perdas de massa [94].

Porém, foi observado que a  $280^{\circ}C$ , a relação entre poder calorífico superior e o tempo de residência no reator comportou-se de forma assintótica. Portanto, prolongar o tempo de torrefação não tem objetivo lógico para melhorar as características do material torrado [88].

As formas mais usuais de avaliar o comportamento da madeira em função da temperatura e do tempo de tratamento térmico incluem a Análise Termogravimétrica, que evidencia a perda de massa do material, a Análise Dinâmica Mecânica, que se interessa pelas propriedades mecânicas do material e a Calorimetria Diferencial por Varredura, que mede a energia das reações [98]. Um estudo realizado por Nimlos *et al.* (2003) [99], mostraram que a perda de massa ocorreria, principalmente, em função da temperatura, e menos do tempo de residência.

Arias *et al.* (2008) [33] observaram que, à uma de temperatura de  $280^{\circ}C$ , amostras de eucalipto apresentaram uma diminuição de 32% no teor de oxigênio, 23% no teor de voláteis e 42% no rendimento mássico. Contudo, constataram um aumento de 18% no poder calorífico superior.

Pesquisas podem ser encontradas a respeito da análise da influência da atmosfera durante a torrefação. Rousset *et al.* (2012) [96] examinaram a influência de diferentes concentrações de oxigênio (0% à 21%) no tratamento de amostras de eucalipto à  $240^{\circ}C$  e  $280^{\circ}C$ , analisando estatisticamente a significância deste parâmetro na reatividade do material. Somente para o teste à  $280^{\circ}C$  com concentração de 21% houve notável influência.

USLU (2008)[75], segundo a um estudo de Bergman (2005)[8] pela Energy research Centre of the Netherlands (ECN) realizado à  $280^{\circ}C$  por 17,5 minutos, enfatiza que uma alta eficiência da torrefação baseia-se na operação autotérmica onde o gás da torrefação queimado é utilizado na secagem da madeira. Neste experimento, o processo atingiu uma eficiência energética de 96% [25].

## 2.4.2 Características e Aplicações da Madeira Torrificada

A torrefação visa melhorar alguns empecilhos da madeira *in natura*, tais como: natureza fibrosa, propriedades físicas não uniformes, o baixo teor de carbono fixo associado ao alto teor de matérias voláteis, baixa densidade energética, natureza higroscópica e baixa densidade aparente [100] [101] [102].

Bridgeman *et al.* (2010) [103] apontam uma diminuição significativa no gasto energético na moagem de biomassas lenhosa após o tratamento térmico, além de obter partículas mais uniformes. A moagem do material se torna importante visto que os materiais com distribuição granulométrica mais homogênea e de menor tamanho são mais facilmente manuseados e processados [33].

A biomassa torrificada possui algumas vantagens com relação ao carvão vegetal. Por exemplo, com 80% de rendimento gravimétrico durante a torrefação se produz um combustível com poder calorífico de  $22.560KJ/Kg$ , o qual representa um teor energético de 24% maior que a produção de carvão em sistema pressurizado com 45% de rendimento mássico e poder calorífico superior de  $30.000KJ/Kg$ . Ou seja, em termos de conversão energética, a torrefação é mais vantajosa [104].

Prins *et al.* (2005) [84] demonstrou que gaseificação da biomassa torrefeita é um meio eficiente de produzir energia sustentável, e que o gás produzido pode ser usado para a produção de

eletricidade, combustíveis e produtos químicos.

Devido às características que a biomassa torrada adquire, este tratamento térmico apresenta-se como uma alternativa para melhorar as propriedades de seus resíduos, facilitando seu transporte e armazenamento, e, portanto, visa sua aplicação como fonte energética economicamente viável [88].

A definição do tempo de torrefação pode causar dificuldades na interpretação do processo, pois muitas vezes não há como distinguir o aquecimento da secagem [8].

A biomassa torrificada pode ser utilizada em briquetagem, peletização, gaseificação e plantas de co-combustão para geração de energia térmica [92].

Apresentam-se, como destaque, algumas aplicações para a madeira torrificada: combustível de uso doméstico (lareiras, fogueiras) por possuir baixas emissões de fumaça durante a combustão, uso industrial em caldeiras para a produção de vapor, uso como redutor em processos metalúrgicos devido ao seu alto teor de carbono fixo e uso em gaseificadores, pois sua padronização facilita a regulação e a otimização do processo de gaseificação [25] [88].

Na literatura ainda são reportados processos de torrefação seguidos de densificação da biomassa para produção de pellets com maior caráter hidrofóbico e alta densidade física e energética. Com isso, o material pode ter tamanhos padronizados para facilitar a alimentação da matéria-prima em instalações industriais e domésticas [105] [72].

Ensaio realizado em um forno para a redução de silício, o qual requer redutores reativos e de alta resistência mecânica, indicaram que a madeira torrefeita teve um melhor desempenho que a mistura de carvão e madeira tradicionalmente usada para estes propósitos [9].

A madeira também pode ser utilizada como um excelente material de construção, visto que esta combina três qualidades difíceis de encontrar em madeiras comuns: hidrofobia, resistência mecânica e resistência às pragas, sendo uma linha de pesquisa muito desenvolvida atualmente na França [106].

Também pode servir como tratamento térmico de madeira contaminada. Girods *et al.* (2007) [107] realizaram tratamento térmico de resíduos contendo uréia-formaldeído, onde primeiramente executaram a torrefação da amostra, entre 250 à 300°C, em seguida realizaram a gaseificação do resíduo descontaminado. Como resultado, descobriram que a faixa de temperatura ligadas à degradação da madeira são diferentes daquelas obtidas para degradação da resina de uréia-formaldeído.

### 2.4.3 Tecnológica da Torrefação

A maioria das tecnologias patenteadas, ou em desenvolvimento, para torrefação são baseadas em conceitos de reatores existentes e destinados para fins como secagem e pirólise [70]. A seleção adequada da estufa é importante para que cada equipamento possua determinadas características para lidar com tipos específicos de biomassa, que irão melhorar a qualidade dos produtos torreficados a baixo custo [20].

Os reatores podem ser classificados como: de aquecimento direto, onde o meio de aquecimento

entra em contato direto com a biomassa, ou indireto, onde a transferência de calor para a biomassa é realizada pelo processo da convecção [8]. O reator de aquecimento direto tem uma melhor e mais uniforme transferência de calor, enquanto o de aquecimento indireto os voláteis não são diluídos pelo fluido de aquecimento, e podem ser facilmente utilizados na combustão [108].

Outros diferentes métodos de torrefação têm sido apresentados para melhorar o tratamento térmico da biomassa, tais como torrefação úmida e torrefação via líquido iônico.

A torrefação úmida consiste em um tratamento hidrotérmico por meio de água pressurizada produzindo sólidos com densidade energética maior que a torrefação à seco, no entanto, o gasto energético e custos operacionais tendem a ser mais elevados que as demais técnicas [108].

A torrefação via líquido iônico visa elevar a taxa de queima da celulose à temperaturas inferiores a  $300^{\circ}\text{C}$  através da impregnação de líquidos ionizados [109].

Na França foram desenvolvidos três reatores de torrefação. A de maior porte, situada em Laval-de-Cère, opera por meio de um processo contínuo de produção de madeira torrificada em nível industrial, produzindo anualmente doze mil toneladas. A transferência de calor ocorre por meio de condução de calor através do contato das paredes da estufa com a madeira. Essas paredes são aquecidas por meio de gases de combustão produzidos em uma caldeira. Para obter bons resultados nesta unidade, a madeira deve ser primeiramente secada e, em seguida, picada em pedaços de dez milímetros antes de entrar no forno de torrefação [9].

Os outros dois reatores franceses funcionam por meio de processo por batelada, o qual é caracterizado pela transferência de calor por convecção do gás de combustão através da madeira. Um dos fornos, desenvolvido pela empresa Pillard, é constituído de duas câmaras, uma para secagem e outra para torrefação. A figura 2.12 apresenta este tratamento. A unidade produz duas mil toneladas por ano. No terceiro reator, desenvolvido pela empresa Fages Habermann, a secagem e torrefação ocorrem no mesmo forno. A produção é de quinhentas toneladas anuais [9].

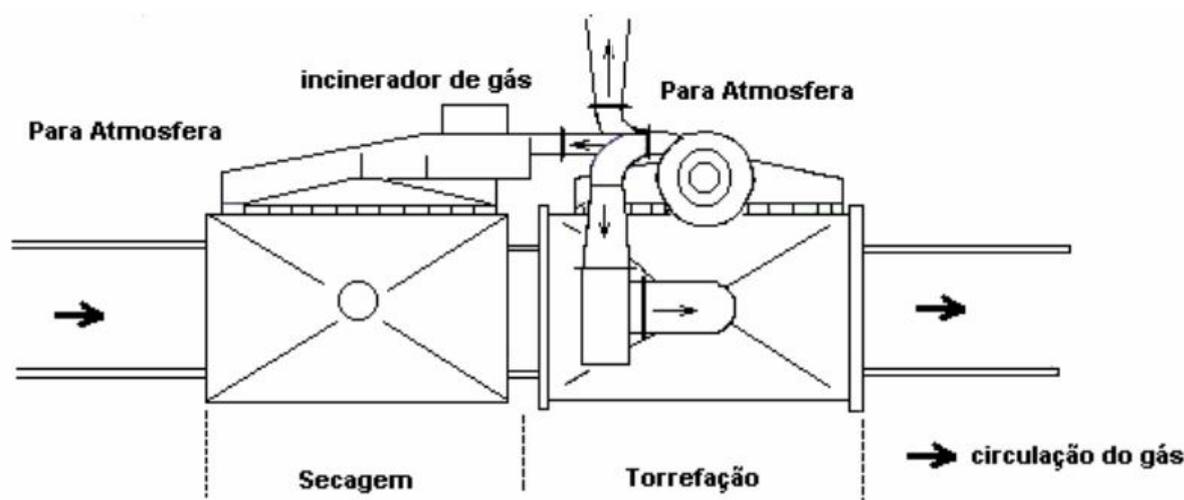


Figura 2.12: Planta de torrefação da Pillard [9].

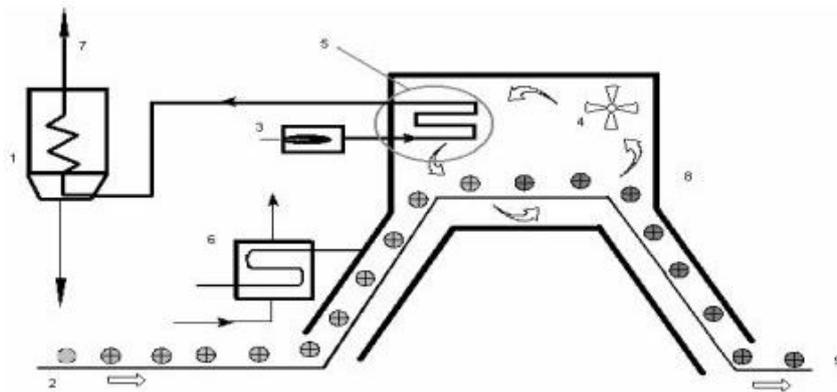


Figura 2.13: Planta de torrefação com vapor superaquecido (Modificado) [10].

Satpathy *et al.* (2014) [110] verificaram os efeitos desta técnica em um reator de microondas, variando a energia entre 200 à 300W, com tempo de reação de dez à vinte minutos e teor de umidade das amostras entre 5 à 15%. A biomassa foi inserida em um recipiente cilíndrico de quartzo, hermeticamente fechado. O aquecimento embasava-se nas vibrações e atrito das moléculas, em uma faixa de frequência de 300MHz e 300GHz.

Bourgeois (1989) [111] propõe um processo de termocondensação de materiais lenhocelulósicos. O material é obtido por torrefação isotérmica durante trinta minutos em um forno horizontal com correntes cruzadas entre o material tratado e os gases quentes. Esta estufa possui dispositivos de agitação para transportar e homogeneizar o material em um gerador de gases, os quais são postos em circulação por um ventilador.

Arcate (2000) [10], juntamente com pesquisadores da Transnational Technology, desenvolveram um processo de torrefação que consiste em secagem por vapor superaquecido. Este sistema dispensa o calor perdido no ar da câmara de secagem. O processo se chama *Airless Drying*, e permite torreficar peças maiores de madeira. A Fig. 2.13 ilustra este processo. O vapor superaquecido é recirculado entre o aquecedor, ao qual circulam gases quentes de combustão, e a biomassa até a secagem da peça, que, em seguida, é transformada em madeira torrificada. Os voláteis gerados pela biomassa são extraídos e seu conteúdo energético recuperado.

## Capítulo 3

# Materiais e Métodos Experimentais

### 3.1 Etapas do Projeto

Definiu-se um cronograma de atividades, ilustrado na Fig. 3.1, organizando as etapas para elaboração do trabalho, de maneira à atingir os objetivos propostos.

A primeira etapa consiste em definir as condições iniciais do projeto, tais como temperatura de trabalho, máxima temperatura das paredes externas do reator e a capacidade de operação da resistência elétrica, dos controladores, dos analisadores e das balanças. Em seguida, realizou-se um dimensionamento inicial dos elementos construtivos, com base nas condições de operação presentes no reator experimental do LPF.

Posteriormente, foi destacado todos os materiais necessários para elaboração da proposta, juntamente com seus respectivos modelos e fabricantes, e as devidas observações a serem feitas.

Procedeu-se com o dimensionamento dos materiais estabelecidos, empregando conceitos teóricos e ideais de transferência de calor, tanto por condução, quanto por radiação, juntamente com as condições operacionais de um forno semi-industrial. O projeto foi idealizado, em três dimensões, por um programa computacional, denominado *SolidWorks*.

A etapa final consistiu em submeter o protótipo do reator à uma série de simulações computacionais de processos de transferência de calor envolvidos no tratamento térmico de torrefação, com o intuito de analisar seu comportamento e viabilizar o dimensionamento do projeto, utilizando o software COMSOL *Multiphysics*.

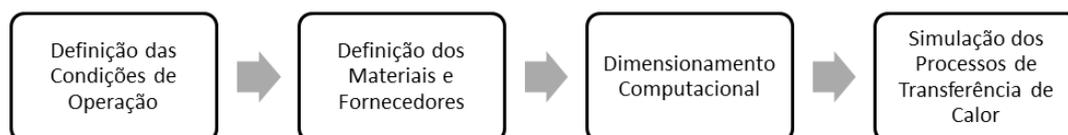


Figura 3.1: Etapas do projeto.

