

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Desenvolvimento de reator multifuncional para processos termoquímicos de conversão energética da biomassa

Autor: Normando Perazzo Barbosa Souto
Orientador: Dr Edgar Amaral Silveira
Coorientador: Dr Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF
2022



Normando Perazzo Barbosa Souto

Desenvolvimento de reator multifuncional para processos termoquímicos de conversão energética da biomassa

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr Edgar Amaral Silveira

Coorientador: Dr Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2022

Normando Perazzo Barbosa Souto

Desenvolvimento de reator multifuncional para processos termoquímicos de conversão energética da biomassa/ Normando Perazzo Barbosa Souto. – Brasília, DF, 2022-

95 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr Edgar Amaral Silveira

Coorientador: Dr Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Reator. 2. Torrefação. 3. Biomassa. 4. Modelagem térmica. I. Dr Edgar Amaral Silveira. II. Dr Fábio Cordeiro de Lisboa. III. Universidade de Brasília. IV. Faculdade UnB Gama. V. Desenvolvimento de reator multifuncional para processos termoquímicos de conversão energética da biomassa

CDU 02:141:005.6

Normando Perazzo Barbosa Souto

Desenvolvimento de reator multifuncional para processos termoquímicos de conversão energética da biomassa

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 06 de maio de 2022:

Dr Edgar Amaral Silveira
Orientador

Dr Fábio Cordeiro de Lisboa
Coorientador

Me Luiz Gustavo Oliveira Galvão
Convidado Externo

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Andrea e Dinarth, por me apoiarem ao longo de todo o percurso da graduação, inclusive em partes do desenvolvimento deste trabalho. Assim como agradeço aos meus irmãos.

Aos meus orientadores, Edgar e Fábio, por me darem as condições de atuar no projeto. Assim como ao Aldegundes e ao Gabriell, que atuaram em conjunto comigo no desenvolvimento do reator.

À equipe da área de Energia da Biomassa do LPF, Gustavo, Bruno, Lucélia e Greg, pelas oportunidades, pela confiança e pelos ensinamentos.

Agradeço também o suporte dos meus amigos da Energia, Rebeka, Mateus, Hebert e Mariana, referências no curso e que estiveram comigo em diversos momentos. Assim como o suporte dos meus amigos do LSHS, em especial ao Lucas, que me auxiliou na construção de um dos componente do projeto.

Por fim, agradeço ao Botafogo de Futebol e Regatas, pelo sentimento de pertencimento e por me dar esperanças.

“Temos que ter clareza de que vamos entrar perdendo de zero a zero.”

(João Saldanha)

Resumo

A biomassa representa cerca de 10% da energia elétrica produzida e de 30% da oferta interna de energia no Brasil, e sua demanda vem crescendo mundialmente por se tratar de uma fonte mais limpa e renovável que o petróleo, o gás natural e o carvão mineral. Por conta disso, diversos estudos são realizados para aprimorar os processos de geração de energia da biomassa, visando aumentar o rendimento energético e aproveitar os co-produtos desses processos. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver os sistemas de aquecimento, entrada e saída de gases, acompanhamento da perda de massa e sua respectiva integração a um sistema de controle e automação, necessários para o funcionamento de um reator de bancada, com a finalidade de ser utilizado em pesquisas científicas. A concepção do reator seguiu a linha do desenvolvimento de sistemas modulares, simples, de fácil operação e substituição de peças e incorporação de tecnologias posteriores, o que o torna capaz de realizar diversos tipos de processos térmicos, tendo biomassa como matéria-prima. A modelagem térmica do reator, artifício que permite a caracterização e a realização de análises do comportamento e dos sistemas, foi feita a partir da aquisição de dados de funcionamento do reator com o auxílio do *software COMSOL Multiphysics*. Ensaios de torrefação foram realizados nas temperaturas de 200, 250 e 275 °C, com péletes de eucalipto de 15 g, em atmosfera controlada com concentrações de O₂ de 12, 10 e 5%, a taxas de aquecimento de 6,5 a 9,0 °C · min⁻¹, com o intuito de validar o dispositivos para processos termoquímicos. Os ensaios finais se deram com a aplicação bem sucedida do controle de temperatura, taxa de aquecimento e de concentração de O₂. O produto final foi submetido aos ensaios de rendimento gravimétrico em base úmida e de teor de voláteis, e seus resultados apresentaram coerência na diferença entre os processos realizados a diferentes temperaturas, já que uma tendência de maior degradação foi observada em temperaturas mais elevadas. O modelo térmico foi validado na aplicação de potência máxima de 1500 W, o que permitiu a elaboração de um modelo que considerou o controle de potência.