## 3.2 Condições Operacionais da Proposta

Além de estudos a respeito de um reator termoacústico, desenvolvido por um grupo de pesquisa da Universidade de Brasília, em colaboração com o LPF, o reator de torrefação será desenvolvido baseado também nos estudos publicados pelo grupo francês do laboratório LERMAB, e em reatores existentes na indústria de tratamentos térmicos. Utilizou como fundamento, o diagrama esquemático, elaborado por Pires *et al.* (2018) [11], deste reator, apresentado na Fig. 3.2.

A tabela 3.1 apresenta os principais parâmetros do reator proposto juntamente com seus respectivos valores iniciais de condições operacionais e demais considerações.

O protótipo, em escala semi-industrial, deverá atender a capacidade operacional de trabalhar com temperaturas variáveis entre 180 e 300°C, com taxas de aquecimento entre 0,5°C/min e 5,0°C/min, dependendo do objetivo da análise experimental. Seu material deverá resistir às temperaturas impostas, sem apresentar corrosão, oxidação e/ou deformação correspondente a queda de rigidez.

Para elaboração do corpo de prova, considerou-se perfis retangulares de madeira com espessura máxima de 2 centímetros. A placa de resistência elétrica precisará fornecer a potência necessária para transmitir calor por condução à superfície da madeira, a fim de alcançar a temperatura desejada. Termopares serão instalados para melhor controle operacional.

Além disto, as faces laterais da resistência irão irradiar uma determinada taxa de calor para as paredes internas do forno, aquecendo-as. O uso de isolante térmico irá assegurar que a temperatura das paredes externas do reator não excedam temperaturas acima da temperatura ambiente.

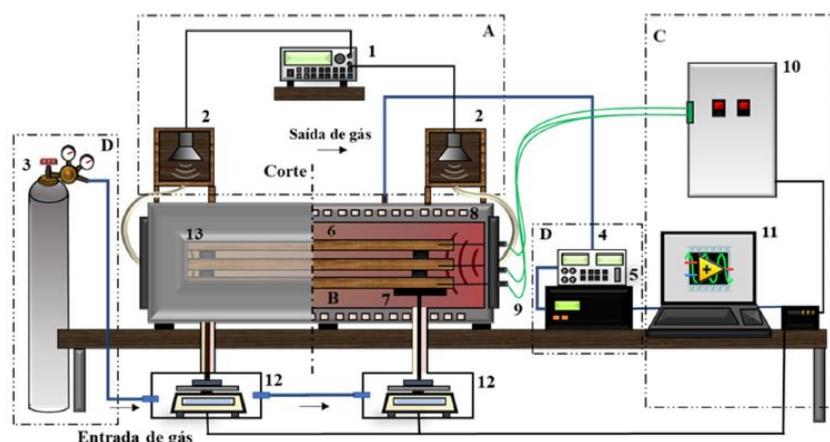


Figura 3.2: Diagrama esquemático simulado do reator em escala laboratorial com quatro subsistemas: acústico (A), tratamento térmico (B), energia e registro (C) e alimentação a gás (D) [11]. Lista de equipamentos: 1) Gerador de sinal acústico; 2) Alto-falante de som 3) Cilindro de gás  $N_2$ ; 4) Bomba de gás; 5) controle de  $O_2$ ; 6) Câmara cilíndrica do reator; 7) Suporte de amostra de madeira; 8) Resistências elétricas para aquecimento por convecção; 9) Termopares; 10) Controle do sistema; 11) Computador; 12) Equilíbrio elétrico de peso 13) Visor.

Tabela 3.1: Condições operacionais iniciais do reator de torrefação.

Parâmetro	Condições Operacionais
Temperatura de Trabalho	180 à 300°C
Taxa de Aquecimento	1°C/min
Concentração de O <sub>2</sub>	10 %
Amostras de Madeira	Perfis Retangulares
Resistência Elétrica	Transmissão Uniforme de Calor
Isolante Térmico	25°C na Superfície Externa
Balança Semi-Analítica	Precisão de 0,1g
Termopar	Precisão de 0,5°C

O sistema deverá possuir a capacidade de registro, em tempo real, da evolução da perda de massa periódica da amostra ao longo do processo de tratamento térmico. As balanças deverão estar devidamente calibradas e possuir a menor incerteza possível.

O suporte para alocação das amostras deverá ser submetido a secagem à ar e estar em equilíbrio com a umidade ambiente, para garantir a melhor obtenção da variação de massa.

Para a preservação de atmosfera inerte, com concentração máxima de oxigênio à 10%, e evitar a combustão de produtos voláteis [96], o forno necessitará possuir sistemas de aquisição e controle de dados, que possibilite o monitoramento instantâneo do nível de O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> no interior do reator.

Eseltine *et al.* (2013) [112] realizaram testes de torrefação de biomassa lenhosa utilizando dióxido de carbono e atmosfera inerte de nitrogênio como meio. Descobriram que usando CO<sub>2</sub> em temperaturas acima de 250°C foi verificado um aumento na perda de massa, cerca de 5%, em comparação com a atmosfera inerte. A fim de eliminar os gases voláteis e as moléculas de oxigênio produzidas pelo tratamento térmico, um cilindro de nitrogênio deverá interligado ao reator. Ao ser identificado um aumento dos níveis de O<sub>2</sub> e CO, a válvula do cilindro será acionada manualmente, injetando gás N<sub>2</sub> no interior do reator, expelindo estes gases por uma abertura.

### 3.3 Definições Iniciais

#### 3.3.1 Espécie da Madeira

Para execução do projeto, foram selecionadas amostras de madeira da espécie *Eucalyptus grandis*, por apresentar características físicas, químicas e mecânicas necessárias para obter-se bons resultados no processo de torrefação. Esta espécie é leve e de fácil manuseio, seu plantio apresenta rápido crescimento, possui boa trabalhabilidade e densidade energética, e possui agradável resistência mecânica. Exibe também boas características de aplainamento, lixamento, torneamento, furação e acabamento [5].



Figura 3.3: *Eucalyptus grandis*.

Gonzalez *et al.* (2006) [14] avaliaram resultados experimentais para a densidade básica média da espécie, visando a sua valorização e utilização na indústria moveleira. Em virtude disto, para o presente trabalho, tomou-se como referência o valor de  $0,59 \text{ g/cm}^3$ .

A madeira de *E. grandis* apresenta um menor coeficiente de anisotropia, o que leva a imaginar que essa espécie será menos propensa a defeitos durante a secagem, oferecendo melhores estabilidades dimensionais quando for utilizada [14]. Estas e algumas outras características do material estão apresentadas pela tabela 3.2.

Os corpos de prova serão confeccionados em formatos retangulares com dimensões de  $60 \times 20 \times 2$  centímetros. De modo a minimizar seus efeitos de heterogeneidade, foi descartado a casca das amostras. O experimento consiste em torreficar, simultaneamente, três destes perfis.

Tabela 3.2: Características do *Eucalyptus grandis* [14].

Parâmetro	Valor
Densidade	$0,59 \text{ g/cm}^3$
Retratibilidade Volumétrica	17,26 %
Condutividade Térmica	$0,14 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Capacidade Térmica à Pressão Constante	$1.700 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
Coeficiente de Anisotropia	1,58
MOR	$858,00 \text{ kg/cm}^2$
MOE	$159,56 \text{ kg/cm}^2$

### 3.3.2 Reator de Torrefação

O reator possibilitará trabalhar com diferentes intervalos de aquecimento apropriados para torrefação, visto que as resistências elétricas estarão conectadas à controladores de potência.

O reator a ser projetado se baseia no reator presente no LPF, ilustrado na Fig. 3.4. A tabela 3.3 apresenta as principais condições necessárias para o funcionamento do reator.

A região responsável pelo tratamento térmico será composta por uma câmara, um suporte para o corpo de prova e quatro placas de resistência elétrica. O isolamento térmico será instalado para impedir a dissipação de calor gerada por esta região.

A câmara necessita garantir hermeticidade e seu material deverá ter boa resistência à altas temperaturas. O suporte terá de ser fabricado de material com boa resistência mecânica, visto que será essencial suportar aproximadamente 8 quilogramas de corpo de prova.

O sistema permitirá medições de perda de massa da madeira, em tempo real, dado que o suporte estará apoiado em balanças, que, por sua vez, estarão armazenadas em uma caixa de vidro acrílico contra oscilações gerados nos ensaios.

Por fim, medições de temperatura serão realizadas por meio de dois termopares inseridos às paredes internas do forno. Estes valores irão auxiliar no controle da potência das resistências elétricas.

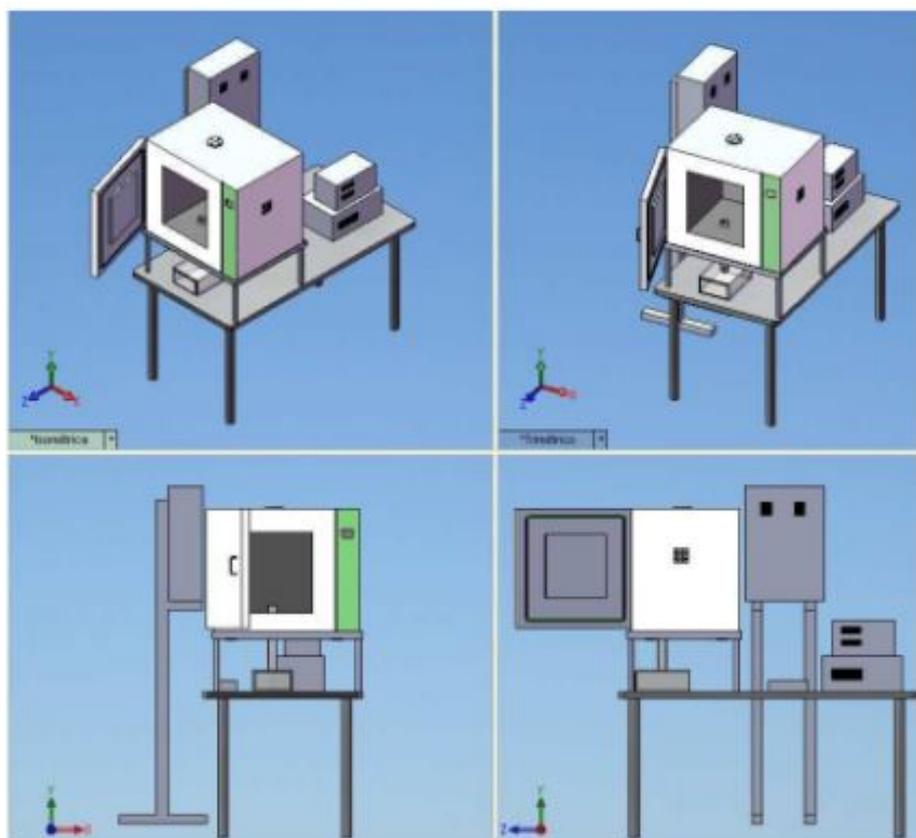


Figura 3.4: Reator de torrefação do LPF.

Tabela 3.3: Principais componentes do reator semi-industrial de torrefação.

Componente	Condição Operacional
Câmara do Reator	Hermético
Suporte para Amostras	Resistir ao peso do corpo de prova
Resistência Elétrica	Aquecer o corpo de prova
Isolante Térmico	Impedir a dissipação de calor entre as paredes

### 3.3.3 Seleção das Placas de Resistência Elétrica e Isolante Térmico

Por meio de contato com diversos fabricantes, foram escolhidas placas de resistência elétrica de mica, onde, em volta delas, fitas de níquel-cromo são enroladas, servindo como elemento resistivo. Sobre a peça, há uma fina camada de aço inoxidável 430 para acabamento superficial. Suas dimensões são de  $60 \times 20 \times 1,5$  centímetros.

Conforme previamente citado, as resistências irão transmitir calor por condução às superfícies das madeiras, a fim de torrificá-las, em um formato *sanduíche*, como ilustra a figura 3.5. Esta disposição irá garantir que o fluxo de calor adentre as amostras, aquecendo-as. Com auxílio de um controlador de potência, a taxa de energia transmitida irá administrar a temperatura do corpo de prova até alcançar a temperatura desejada.

Com relação ao isolamento térmico, para atender a necessidade imposta nas condições operacionais da proposta, o material previamente selecionado foi a lã de vidro, por possuir baixa reatividade ao meio, baixo custo, fácil manuseio, boa durabilidade e não se deteriora, nem apodrece com o tempo.

A tabela 3.4 apresenta as descrições e funções operacionais das ferramentas selecionadas.



Figura 3.5: Sentido do fluxo de calor.

Tabela 3.4: Descrição operacional da placa de resistência e do isolamento térmico.

Componente	Material	Função Operacional
Placa de Resistência Elétrica	Aço Inoxidável 430	Condução de Calor
Isolamento Térmico	Lã de Vidro	Evitar a Dissipação de Calor

### 3.4 Representação Estrutural

Com auxílio do software *SolidWorks* obteve-se a representação virtual, em três dimensões, da proposta.

Inicialmente, foram analisados o material da estufa e suas dimensões. A sua estrutura é formada, basicamente, por dois paralelepípedos retangulares, um adentro do outro, feitos de aço carbono SAE 1020. Entre as duas carcaças haverá uma manta de isolamento térmico, responsável por evitar a dissipação de calor entre as superfícies e garantir temperatura ambiente nas paredes externas do reator. O forno possuirá duas portas para melhor manuseio do corpo de prova, conforme ilustrado na Fig 3.6.

A carcaça interna terá dimensões de  $70 \times 50 \times 50$  centímetros. A externa,  $70 \times 52 \times 52$  centímetros. A espessura das chapas de aço que compõe ambas as carcaças serão de 3 milímetros.

Tanto a estrutura interna, quanto a externa, serão soldadas à cantoneiras de 2 milímetros de espessura, em suas arestas, ao longo de todo comprimento, certificando a estabilidade do conjunto.

Na carcaça interna ocorrerá todo processo de torrefação, onde o corpo de prova será posicionado

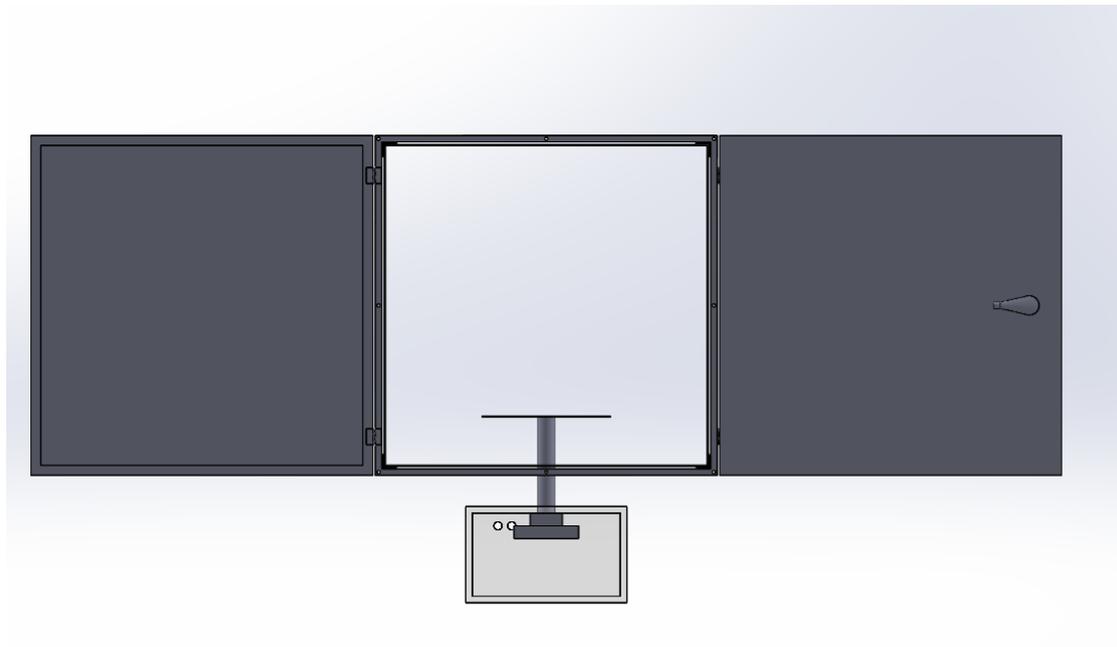


Figura 3.6: Vista frontal inicial do reator.

junto ao suporte e termopares. Entretanto, a externa, servirá para assegurar a resistência mecânica do forno. A garantia de estanqueidade do sistema virá a partir da aplicação de silicone de alta temperatura em todas as arestas internas do reator.

A parte superior da estrutura portará de quatro furos de, aproximadamente, 2 centímetros de diâmetro, sendo ilustrado pela figura 3.7, onde dois serão para passagem de termopares e dois serão para saída de gases. Nas saídas de gases, cada abertura terá uma tubulação flexível interligando a câmara ao controlador de gases.

Na superfície externa, será instalada quatro dobradiças do tipo invisível, onde elas terão a finalidade de sustentar e dar movimento as duas portas do reator.

A base irá possuir duas aberturas circulares, de 5 centímetros de diâmetro, para interligar o reator com o suporte para balanças. Por meio delas, as hastes do sustentáculo do corpo de prova irão atravessar até alcançarem as balanças de precisão.

As portas possuem valores para dimensões de largura e altura iguais aos valores da carcaça externa. A sua espessura será composta por duas chapas de 3 milímetros, onde, entre elas, terá também uma camada de isolante térmico. Ao redor de suas arestas serão inseridos silicone de alta temperatura para garantir a vedação interna. Maçanetas do tipo alavanca serão instaladas na superfície externa.

O sustentáculo do corpo de prova foi projetado com uma base retangular e duas hastes cilíndricas, conforme a figura 3.8. A base tem dimensões de  $60 \times 25 \times 1$  centímetros, onde, sobre ela, o corpo

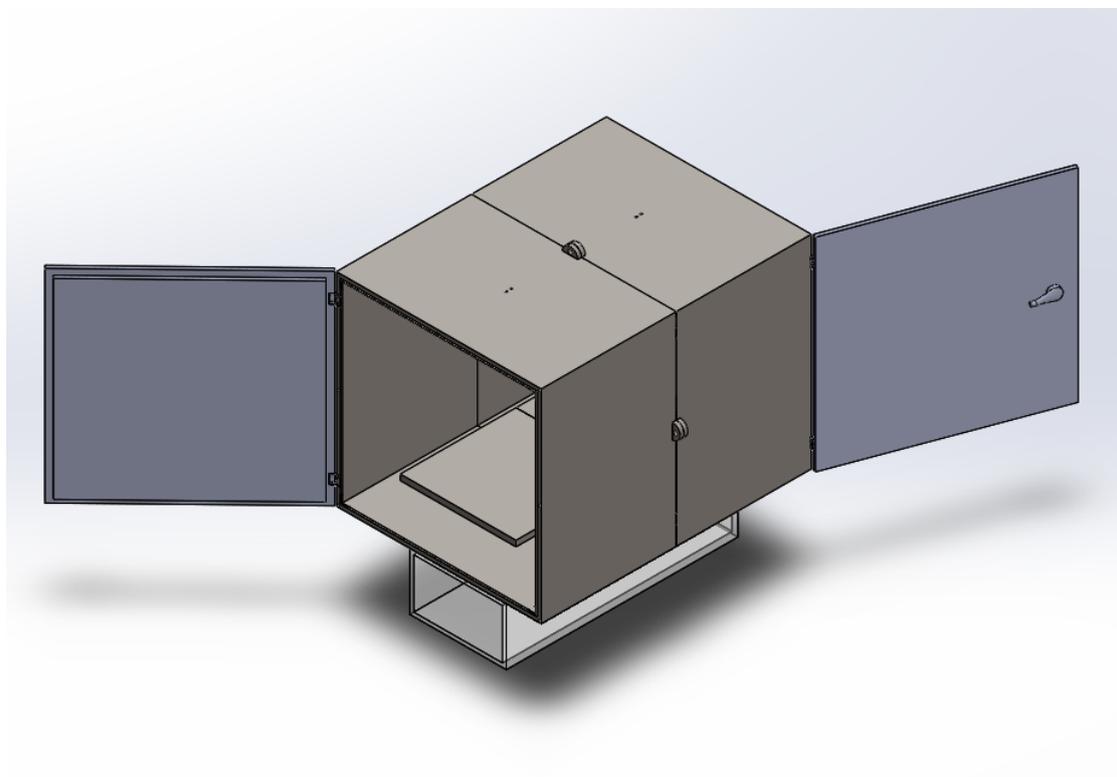


Figura 3.7: Vista isométrica do reator.

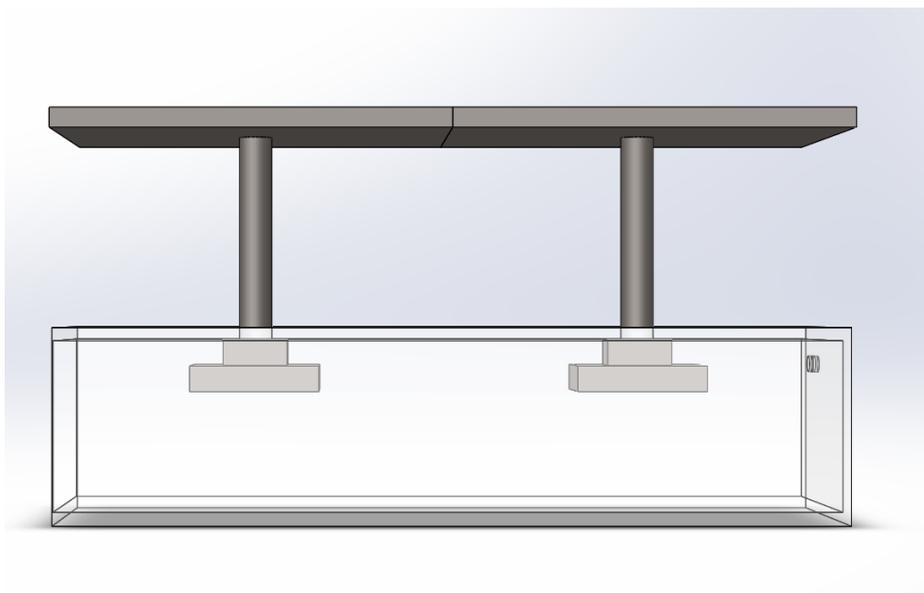


Figura 3.8: Vista lateral do suporte do corpo de prova.

de prova será disposto para experimentações. As hastes irão interligar o suporte com a balança.

Serão usadas duas balanças semi-analíticas, iguais às ilustradas pela figura 3.9, para o estudo da taxa de perda de massa instantânea de todo processo do tratamento térmico. O modelo BK8000, da fabricante *Gehaka*, possui precisão de  $\pm 0,1$  grama e é capaz de suportar uma carga máxima de 9 quilogramas.

A caixa de acrílico que irá acomodar as balanças possui dimensões de  $70 \times 30 \times 15$  centímetros, com suas paredes medindo 5 milímetros de espessura, sendo ilustrado na figura 3.10. Nela foram



Figura 3.9: Balança semi-analítica BK8000.

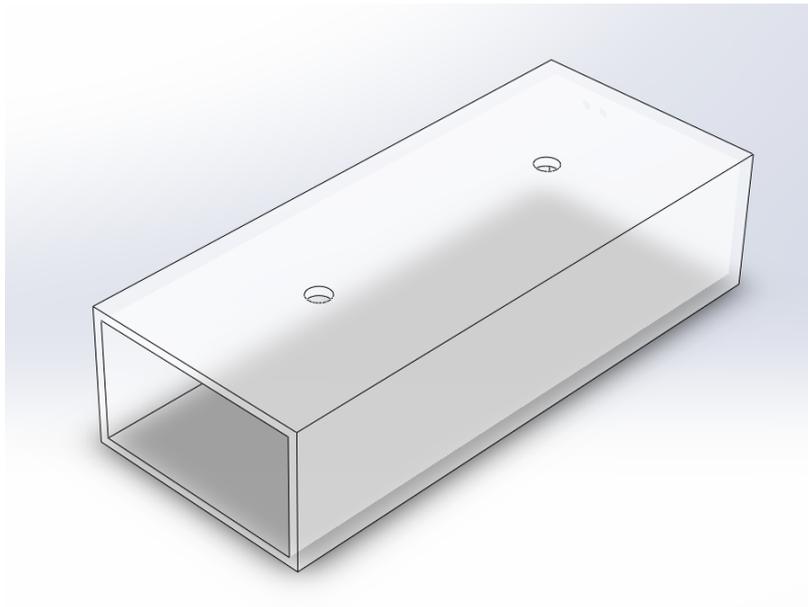


Figura 3.10: Vista isométrica da caixa de acrílico.

introduzidos dois furos de 5 milímetros para passagem de cabos de alimentação e comunicadores.

A Fig. 3.11 ilustra a projeção final em três dimensões do reator de torrefação.

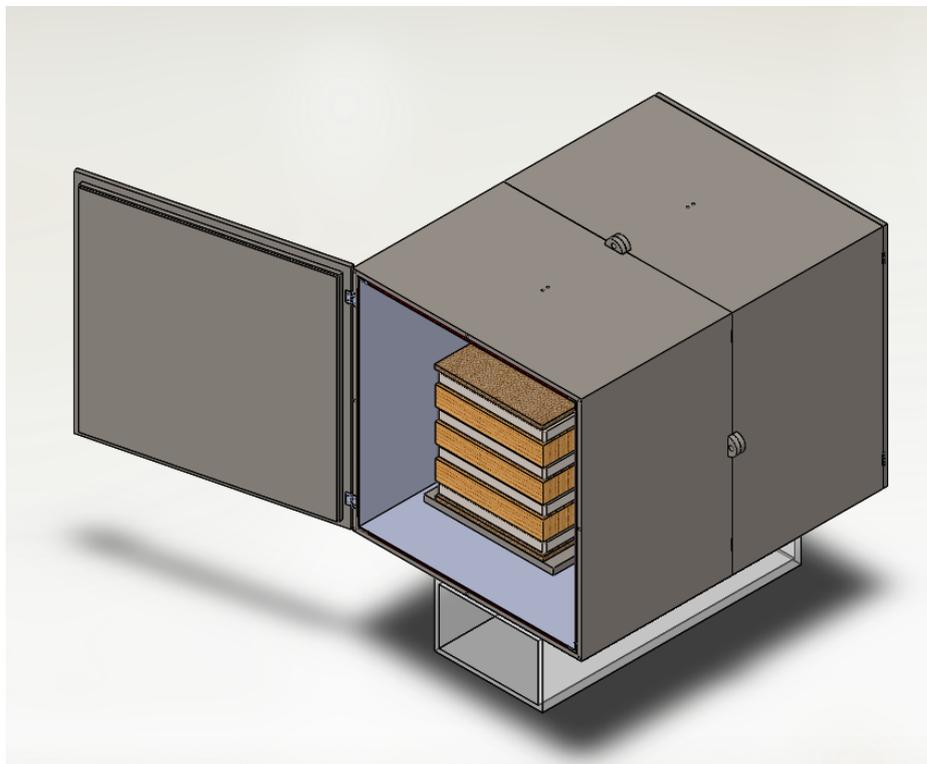


Figura 3.11: Vista isométrica final do reator.

### 3.5 Materiais Necessários

A tabela 3.5 apresenta uma listagem de materiais necessários para a construção do reator, junto aos seus respectivos modelos e características.

Tabela 3.5: Listagem de materiais necessários para confecção do reator de torrefação.

Componentes	QTDE	Modelo	Observações
Reator de Torrefação	1	Aço SAE 1020	Resiste à $300^{\circ}C$
Suporte para o Reator	4	Aço SAE 1020	Resiste à $300^{\circ}C$
Suporte para Amostras	1	Aço SAE 1020	Resiste à $300^{\circ}C$
Placa de Resistência	4	Sob Encomenda	Aço Inoxidável
Isolante Térmico	1	Lã de Vidro	Rolo de 10m
Termopar	4	MTK-15C	$\pm 1, 1^{\circ}C$
Balança Semi-Analítica	2	BK8000	$\pm 0, 1$ grama
Receptáculo para Balança	1	Acrílico	Retangular
Controlador de Potência	1	TH 6000	10A-80A
Painel de Operação	1	IHM	-
Indicador de Parâmetro	1	TH 2064	4 sinais de entrada
Analizador de $CO_2$	1	PGA	Medição de $CO_2$ em <i>ppm</i>
Analizador de $O_2$	1	PGA	Medição de $O_2$ em <i>ppm</i>
Software de Operação	1	LabVIEW	National Instruments
Computador	1	-	Possuir placa de vídeo
Comunicadores	1	-	USB - USB
Cilindro de $N_2$	1	-	$1m^3$
Silicone Loctite	1	5920 COPPER	Resiste à $350^{\circ}C$
Disjuntor Monopolar	3	Siemens	40 ampères

Selecionou-se equipamentos com modelos mais atualizados, por meio de pesquisa de mercado e disponibilidade de produto. A quantidade é estimada com base no superdimensionamento do projeto e necessidades operacionais.