Palavras-chaves: Reator; Torrefação; Biomassa; Modelagem Térmica.

Abstract

Biomass represents almost 10% of the domestic electric energy supply and 30% of the gross domestic energy supply in Brazil, and its demand keeps growing worldwide, since biomass is a cleaner energy source compared to fossil fuels such as oil, gas and coal. For this reason, many researches are made to improve biomass energy generation technologies, aiming to increase energy efficiency and to employ the byproducts of those processes in new applications. Therefore, the main objective of this study was to develop the central systems of a bench scale reactor: (i) heating and insulation, (ii) gas flow, (iii) weight loss of the samples and (iv) control system for integration. The reactor conception followed a modular approach of development, with easy operation, substitution of components and implementation of new technologies as and when required. A thermal model was constructed with *COMSOL Multiphysics* to analyze and characterize the thermal behavior of the reactor based on acquired data. Torrefaction experiments were performed with samples of eucalyptus pellets up to 15 g at temperatures of 200, 250 and 275 °C, heating rates between 6.5-9.0 °C · min⁻¹ and controlling the reactor's atmosphere at 12, 10 and 5% of O₂ concentrations in order to validate the device's operation as a thermochemical reactor. The final product obtained was submitted to gravimetric yield and volatile content tests, presenting consistent results since higher degradation levels were associated to higher torrefaction temperatures. The thermal model was validated with the application of maximum power load (1500 W), what allowed the conception of a model based on the power controlling of the reactor.

Key-words: Reactor; Torrefaction; Biomass; Thermal Modeling.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento anual do consumo mundial de energia e demanda de energia e emissões de carbono (BP, 2019) - adaptada.	28
Figura 2 – Consumo percentual de energia primária por fonte ao longo do tempo (BP, 2019) - adaptada.	29
Figura 3 – Contribuição do aumento da produção de energia por região e por fonte (BP, 2019) - adaptada.	30
Figura 4 – Consumo final de energia por fonte no Brasil (BRASIL, 2021).	30
Figura 5 – Oferta interna de energia no Brasil (BRASIL, 2021).	31
Figura 6 – Consumo energético no setor industrial brasileiro (BRASIL, 2021).	32
Figura 7 – Projeções do potencial de bioenergia até 2050 (BRASIL, 2019).	32
Figura 8 – Fontes de biomassa (CORTEZ; LORA; CASTAÑEDA-AYARZA, 2008)	33
Figura 9 – Conversão da biomassa em energia útil (HINRICHS; KLEINBACH, 2003) - adaptada.	34
Figura 10 – Estrutura molecular de celulose, hemicelulose e lignina (NAG, 2010 apud SILVEIRA, 2018) - adaptada.	35
Figura 11 – Mecanismo de pirólise da madeira proposto por Soltes (GÓMEZ et al., 2008)	36
Figura 12 – Esquema do reator em escala laboratorial para torrefação com acústica desenvolvido por Silveira (SILVEIRA, 2018) - adaptada.	39
Figura 13 – Diagrama básico DPC (DPC, 2016).	41
Figura 14 – Diagrama básico AIREX (AIREX ENERGY, 2021) - adaptada.	41
Figura 15 – Esquema do dispositivo experimental Tornade (NOCQUET, 2012) - adaptada.	43
Figura 16 – Esquema da termobalança desenvolvida (COLATTO, 2013).	44
Figura 17 – Esquema do macro-TGA experimental (TAGUTCHOU, 2008) - adaptada.	45
Figura 18 – Comparação entre o volume de um briquete e da serragem de mesma massa.	46
Figura 19 – Diagrama do sistema de hidroliquefação (DOAT, 1984) - adaptada.	50
Figura 20 – Esquema do sistema de pirólise sob pressão (HORTA, 2006)	50
Figura 21 – Esquema do reator dividido nas seções: 1) injeção controlada de gás inerte; 2) aquecimento da amostra e medição da perda de massa; 3) saída, medição e condensação de gases.	51
Figura 22 – Detalhe da Seção 2.	51
Figura 23 – Sistemas desenvolvidos no projeto.	54
Figura 24 – Temperaturas na coleira.	55