A escolha do aço carbono SAE 1020 para compor a estrutura do reator e do suporte se dá pela boa relação custo benefício entre aços que possuem alta soldabilidade. É composto de ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês. Possui excelente forjabilidade e soldabilidade, é altamente tenaz e apresenta razoável resistência mecânica e baixa usinabilidade. A tabela 3.6 apresenta estas e demais características do material.

Tabela 3.6: Propriedades do Aço Carbono SAE 1020.

Propriedade	Valor
Densidade	$7,87g/m^3$
Limite de Escoamento	350 MPa
Resistência a Tração	420 MPa
Módulo de Elasticidade	205 GPa
Condutividade Térmica	51,9 W/m.K

O termopar MTK-15C se destaca por ser de uso genérico e apresentar baixo custo, sendo muito utilizado para medição de temperatura dos mais diversos processos industriais. Possui excelente resistência à oxidação em altas temperaturas e à corrosão em baixas temperaturas. A figura 3.12 ilustra este modelo de termopar, da fabricante *Minipa*, que será utilizado para o projeto. Seu comprimento de sensor é de, aproximadamente, 105 milímetros, com diâmetro de 3 milímetros. Sua precisão é de  $\pm 1,1^\circ C$ .



Figura 3.12: Termopar Tipo K.

O controlador de potência TH 6000, da *Therma*, permite a passagem de correntes elétricas em níveis controlados, economizando energia nos processos, reduzindo a perda de matéria prima e aumentando a precisão do resultado final. É indicado para controle de circuitos monofásicos, em correntes de até 80 ampères, com controle para cargas resistivas e indutivas. A figura 3.13 ilustra este modelo de controlador que será utilizado no projeto. Ele será instalado ao lado do reator de torrefação e as placas de resistência elétrica estarão interligadas à ele.



Figura 3.13: Controlador de Potência TH 6000.

O painel de operação IHM, da *Therma*, é utilizado como acessório nos controladores de potência. Com alta tecnologia, a interface traz a parametrização do controlador, a visualização de falhas ocorridas e leitura de mais de dez tipos de variáveis. A figura 3.14 ilustra este modelo que deverá ser utilizado.



Figura 3.14: Painel de Operação IHM.

O Indicador TH 2064, da *Therma*, é usado para indicação de temperatura, pressão, corrente, tensão e vazão. Contém quatro sinais de entrada, calibrados de fábrica, com os respectivos campos de leitura. Este aparelho, ilustrado pela figura 3.15, servirá para exibir os valores dos termopares.



Figura 3.15: Indicador TH 2064.

O controle e análise de gases serão realizados por um aparelho específico, como ilustrado pela figura 3.16, da fabricante *ADC*, capaz de monitorar e examinar continuamente os gases do processo de torrefação, presentes dentro do reator, e estabilizar o processo, melhorando a eficiência do tratamento térmico. É um instrumento portátil que opera à bateria. O PGA pode medir até dois gases por meio de infravermelho e células eletromecânicas.



Figura 3.16: Controlador de gases.

O silicone 5920 Copper, da fabricante *Loctite*, é um silicone de alta performance, apresentando-se em forma de pasta, com tempo de cura, à temperatura ambiente, de 24 horas. É indicado para aplicações de até  $350^{\circ}\text{C}$ . Possui baixo coeficiente de expansão térmica e baixo coeficiente de condutividade térmica.

Ao quadro elétrico, deverão ser instalados três disjuntores monopolares, sendo um para o circuito do controlador de potência, um para o PGA e um para a balança semi-analítica.

O labVIEW é um software, criado pela empresa *National Instruments*, que facilita a interação virtual de hardwares, possibilitando a análise de dados e o processamento de sinais de forma mais eficiente. A plataforma utiliza programação gráfica, que torna mais fácil visualizar e compreender cada aspecto de sua aplicação.

## 3.6 COMSOL Multiphysics

O COMSOL *Multiphysics* é uma plataforma de análise de elementos finitos e simulações multifísicas, que permite interfaces de usuário convencional baseadas na física e sistemas acoplados de equações diferenciais parciais. É um software de simples entendimento, compatível com outros softwares como o *SolidWorks* e o MATLAB.

Este programa possui diferentes ferramentas de análises para aplicações elétricas, químicas, térmicas, mecânica dos sólidos e mecânica dos fluidos.

### 3.6.1 Heat Transfer Module

O módulo *Heat Transfer* é um pacote opcional para extensão do ambiente de modelagem do COMSOL, onde possui interfaces de customização física para análises de transferência de calor. Ele auxilia todo mecanismo fundamental, incluindo condução, convecção e radiação de calor.

Para o presente projeto, foi utilizado a interface *Heat Transfer in Solids*, em regime transiente, que inclui um conjunto de recursos capazes de analisar projetos térmicos e efeitos do fluxo de calor entre dois sólidos.

Esta interface utiliza o método BDF (*backward differentiation formula*) para aproximação das derivadas temporais. É um método implícito para integração numérica de equações diferenciais, operando pelo multi-passo linear, onde dado uma função no tempo, aproxima a derivada utilizando interações anteriormente computadas, aumentando assim sua precisão.

O *Heat Transfer in Solids* foi aplicado para estudo do mecanismo de condução de calor do corpo de prova do reator de torrefação. Entretanto, esta interface desconsidera qualquer processo de vaporização durante a análise de condução térmica. O recurso utiliza a lei de Fourier, onde os estágios para o fluxo de condução de calor,  $q_i$ , é proporcional ao gradiente de temperatura, conforme a equação 3.1.

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.1)$$

onde  $k$  é o coeficiente de condutividade térmica, em  $W/m \cdot K$ . Entre sólidos, o  $k$  pode ser considerado anisotrópico, tornando-se um tensor, representado pela matriz

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

com isso, o fluxo de calor por condução é dado pela equação 3.2.

$$q_i = - \sum k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

As etapas da simulação numérica dos processos de transferência de calor são destacadas no fluxograma da figura 3.17.

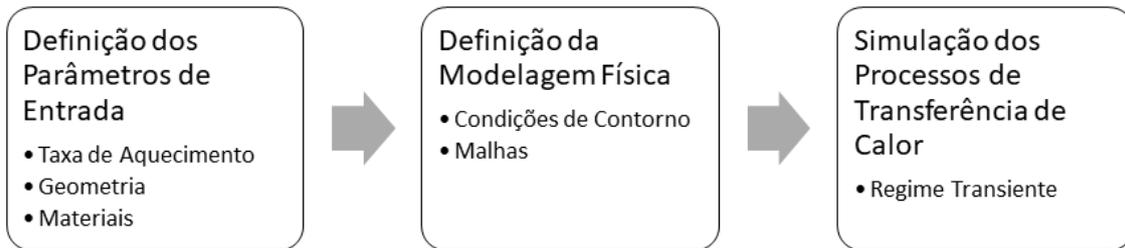


Figura 3.17: Fluxograma das etapas da simulação numérica.

Primeiramente, o software demanda definições de parâmetros de entrada. A taxa de aquecimento da placa de resistência elétrica é definida como uma função global interpolada, extraída de um arquivo de extensão de texto.

A geometria de simulação pode tanto ser importada de outros softwares, quanto ser dimensionada na própria plataforma do COMSOL. Considerando que há equivalência na geometria do corpo de prova, foi dimensionado, na própria plataforma, apenas uma seção em corte, conforme ilustrado na figura 3.18.

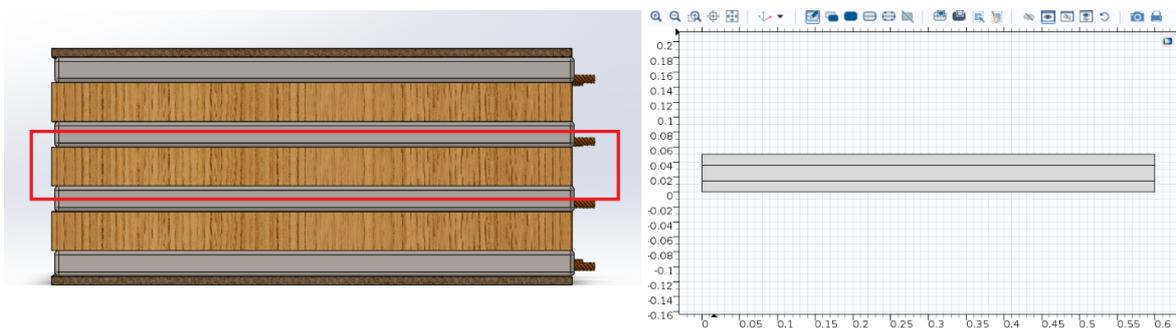


Figura 3.18: Modelo ilustrativo da seção em corte do corpo de prova.

Em seguida, as propriedades dos materiais do foram especificadas, utilizando-se dos parâmetros físicos de cada componente do corpo de prova. A tabela 3.7 apresenta estes dados de entrada necessários para a simulação.

Tabela 3.7: Propriedades dos materiais do corpo de prova.

Propriedades	Amostra de Madeira	Resistência Elétrica
Densidade	$0,59 \text{ g/cm}^3$	$8,00 \text{ g/cm}^3$
Condutividade Térmica	$0,14 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$26,00 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Capacidade Térmica à Pressão Constante	$1.700 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$	$500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Com os parâmetros de entrada definidos, selecionou-se a interface *Heat Transfer in Solids* e introduziu as condições de contorno do sistema em análise. Estabeleceu-se a condição de isolamento térmico nas arestas laterais à amostra de madeira e às resistências, como ilustrado pela imagem à esquerda da figura 3.19. Na aresta de contato entre os elementos do corpo de prova, foi introduzido a função interpolada da taxa de aquecimento como condição de contorno da temperatura, como é ilustrada à direita da imagem 3.19.

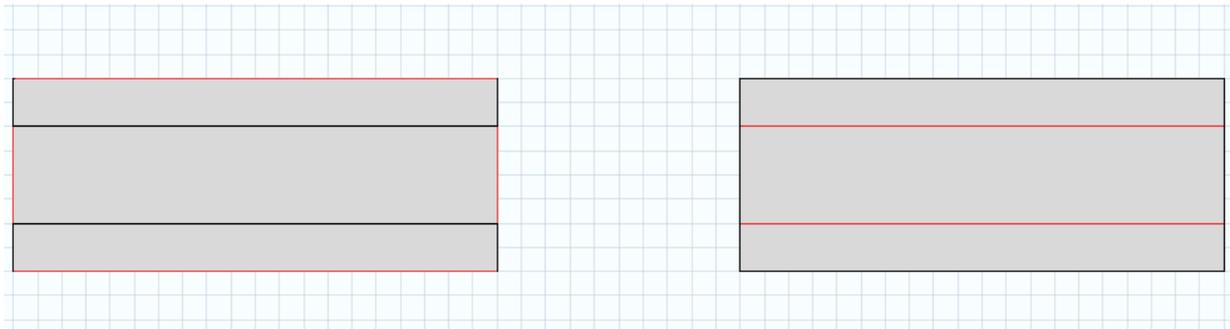


Figura 3.19: Arestas para aplicação das condições de contorno.

Por fim, a malha de análise são elaboradas, conforme a figura 3.20, e a simulação térmica entra em curso.

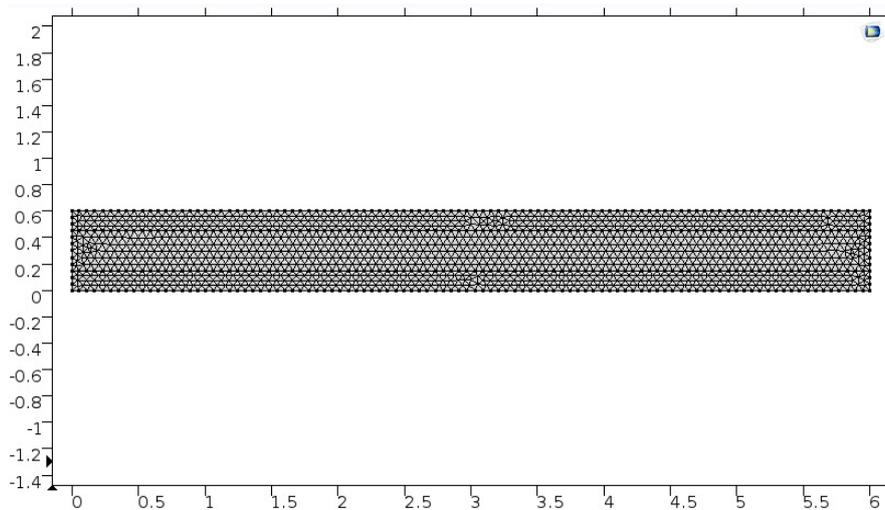


Figura 3.20: Malha para simulação térmica.

## 3.7 Instruções para Possíveis Experimentos

### 3.7.1 Manuseio da Amostra

Primeiramente, deve-se escolher amostras de características e propriedades físicas equivalentes. Ou seja, perfis de madeira da mesma espécie, com idades aproximadas e plantadas em regiões com características climáticas e geográficas semelhantes.

Em seguida, confeccionar três perfis retangulares, de 60x20x2 centímetros, e usiná-los para diminuir suas rugosidades superficiais.

Por fim, as amostras devem ser pesadas para determinar suas densidades. A fim de obter resultados mais precisos, é recomendado utilizar perfis com densidades próximas.

### 3.7.2 Manuseio do Reator

Inicialmente, as balanças de precisão devem ser instaladas dentro de uma caixa de acrílico, cada uma centralizada com os furos de conexão, localizados na superfície inferior do reator. O suporte das amostras necessita estar posicionado sobre as balanças, e estas, posteriormente, serem zeradas, para obter apenas os resultados do corpo de prova.

As placas de resistência e os perfis de madeira devem ser dispostos em cima do suporte, de forma longitudinal ao reator, em formato alternado entre si (*sanduíche*), um em contato com o outro. A Fig. 3.21 ilustra este posicionamento.

Com os termopares posicionados na superfície interna superior do forno, será possível captar, em tempo real, a variação de temperatura do processo. A Fig. 3.22 apresenta este posicionamento.



Figura 3.21: Formato do posicionamento do corpo de prova.

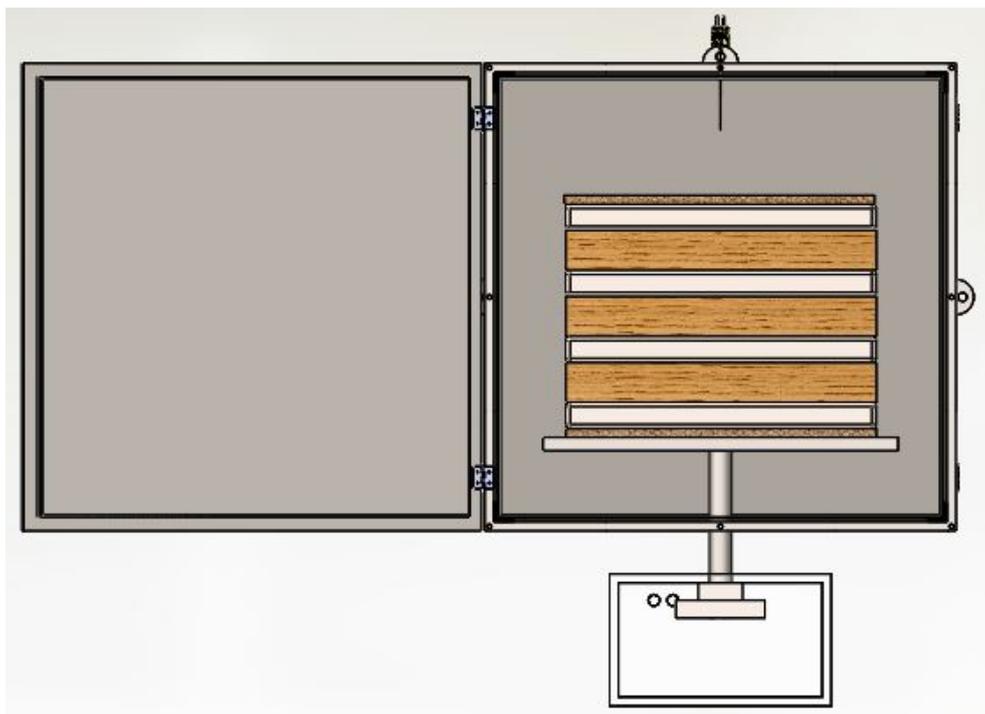


Figura 3.22: Posicionamento do termopar na estufa.

### 3.7.3 Manuseio dos Controladores e Analisadores

As placas de resistência elétrica deverão estar ligadas a um controlador de potência. Com este equipamento, a energia necessária à ser enviada a resistência poderá ser administrada no processo do tratamento térmico. O manuseio será por meio de um controlador de processos, que estará interligado ao controlador de potência. Conectado a este controlador de processos, estarão os termopares instalados no reator.

Vinculado ao controlador de processos necessitará o indicador, que receberá informações à respeito da temperatura captada pelos termopares e exibirá em seu display.

O controle e análise de gases irão ser realizados pelo PGA. Os gases estarão sendo expelidos da estufa por uma abertura na superfície superior e serão transportados por um tubo flexível até o equipamento. Pelo display do PGA, poderá ser realizado as análises dos gases em estudo.

Em um computador, com o software *LabVIEW* instalado, deverá utilizar o programa *Virtual Instruments* específico, desenvolvido para automação do processo para o qual se configura um ensaio.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Condução Térmica

O principal fenômeno físico envolvido neste processo de tratamento térmico por torrefação é a condução térmica, processo onde a amostra de madeira será aquecida conforme a transmissão de calor pelo contato com a placa de resistência elétrica.

A resistência receberá energia elétrica de um controlador de potência e se aquecerá. Este aquecimento provém do efeito Joule, causado pelo choque dos elétrons livres da corrente elétrica contra os átomos do condutor. Quando os átomos recebem essa energia, tendem a vibrar com mais intensidade. Dessa forma, quanto maior for a vibração, maior será a temperatura do condutor elétrico. Assim, a energia elétrica é transformada em energia térmica.

Como descrito na seção 3.3.3, a placa será composta por uma peça retangular de mica onde, ao redor de todo seu corpo, uma fita de níquel-cromo será enrolada. Esta fita servirá como condutor elétrico e por ela será conduzida uma corrente elétrica. A fita irá se aquecer e este calor será transferido à uma camada superficial de aço inoxidável, aquecendo uniformemente toda placa.

Supondo que o aquecimento da placa de resistência elétrica seja de forma homogênea e todo calor é conduzido para superfície da amostra de forma unidirecional, ocasionando uma temperatura por volta de  $300^{\circ}C$ , pôde-se determinar o taxa de calor transmitida em direção ao interior da madeira pela equação 4.1, resultado da equação 3.1.

$$Q_{1D} = -k_m \times A_c \times \nabla T \quad (4.1)$$

onde  $k_m$  é o coeficiente de condutividade térmica da madeira e  $A_c$  é a área de seção transversal do fluxo de calor. Obteve-se o resultado em torno de 400 Watts. Este resultado foi fundamentado considerando apenas a resistência térmica da madeira, desprezando a resistência de contato entre os dois corpos.

A partir deste valor, foi possível selecionar, por meio de contato com fabricantes, placas de resistência elétrica que possam transmitir uma potência de 1200 Watts, atendendo a necessidade

do fluxo de calor por condução.

Com relação aos perfis de temperatura, foram realizadas as simulações numéricas dos fenômenos físicos do corpo de prova através do software *COMSOL Multiphysics*. De forma a verificar a homogeneidade do aquecimento do corpo de prova, diferentes taxas de aquecimento foram administradas, sendo elas de  $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,  $1,0^\circ\text{C}/\text{min}$ ,  $2,0^\circ\text{C}/\text{min}$  e  $3,0^\circ\text{C}/\text{min}$ , partindo da temperatura ambiente, assumindo  $27^\circ\text{C}$ , até alcançar na superfície os  $300^\circ\text{C}$ , temperatura máxima do tratamento térmico de torrefação. Considerou-se constante a condutividade térmica do material. Foram desconsideradas as alterações de densidade.

Os resultados dos perfis de temperaturas estão ilustradas pelas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. A tabela 4.1 apresenta os valores dos principais parâmetros de análise, obtidos por estas simulações. Por meio deste, foi realizado a análise dos dados.

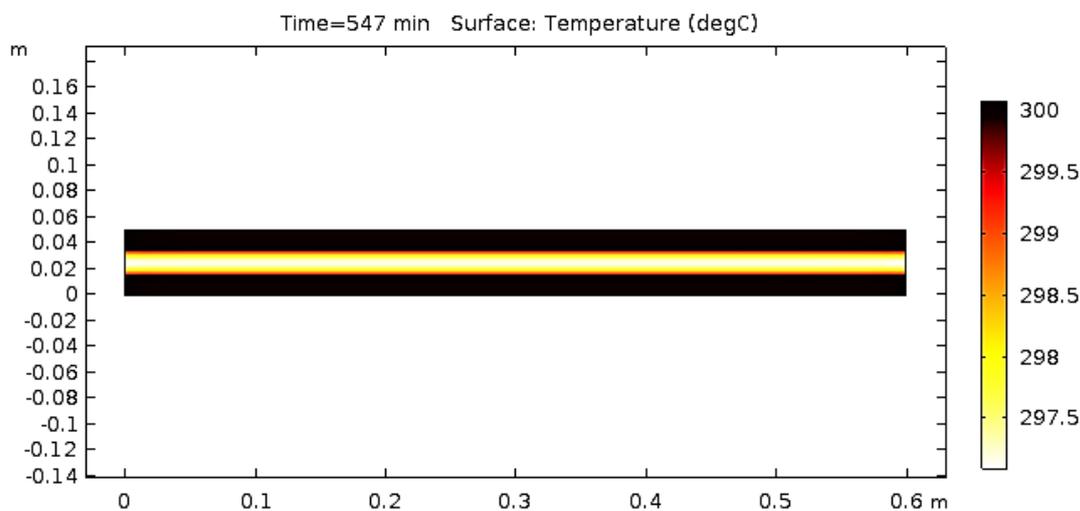


Figura 4.1: Resultado à  $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$ .

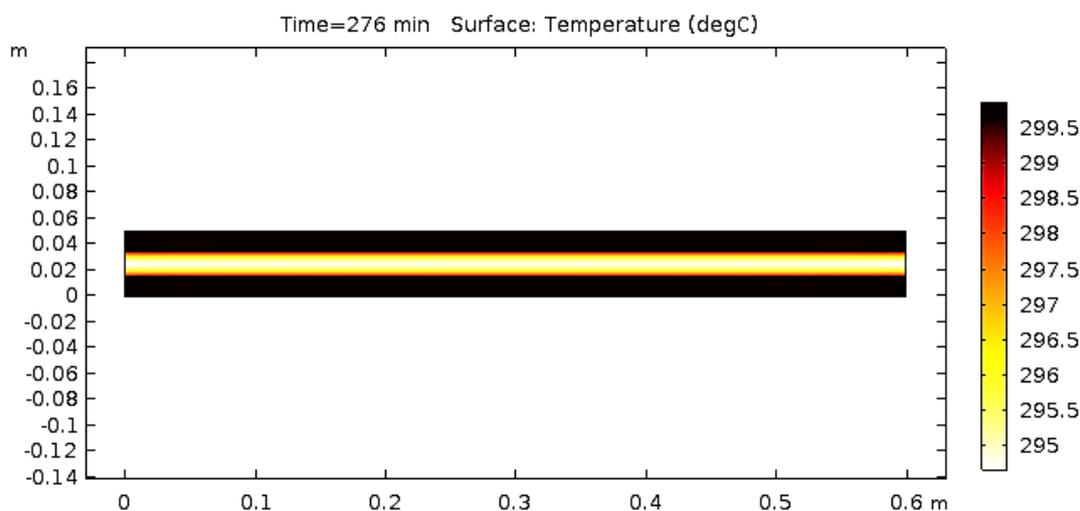


Figura 4.2: Resultado à  $1,0^\circ\text{C}/\text{min}$ .

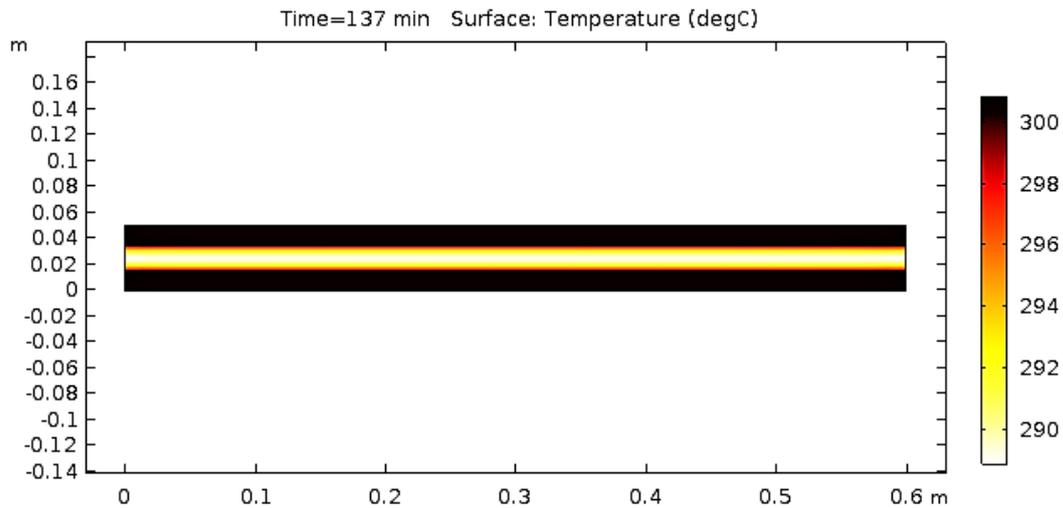


Figura 4.3: Resultado à 2, 0°C/min.

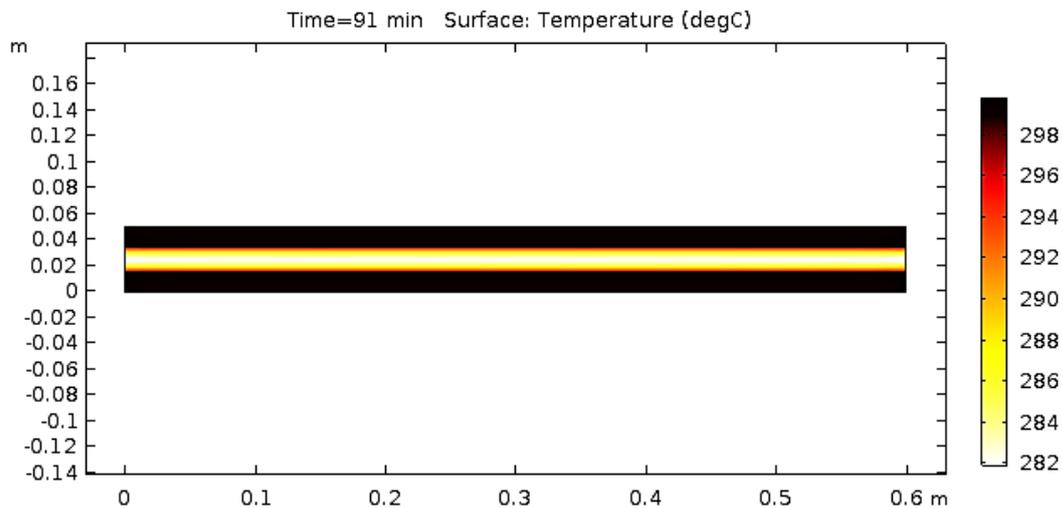


Figura 4.4: Resultado à 3, 0°C/min.

O tempo de simulação, apresentado pela tabela 4.1, é o tempo que a superfície da madeira necessita para atingir a temperatura máxima do tratamento térmico, 300°C. É possível observar que esse tempo é inversamente proporcional à taxa de aquecimento. Ou seja, como a madeira

Tabela 4.1: Resultados da simulação numérica à diferentes taxas de aquecimento.