Figura 25 – Circuito de controle de temperatura (NETO, 2022).	55
Figura 26 – Vista em corte do projeto conceitual para medição da massa.	56
Figura 27 – Estrutura posicionada no reator.	57
Figura 28 – a) Cadinho vazio; b) Cadinho cheio com péletes.	58
Figura 29 – Interface gráfica de integração dos sistemas.	58
Figura 30 – Montagem da estrutura para aproveitamento de calor do reator na entrada de gases.	60
Figura 31 – Amostras preparadas para o ensaio de teor de voláteis.	61
Figura 32 – Imagens do a) reator; b) cadinho com péletes e c) produto torreficado obtido.	62
Figura 33 – Geometria do reator com as diferentes regiões de interesse explicitadas.	63
Figura 34 – Malhas a) fina; b) grossa e c) normal.	64
Figura 35 – Pontos de medição da temperatura.	66
Figura 36 – Aquecimento do reator a uma mesma taxa de aquecimento para dois patamares diferentes.	67
Figura 37 – Comportamento da temperatura por: a) injeção de gás no reator deste trabalho; b) entrada de biomassa no reator do trabalho de (DIREK- TOR et al., 2020).	68
Figura 38 – Concentração controlada de O_2	68
Figura 39 – Frasco lavador com água destilada a) antes de ensaios e b) depois de alguns ensaios.	69
Figura 40 – Temperatura e massa ao longo do tempo para um ensaio de torrefação.	70
Figura 41 – Curvas de massa e perda de massa percentual com diferentes janelas de média móvel.	70
Figura 42 – Curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG).	71
Figura 43 – Temperatura ao longo do Ensaio 1.	71
Figura 44 – Temperatura ao longo do Ensaio 2.	72
Figura 45 – Temperatura ao longo do Ensaio 3.	73
Figura 46 – Péletes obtidos após a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3; d) Ensaio 4; e) Ensaio 5 em comparação com os péletes f) <i>in natura</i>	74
Figura 47 – Temperatura ao longo do Ensaio 4.	74
Figura 48 – Temperatura ao longo do Ensaio 5.	75
Figura 49 – Comparação da temperatura com e sem injeção de gás.	76
Figura 50 – Temperatura ao longo do Ensaio 6.	77
Figura 51 – Temperatura ao longo do Ensaio 7.	77
Figura 52 – Temperatura ao longo do Ensaio 8.	78
Figura 53 – Temperatura ao longo do Ensaio 9.	79
Figura 54 – Péletes obtidos após: a) Ensaio 6; b) Ensaio 7; c) Ensaio 8; d) Ensaio 9; e) Ensaio 10 em comparação com os péletes f) <i>in natura</i>	79

Figura 55 – Temperatura ao longo do Ensaio 10.	80
Figura 56 – Comparação entre as temperaturas nas partes interna e externa do reator.	82
Figura 57 – Campos de temperatura ao longo do reator em diferentes tempos.	83
Figura 58 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.	84
Figura 59 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.	85
Figura 60 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.	85
Figura 61 – Campos de temperatura para os tempos de: a) 45,96 min; b) 47,183 min; c) 48,114 min; e d) 49,330 min.	86
Figura 62 – Valores de temperatura em diferentes pontos para os tempos de: a) 45,96 min; b) 47,183 min; c) 48,114 min; e d) 49,330 min.	86