Taxa de Aquecimento	Tempo de Simulação	Temp. no Centro da Amostra
0, 5°C/min	547 min	297, 0°C
1, 0°C/min	276 min	294, 7°C
2, 0°C/min	137 min	288, 9°C
3, 0°C/min	91 min	281, 9°C

possui baixa difusividade térmica, a superfície, por estar em contato com a resistência elétrica, atingirá a temperatura máxima mais rapidamente que o centro da amostra.

As figuras 4.5 e 4.6 ilustram análises aproximadas dos perfis de temperatura ao longo da espessura da amostra, no final do tratamento térmico.

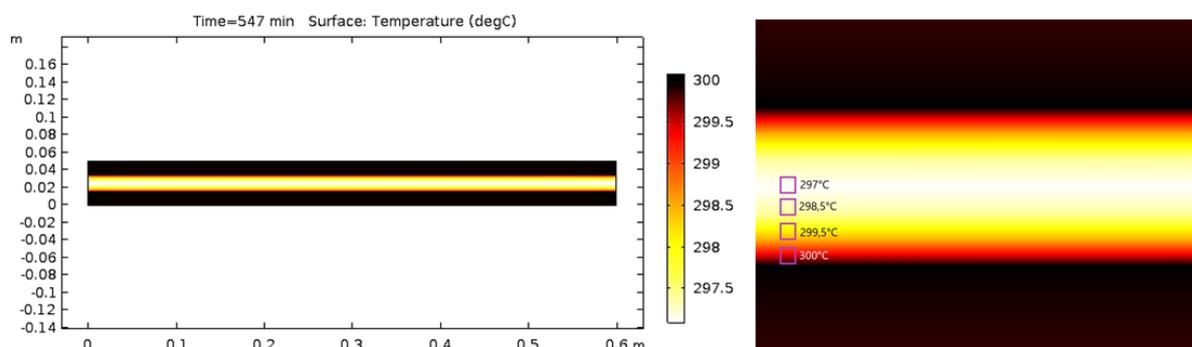


Figura 4.5: Análise aproximada do perfil de temperatura para  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

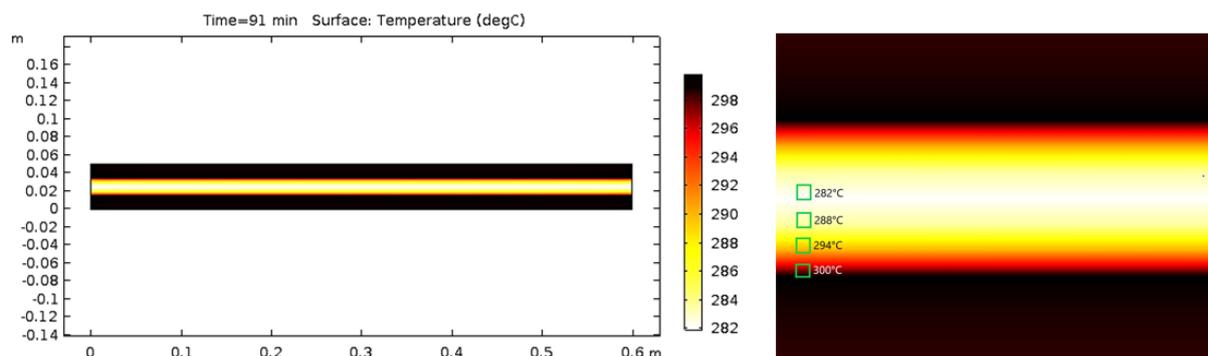


Figura 4.6: Análise aproximada do perfil de temperatura para  $3,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Analisando estes resultados, percebe-se que quanto menor a taxa de aquecimento do tratamento, maior a temperatura no centro da amostra. A imagem 4.7 apresenta um gráfico para esta interpretação.

A explicação numérica para este resultado é a variação de energia durante um período de tempo. Devido a madeira apresentar elevada inércia térmica, se programar um tratamento com um menor tempo de propagação de calor, apresentado por meio das altas taxas de aquecimento, serão obtidos maiores variações de temperatura entre a superfície e o centro.

Experimentalmente, em conjunto com a inércia térmica, deve-se levar em conta a variação da condutividade térmica ao longo do tempo de tratamento térmico, para determinada taxa de aquecimento. O que não ocorre na simulação numérica, onde a condutividade foi definida como constante.

A madeira é pouca condutora de calor. A causa disso é a falta de elétrons livres e o tipo da estrutura porosa do material. Sua condutividade varia com sua densidade, teor de umidade, teor

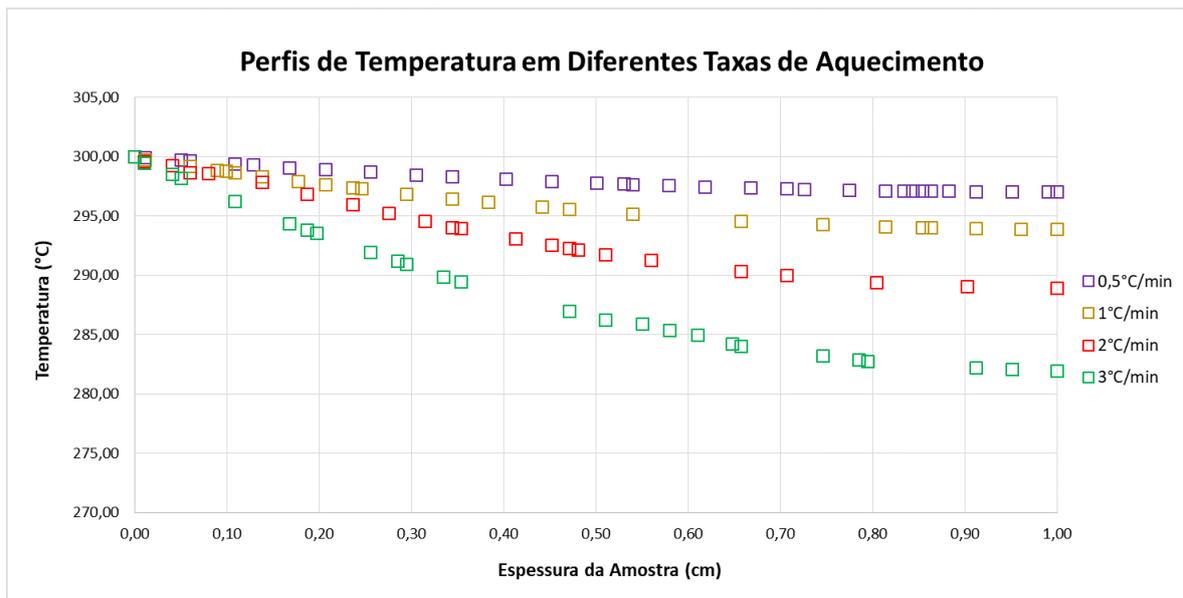


Figura 4.7: Perfis de temperatura à diferentes taxas de aquecimento.

de extrativos e direção das fibras.

Nogueira e Lahr (1990) [113] avaliaram a condutividade térmica de três espécies de eucalipto utilizando o método do Fio Quente. Eles separaram quatorze amostras de cada espécie, com diferentes densidades e três teores de umidade, sendo 30%, 20% e 12%. Os resultados revelaram a influência crescente e direta da densidade e do teor de umidade na condutividade térmica.

Desta forma, pode-se afirmar que quanto maior for a taxa de aquecimento, mais rápido será a perda de massa e teor de umidade da amostra. E quanto menor for o valor destes dois parâmetros, menor será a condutividade térmica do material, resultando em um menor coeficiente de difusão térmica, ocasionando, por fim, em uma menor temperatura no centro da amostra.

A fim de avaliar o tempo que a amostra leva para alcançar à temperatura de centro próxima a temperatura de superfície, foram realizados novas simulações numéricas, para cada taxa de aquecimento, mantendo a temperatura na superfície constante à  $300^{\circ}\text{C}$ . As figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 ilustram os resultados obtidos, utilizando o COMSOL. A tabela 4.2 apresenta os resultados alcançados das simulações e seus intervalos de duração até atingir o objetivo desejado.

Tabela 4.2: Resultados do intervalo de tempo que o centro da amostra leva para atingir temperaturas próximas à temperatura da superfície.

Taxa de Aquecimento	Tempo de Simulação	Intervalo de Tempo
$0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$580 \text{ min}$	$33 \text{ min}$
$1,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$306 \text{ min}$	$30 \text{ min}$
$2,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$171 \text{ min}$	$34 \text{ min}$
$3,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$127 \text{ min}$	$36 \text{ min}$

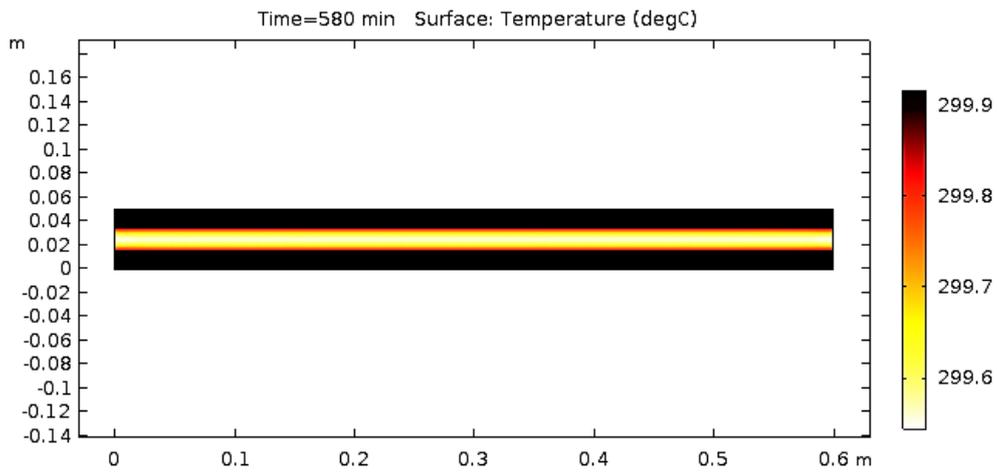


Figura 4.8: Simulação à  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

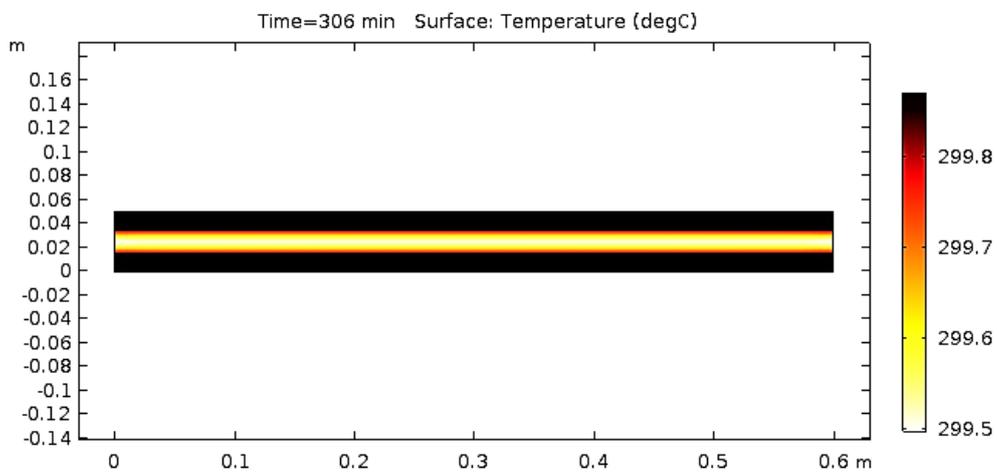


Figura 4.9: Simulação à  $1,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

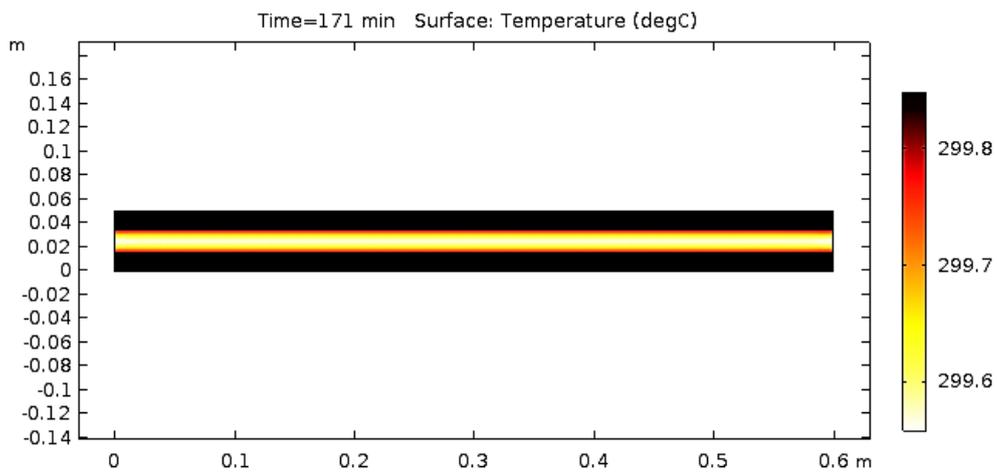


Figura 4.10: Simulação à  $2,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

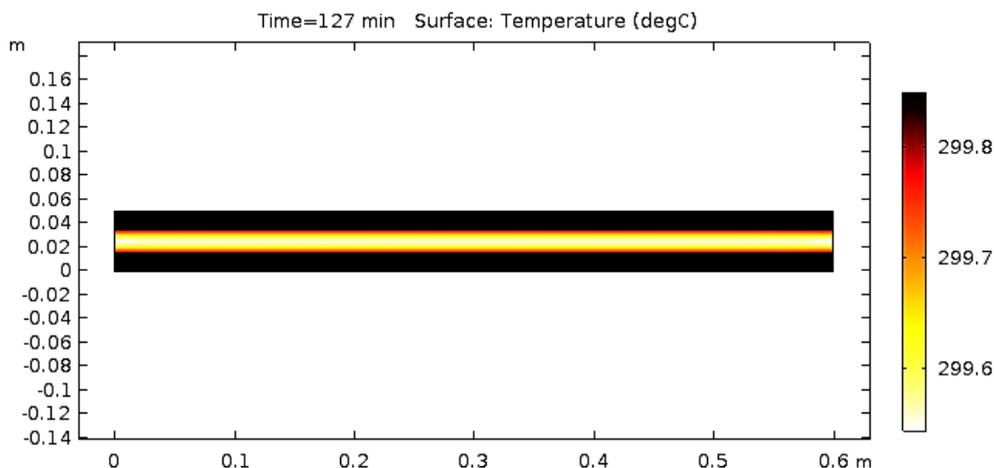


Figura 4.11: Simulação à  $3,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

As variações de tempo apresentadas pela tabela 4.2 foram obtidas por meio da diferença de valores com os retratados pela tabela 4.1.

Analisando a tabela 4.2, pôde-se verificar intervalos de tempo próximos, porém progressivos, entre as taxas de aquecimento. A justificativa numérica, anteriormente abordada, também se aplica a esta ocasião. À  $1,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$  houve uma imprecisão dos resultados, possivelmente causado pela falha na leitura das condições de contorno aplicadas ao software.

As simulações apresentadas foram elaboradas considerando que todas as resistências elétricas irão transmitir o mesmo fluxo de calor pelo contato entre as superfícies. Na prática, por meio da montagem descrita pela figura 3.21, este princípio pode não acontecer, visto que, em ambas as extremidades do sanduíche, encontram-se uma camada de lã de vidro. Este material impossibilitaria que haja transferência de calor em uma das direções, aumentando relativamente o fluxo para o outro sentido. Isto causaria um superaquecimento das superfícies da amostra que estariam em contato com estas placas, promovendo um perfil irregular de temperatura ao longo de sua espessura, ocasionando, por fim, uma grande imprecisão nos resultados experimentais.

Há duas soluções para solucionar esta adversidade. A primeira seria acrescentar, nas extremidades do corpo de prova, entre a placa e o isolante térmico, uma fina espessura de madeira, sacrificando-as para promover o fluxo de calor em ambas as direções. Após a realização do experimento, estas amostras seriam descartadas. A falha desta hipótese é a interferência destas amostras à captação em tempo real da perda de massa do corpo de prova, visto que suas massas estarão sendo reduzidas mais rapidamente.

A segunda ideia seria administrar as resistências elétricas das extremidades do corpo de prova com um distinto controlador de potência, configurando-os para transmitir uma quantidade menor de energia, equalizando todo processo de transferência de calor. Esta solução é a mais adequada para a prática experimental, porém possui um alto custo.

## 4.2 Radiação

Além da condução térmica, no interior da estufa também ocorrerá a radiação térmica. O fenômeno ocorre a partir da emissão de calor das superfícies laterais do corpo de prova, na forma de raios infravermelhos. Este calor emitido atinge as paredes internas do reator, aquecendo-as.

A taxa do fluxo de radiação entre duas superfícies é descrita pela equação 4.2, dado em Watts por metro quadrado.

$$\dot{q}_r = \nabla \cdot \dot{Q}_r \quad (4.2)$$

onde o calor de radiação,  $\dot{Q}_r$ , é descrito pela equação 4.3, dado em Watts.

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \times \sigma \times A_s \times (T_{s_1}^4 - T_{s_2}^4) \quad (4.3)$$

onde  $A_s$  é a área de superfície de emissão, em  $m^2$ ;  $T_{s_1}$  é a temperatura da superfície da carcaça do reator, em Kelvin; e  $T_{s_2}$  é a temperatura da superfície do corpo de prova, em Kelvin.

Para calcular o fluxo de calor emitido por todo corpo de prova, foram consideradas duas situações. A primeira com relação a emissão de energia ao longo do comprimento, em direção às paredes da estufa. A segunda, a irradiação ao longo da largura, em direção às portas. Para ambos os cenários, assumiu-se que as estruturas são homogêneas e o fator de forma 1, obtendo-se assim, os maiores resultados.

Como as superfícies das placas são revestidas por uma camada de aço inoxidável AISI 430, para todas as situações, consideram-se o valor de emissividade de 0,18. Para a biomassa, consideram-se a emissividade de 0,90. A temperatura da superfície do corpo de prova declarou-se como sendo a máxima temperatura do tratamento térmico,  $300^\circ C$ .

Os resultados da emissão de calor por radiação, utilizando a equação 4.3, estão apresentados na tabela 4.3, onde  $\dot{Q}_p$  é o fluxo total emitido por meio das quatro placas e  $\dot{Q}_m$  o fluxo total das três amostras de madeira. Todos os efeitos de refletividade e transmissividade do sistema foram desconsiderados. Também foi desconsiderado qualquer efeito de radiosidade das paredes e portas da estufa. O fluxo de calor resultante,  $\dot{Q}_R$ , é produto da soma de todos os fluxos transmitidos, para cada circunstância.

De fato, é esperado que a superfície da biomassa transmita mais calor por radiação do que a

Tabela 4.3: Fluxo de calor transmitido do corpo de prova às paredes internas do reator.

Fluxo de Radiação	Ao longo do Comprimento	Ao longo da Largura
$\dot{Q}_p$	27,90 W	9,30 W
$\dot{Q}_m$	183,60 W	61,20 W
$\dot{Q}_R$	211,50 W	70,50 W

superfície da placa de resistência, visto que a emissividade dela é cinco vezes maior que do aço inoxidável, além de sua espessura ser o dobro.

A madeira *in natura* é um material com grande poder de absorção e emissão de energia, apresentando baixos índices de transmissividade e desconsiderável refletividade. Por este motivo, sua emissividade é alta, próxima de um corpo negro.

Já o aço inoxidável exibe grande poder refletivo, sendo este inversamente proporcional ao ângulo de radiação incidente na superfície da chapa. Assim, o torna um material com baixa emissividade, sendo muito utilizado em acabamento superficial interno de fornos por minimizar o fluxo de calor de dentro para fora, diminuindo o consumo de energia.

Para este reator de torrefação, há a hipótese de considerar completar os espaços vazios na região interna com isolamento térmico, como ilustrado na figura 4.12. Isso evitaria a propagação de calor por radiação do corpo de prova às paredes da estufa.

A partir desta condição, pode-se assumir que todo fluxo de calor por radiação é nulo, concentrando a transferência de calor apenas entre as superfícies do corpo de prova.

Em relação ao índice de custo benefício, esta hipótese pode ser desfavorável, tendo em vista que o isolamento térmico interno deverá ser substituído em toda prática experimental por causa da deterioração do material.

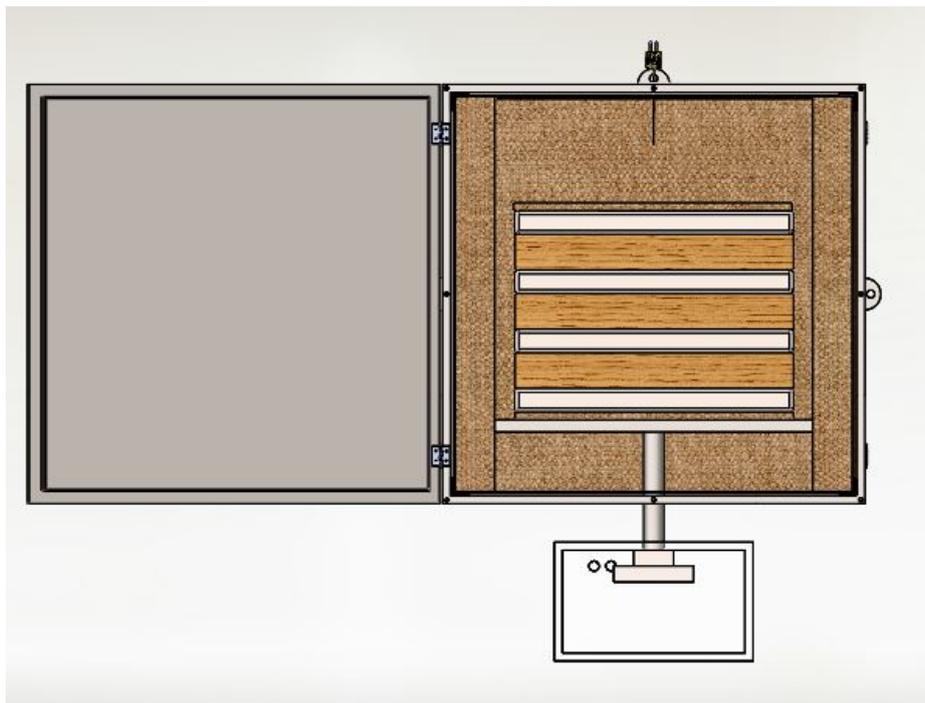


Figura 4.12: Hipótese com isolamento térmico na região interna do reator.

### 4.3 Isolante Térmico

O isolamento térmico deve ser dimensionado de forma a suportar os mecanismos de condutividade térmica que ocorrem entre as estruturas do reator. A máxima temperatura admissível para a superfície externa do forno foi estipulada em  $30^{\circ}C$ , para que seu manuseio se torne seguro, evitando eventuais acidentes.

Para determinar sua espessura, foi estimado que toda taxa do fluxo de calor emitido por radiação pelo corpo de prova é correspondente ao calor transferido por condução entre as paredes do reator. As estruturas foram tratadas como homogêneas e todo fenômeno de transferência de calor ocorre em regime estacionário. Assumiu-se também que o valor da temperatura da superfície interna do forno é a máxima temperatura do tratamento térmico.

Este superdimensionamento foi elaborado para garantir isolamento térmico em todas as possibilidades de execução experimental do tratamento.

A partir do fluxo resultante de calor por radiação, apresentado pela tabela 4.3, pôde-se determinar a espessura do isolamento térmico pela equação 3.1. Foram utilizadas informações fornecidas por fabricantes à respeito da condutividade térmica do material.

Como previamente citado, o material selecionado foi a lã de vidro. O resultado encontrado para sua espessura foi de 12 milímetros.

Após realizar pesquisas de mercado, foi selecionado a manta de espessura de 15 milímetros, da fabricante *Isover*, por ser um isolante facilmente encontrado em lojas especializadas em construção e acabamento.

## Capítulo 5

# Conclusões

A escolha por um tratamento térmico onde a condução térmica é o principal mecanismo de transferência de calor simplifica o funcionamento do sistema de aquecimento do reator, não implicando na necessidade de instalação de agentes externos como, por exemplo, circuladores de ar, tornando assim um método de aquecimento uniforme por todo corpo de prova. Como o intuito é manter a atmosfera interna inerte ao longo de todo o processo, a diferença de densidade da interação fluido-superfície pode ser desprezada, desconsiderando qualquer fenômeno de convecção.

O dimensionamento realizado através do software *SolidWorks* alcançaram os objetivos propostos. Visando obter um reator leve com fácil manuseio e locomoção, foram adotadas finas espessuras para as paredes da estrutura. Tanto as carcaças quanto as portas usufruem de silicone de alta temperatura em todas as suas arestas, garantindo a estanqueidade do sistema. O uso de dobradiças do tipo invisível auxiliam no manejo das portas, dando abertura de 180°.

Conforme a adequada instalação dos equipamentos, é esperado que o forno propicie correto funcionamento e promova resultados significativos às dadas condições de operação.

De acordo com os resultados teóricos obtidos para a condução térmica e as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes, as placas de resistência elétrica irão fornecer uma potência muito maior que necessária para transmitir energia e torrificar a biomassa. Estudos mais a fundo serão propostos para analisar a viabilidade de negociação com os fabricantes, a fim de obter um modelo que desperdice a menor quantidade de energia possível.

Através das simulações numéricas realizadas no COMSOL *Multiphysics*, pôde-se obter resultados condizentes com as condições operacionais propostas, evidenciando que a condução térmica entre as superfícies das placas e amostras promoveram aquecimentos uniformes, gerando perfis de temperatura estáveis ao longo da espessura da madeira, diferente de experimentos realizados por meio do mecanismo de convecção, ao qual não garante uma uniformidade na transmissão de calor para as amostras e pode causar degradações irregulares.

É notável que quanto maior for a taxa de aquecimento imposta no tratamento térmico, maior será a variação de temperatura entre superfície e centro da amostra. O intervalo de tempo que a amostra necessita para alcançar a homogeneidade de temperatura também está relativamente

proporcional à estas taxas.

Hipóteses para solucionar o problema do fluxo de calor transmitido pelas resistências elétricas das extremidades do corpo de prova foram apresentadas, tendo como melhor escolha utilizar diferentes controladores de potência e configurá-los para propagar uma menor quantidade de energia.

Tendo o intuito de concentrar o fluxo de calor entre o corpo de prova e evitar a propagação da radiação, existe a hipótese de utilizar pedaços de manta de lã de vidro cobrindo toda região interna lateral do reator. Estes pedaços não poderão estar em contato com o corpo de prova, para não alterar a medição em tempo real da perda de massa.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADIB, R. et al. Renewables 2016: global status report. *Paris: REN21 Secretariat*, 2016.
- [2] JR, A. R. Estudo da processabilidade e das propriedades de pvc reforçado com resíduos de pinus. *Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo*, 2005.
- [3] POLLETTI, L. Revitalização biblioteca paulo freire. *Revista Decorar*, 2014.
- [4] ENERGÉTICA, E. de P. Balanço energético nacional 1982–ano base 1981: Relatório síntese. *Rio de Janeiro: EPE*, 1982.
- [5] ARAUJO, S. d. O. *PROPRIEDADES DE MADEIRAS TERMORRETIFICADAS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- [6] ASSOCIATION, I. T. et al. Thermowood handbook. *Helsinki, Finland*, p. 08–04.
- [7] SIDOROVA, E. et al. Oil heat treatment of wood. In: *Proceedings of the 4 meeting of the Nordic Baltic*. [S.l.: s.n.], 2008.
- [8] BERGMAN, P. C. et al. *Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass*. 2005.
- [9] GIRARD, P.; SHAH, N. Developments on torrefied wood an alternative to charcoal, from reur technical series no. 20. *Charcoal Production and Pyrolysis Technologies*, p. 101–114, 1991.
- [10] ARCATE, J. New process for torrefied wood manufacturing. *Bioenergy update*, v. 2, n. 4, 2000.
- [11] PIRES, A. d. A. C. et al. Technological improvement of wood by means of thermochemical treatments for energy and biomaterial purposes (termomad). *CNPq*, p. 13, 2018.
- [12] TÉCNICAS, A.-A. B. de N. Nbr 7190: Projeto de estruturas de madeira. *ABNT*, 1997.
- [13] VERGNET, L. Torrefied wood: characteristics, economics and prospects at the present stage of process development. *Internal report CIRAD*, p. 13, 1987.
- [14] GONÇALEZ, J. C. et al. Características tecnológicas das madeiras de eucalyptus grandis w. hill ex maiden e eucalyptus cloeziana f. muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 329–341, 2006.

- [15] BITTENCOURT, L. P.; OLIVEIRA, G. B. d. A indústria madeireira paranaense nos anos recentes. *Revistas das Faculdades Santa Cruz*, v. 7, n. 01, p. 33–42, 2009.
- [16] ULRICH, R. B. *Roman woodworking*. [S.l.]: Yale University Press, 2007.
- [17] COUTO, L.; FONSECA, E.; MÜLLER, M. O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em minas gerais: Aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais. *Belo Horizonte-MG: CEMIG*, 2000.
- [18] OMACHI, I. H. et al. Produção de biomassa florestal para exportação: o caso da amcel. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 1, p. 29–36, 2004.
- [19] CORTEZ, L.; LORA, E.; GOMEZ, E. Caracterização da biomassa. *Biomassa para energia*, Campinas São Paulo, Brazil, 2008.
- [20] ACHARYA, B.; SULE, I.; DUTTA, A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Springer, v. 2, n. 4, p. 349–369, 2012.
- [21] NOGUEIRA, L.; LORA, E. *Dendrologia: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2003.
- [22] OLIVEIRA, G. C. d. C. C. et al. Avaliação do ciclo da vida da produção de biomassa torrefada para a gaseificação. 2013.
- [23] SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, Directory of Open Access Journals, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.
- [24] MOREIRA, J. M. M. Á. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 31, n. 68, p. 363, 2011.
- [25] RODRIGUES, T. O. Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos. 2009.
- [26] ABREU, Y. et al. Aproveitamento da biomassa florestal: produção de energia verde no brasil. In: *Anais do 48º Congresso SOBER. Campo Grande*. [S.l.: s.n.], 2010.
- [27] ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. *Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005: pages 35-74.*, 2005.
- [28] RENDEIRO, G. *Combustão e gasificação de biomassa sólida*. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.
- [29] KLOCK, U. et al. Química da madeira. *Curitiba: UFPR*, v. 3, 2005.
- [30] PENG, J. et al. Development of torrefaction kinetics for british columbia softwoods. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, De Gruyter, v. 10, n. 1, 2012.
- [31] TUMULURU, J. S. et al. Gc analysis of volatiles and other products from biomass torrefaction process. In: *Advanced Gas Chromatography-Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications*. [S.l.]: InTech, 2012.

- [32] GALVÃO, L. G. O. Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *eucalyptus grandis*. 2018.
- [33] ARIAS, B. et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.
- [34] PORTO, A. L. G. et al. Questões de preservação de bens culturais: A madeira como objeto de estudo. [sn], 2010.
- [35] SHIMOYAMA, V. d. S. *Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em Eucalyptus sp. 1990. 93 f.* Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura . . . , 1990.
- [36] PEREIRA, J. C. D. et al. *Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil*. [S.l.]: Embrapa Florestas Colombo, 2000.
- [37] CUNHA, M. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. *Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira*, v. 3, p. 93–121, 1989.
- [38] MELO, R. R. de; MENEZZI, C. H. S. D. Comportamento reológico da madeira e derivados. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 1, n. 1, p. 10–12953, 2010.
- [39] BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. *Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia*. [S.l.]: IPEF, 1979.
- [40] PFIEL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de madeira*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Livros, 1985.
- [41] COUTO, L. C. et al. Vias de valorização energética da biomassa. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 1, p. 71–92, 2004.
- [42] GESUALDO, F. A. R. *Estruturas de madeira. Uberlândia, UFU*, 2003.
- [43] MANFRINATO, M. E. *Estudo sobre o uso da madeira para fins estruturais e arquitetônicos*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- [44] COUTINHO, J. d. S. *Materiais de construção 1. madeiras. Porto: Universidade do Porto*, 1999.
- [45] NEGRÃO, J.; FARIA, A. *Projecto de estruturas de madeira*. [S.l.]: Publindústria, 2009.
- [46] AGHAYERE, A.; VIGIL, J. *Structural Wood Design-ASD/LRFD*. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- [47] ROSÁRIO, L. Artesanato e indústria - construções em madeira. *Revista Técnica - Revista de Tecnologia da Construção*, p. 22–26, 1996.
- [48] MORIKAWA, D. C. L. et al. Metodos construtivos para edificações utilizando componentes derivados da madeira de reflorestamento. [sn], 2006.
- [49] ABRAF, A. estatístico da. Ano base 2010. *Brasília, DF: ABRAF*, 2011.

- [50] FINATTI, E. M. Casa inteligente: Wood frame. *In: Seminário Uso Sustentável da Madeira*, FEMADE, 2010.
- [51] JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. *Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria*, IPEF/IPT/IUFRO/LCF/ESALQ/USP São Paulo, p. 109–118, 1995.
- [52] ZENID, G. J. et al. Madeira: uso sustentável na construção civil. *São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas*, v. 2, n. 1, p. 1–103, 2009.
- [53] ELDRIDGE, K. et al. *Eucalypt domestication and breeding*. [S.l.]: Clarendon Press, 1993.
- [54] NERI, A. C. Medidas de forças de corte na madeira de eucalipto. [sn], 1998.
- [55] DURAND-CRESSWELL, R.; BOULAY, M.; FRANCLLET, A. Vegetative propagation of eucalyptus. *In: Tissue culture in forestry*. [S.l.]: Springer, 1982. p. 150–181.
- [56] HO, C.-K. et al. Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation of eucalyptus camaldulensis and production of transgenic plants. *Plant Cell Reports*, Springer, v. 17, n. 9, p. 675–680, 1998.
- [57] ELDRIDGE, K. *An annotated bibliography of genetic variation in E. camaldulensis*. [S.l.]: Oxford: Commonwealth Forestry Institute, 1975.
- [58] QUOIRIN, M.; VIEIRA, R. Rhizogenesis and nodule formation from callus of eucalyptus grandis and e-grandis x urophylla. *Arquivos de biologia e tecnologia*, INST TECNOLOGIA PARANA RUA PROF ALGACYR MUNHOZ MAEDER 3775-CIC, 81310-020 . . . , v. 38, n. 3, p. 793–798, 1995.
- [59] ANDRADE, A. *Avaliação de parâmetros que influenciam a transformação genética do Eucalyptus grandis via Agrobacterium*. 2001. 82p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.
- [60] CALORI, J.; FIER, I.; KIKUTI, P. Estudo das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalyptus grandis em diferentes idades. *ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS*, v. 5, 1995.
- [61] ANDRADE, E. d. *O eucalipto*. [S.l.]: São Paulo: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 688p, 1961.
- [62] MENDONZA, I. Experiência chilena em el utilization de eucalipto. *SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA*, IPEF/IPT/IUFRO/LCF/ESALQ-USP Piracicaba, p. 92–108, 1995.
- [63] MANGIERI, H. R.; DIMITRI, M. J. *Los eucaliptos en la silvicultura*. [S.l.], 1961.
- [64] BRITO, J. O. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de eucalyptus grandis, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. *Cerne*, Universidade Federal de Lavras, v. 12, n. 2, 2006.

- [65] COUTO, L.; MULLER, M.; FILHO, A. d. A. T. Florestas plantadas para energia: aspectos técnicos, sócio-econômicos e ambientais. In: *Conferência-Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os próximos vinte anos*. Campinas: UNICAMP. [S.l.: s.n.], 2002.
- [66] CAILLAT, S. et al. Cocombustion de charbon et de biomasse-cas des chaudières industrielles. Editions TI| Techniques de l'Ingénieur, 2010.
- [67] ROGAUME, Y. Production de chaleur à partir du bois: installations industrielles. *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique*, Techniques de l'ingénieur, n. BE8748, 2005.
- [68] DEGLISE, X.; DONNOT, A. Bois énergie. *Techniques de l'ingénieur BE*, v. 8535, p. 1–21, 2004.
- [69] BROUST, F.; GIRARD, P.; STEENE, L. V. D. Biocarburants de seconde génération. *Sonde*, 2008.
- [70] BATIDZIRAI, B. et al. Optimization potential of biomass supply chains with torrefaction technology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Wiley Online Library, v. 8, n. 2, p. 253–282, 2014.
- [71] ZWART, R. W.; BOERRIGTER, H.; DRIFT, A. van der. The impact of biomass pretreatment on the feasibility of overseas biomass conversion to fischer- tropesch products. *Energy & Fuels*, ACS Publications, v. 20, n. 5, p. 2192–2197, 2006.
- [72] STELTE, W. et al. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, Elsevier, v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011.
- [73] MEDIAVILLA, I.; ESTEBAN, L.; FERNÁNDEZ, M. Optimisation of pelletisation conditions for poplar energy crop. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, v. 104, p. 7–15, 2012.
- [74] SVOBODA, K. et al. Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, v. 90, n. 5, p. 629–635, 2009.
- [75] USLU, A.; FAAIJ, A. P.; BERGMAN, P. C. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 1206–1223, 2008.
- [76] PÉREZ-FORTES, M. et al. Optimization of pre-treatment selection for the use of woody waste in co-combustion plants. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, v. 92, n. 8, p. 1539–1562, 2014.
- [77] WEILAND, J.-J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using drift spectroscopy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, Springer, v. 61, n. 3, p. 216–220, 2003.
- [78] LARENSTEIN, J. Durability wood. University of Applied Sciences, p. 69, 2009.
- [79] HOMAN, W. J.; JORISSEN, A. J. Wood modification developments. *Heron*, v. 49, n. 4, p. 360–369, 2004.

- [80] SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of québec wood species heat-treated using thermowood process. *Holz als Roh-und Werkstoff*, Springer, v. 65, n. 4, p. 255–259, 2007.
- [81] YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and environment*, Elsevier, v. 41, n. 12, p. 1762–1766, 2006.
- [82] ROUSSET, P. *Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température: de la micro-particule au bois massif*. Tese (Doutorado) — ENGREF (AgroParisTech), 2004.
- [83] SILVA, M. R. d. *Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus taeda*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- [84] PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. Torrefaction of wood: Part 2. analysis of products. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, Elsevier, v. 77, n. 1, p. 35–40, 2005.
- [85] LUENGO, C.; FELFLI, F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação de biomassa. *Biomassa para energia. Cortez, LAB, Lora, EES, Gómez EO (Organizadores). Campinas, SP: Editora da Unicamp*, p. 333–351, 2008.
- [86] MELKIOR, T. et al. Nmr analysis of the transformation of wood constituents by torrefaction. *Fuel*, Elsevier, v. 92, n. 1, p. 271–280, 2012.
- [87] NEVES, D. et al. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 611–630, 2011.
- [88] FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. Torrefação de biomassa: características, aplicações e perspectivas. In: SCIELO BRASIL. *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*. [S.l.], 2000.
- [89] FERRO, D. T. et al. Torrefaction of agricultural and forest residues. *Cubasolar April*, p. 12–16, 2004.
- [90] ROUSSET, P. et al. Characterisation of the torrefaction of beech wood using nirs: Combined effects of temperature and duration. *Biomass and bioenergy*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 1219–1226, 2011.
- [91] PACH, M.; ZANZI, R.; BJÖRNBOM, E. Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal. In: *6th Asia-Pacific International symposium on combustion and energy utilization*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 20.
- [92] BRIDGEMAN, T. et al. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, Elsevier, v. 87, n. 6, p. 844–856, 2008.
- [93] CHEW, J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment–torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011.

- [94] CIOLKOSZ, D.; WALLACE, R. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Wiley Online Library, v. 5, n. 3, p. 317–329, 2011.
- [95] SAADON, S.; UEMURA, Y.; MANSOR, N. Torrefaction in the presence of oxygen and carbon dioxide: the effect on yield of oil palm kernel shell. *Procedia Chemistry*, Elsevier, v. 9, p. 194–201, 2014.
- [96] ROUSSET, P. et al. Change in particle size distribution of torrefied biomass during cold fluidization. *Energy*, Elsevier, v. 51, p. 71–77, 2012.
- [97] STELT, M. Van der et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and bioenergy*, Elsevier, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011.
- [98] PINCELLI, A. L. P. S. M. *Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- [99] NIMLOS, M. N. et al. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer. *Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem*, v. 48, n. 2, p. 590–591, 2003.
- [100] MEDIC, D. et al. Effect of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. *2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20-June 23, 2010*. [S.l.], 2010. p. 1.
- [101] PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 102, n. 2, p. 1246–1253, 2011.
- [102] NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, v. 2014, p. 1–56, 2014.
- [103] BRIDGEMAN, T. et al. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel*, Elsevier, v. 89, n. 12, p. 3911–3918, 2010.
- [104] FELFLI, F. E. F. et al. *Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.
- [105] FELFLI, F. F. *Torrefação de Biomassa. Viabilidade Técnica e Potencial de Mercado*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica-FEM, Universidade . . . , 2003.
- [106] DIROL, D.; GUYONNET, R. The improvement of wood durability by retification process. In: *The international research group on wood preservation \_ Section 4 \_ Report prepared for the 24 Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 1–11.
- [107] GIRODS, P. et al. Low-temperature pyrolysis of wood waste containing urea–formaldehyde resin. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 648–654, 2007.

- [108] JR, J. C.; TORRES, E.; ALVES, C. Análise técnica de sistemas de torrefação para aproveitamento da biomassa na geração de energia. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 6597–6604, 2014.
- [109] SARVARAMINI, A.; GRAVEL, O.; LARACHI, F. Torrefaction of ionic-liquid impregnated lignocellulosic biomass and its comparison to dry torrefaction. *Fuel*, Elsevier, v. 103, p. 814–826, 2013.
- [110] SATPATHY, S. K. et al. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. *Fuel*, Elsevier, v. 124, p. 269–278, 2014.
- [111] BOURGEOIS, J.-P. *Thermocondensed lignocellulose material, and a method and an oven for obtaining it*. [S.l.]: Google Patents, mar. 28 1989. US Patent 4,816,572.
- [112] ESELTINE, D. et al. Torrefaction of woody biomass (juniper and mesquite) using inert and non-inert gases. *Fuel*, Elsevier, v. 113, p. 379–388, 2013.
- [113] NOGUEIRA, M. C. J. A.; LAHR, F. A. R. Condutividade térmica da madeira de eucalipto. *ANTAC*, p. 5, 1990.

# ANEXOS