Lista de tabelas

Tabela 1 – Rendimentos e resultados da análise imediata do eucalipto submetido a diferentes processos.	40
Tabela 2 – Limites de trabalho estipulados para o reator.	53
Tabela 3 – Condutividade térmica para diferentes temperaturas do aço do reator.	65
Tabela 4 – Condutividade térmica dos materiais constituintes da coleira de aquecimento do reator	65
Tabela 5 – Rendimento gravimétrico em base úmida dos Ensaio Finais.	80
Tabela 6 – Teor de materiais voláteis.	81
Tabela 7 – Comparação entre diferentes tamanhos de malha.	83

Lista de abreviaturas e siglas

A.E.C	Antes da Era Comum
cm	Centímetro
g	Gramma
°C	Graus Celsius
h	Hora
K	Kelvin
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
kW	Quilowatt
LEA	Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília
LPF	Laboratório de Produtos Florestais de Serviço Florestal Brasileiro
m_0	Massa inicial
m_f	Massa final
min	Minuto
m	Metro
MV	Teor de materiais voláteis
RG_{bu}	Rendimento gravimétrico em base úmida
tep	Tonelada equivalente de petróleo
V	Volt
Watt	W

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Histórico do uso da biomassa	27
2.2	Visão geral da geração e do consumo de energia	28
2.2.1	No mundo	28
2.2.2	No Brasil	30
2.3	Biomassa	32
2.3.1	Madeira	34
2.4	Tecnologias de conversão termoquímica da madeira	35
2.4.1	Pirólise	36
2.4.2	Carbonização	37
2.4.3	Carbonização sob pressão	37
2.4.4	Torrefação	38
2.4.5	Torrefação com acústica	38
2.5	Parâmetros de controle dos processos termoquímicos	39
2.6	Tecnologias de pirólise	40
2.6.1	Reatores em escala industrial	40
2.6.2	Reatores em escala laboratorial	42
2.7	Outras tecnologias aplicadas à biomassa	45
2.7.1	Densificação	45
2.7.2	Ativação de carvão	47
2.7.2.1	Ativação física	47
2.7.2.2	Ativação química	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Caracterização do reator	49
3.2	Componentes	52
3.2.1	Estado inicial	52
3.2.2	Estado atual	52
3.2.3	Materiais e limites de trabalho	53
3.3	Sistemas	53
3.4	Sistema de Aquecimento	54

3.4.1	Resistência	54
3.4.2	Isolamento térmico	55
3.4.3	Controle	55
3.5	Sistema de Acompanhamento da Perda de Massa	56
3.5.1	Definição do Sistema de Medição	56
3.5.2	Estrutura Construída	57
3.5.3	Cadinho	58
3.5.4	Controle	58
3.6	Sistema de Gases	59
3.6.1	Entrada de gases	59
3.6.2	Saída de gases	59
3.6.3	Controle	60
3.6.4	Ensaio de validação	61
3.7	Modelagem numérica da transferência de calor	62
3.7.1	Condutividade térmica dos materiais do reator	63
3.7.2	Definições da física do modelo	65
3.7.3	Simulações realizadas	66
4	RESULTADOS	67
4.1	Implementação dos Sistemas	67
4.1.1	Sistema de aquecimento	67
4.1.2	Sistema de Gases	68
4.1.3	Sistema de Acompanhamento da Perda de Massa	69
4.2	Resultados experimentais dos sistemas implementados	71
4.2.1	Ensaio de ajuste	71
4.2.1.1	Ensaio 1	71
4.2.1.2	Ensaio 2	72
4.2.1.3	Ensaio 3	73
4.2.2	Ensaio 4	73
4.2.3	Ensaio 5	74
4.2.4	Ensaio finais	76
4.2.4.1	Ensaio 6	76
4.2.4.2	Ensaio 7	77
4.2.4.3	Ensaio 8	78
4.2.4.4	Ensaio 9	78
4.2.4.5	Ensaio 10	79
4.2.5	Síntese dos Ensaio Finais	80
4.3	Resultados do modelo numérico	82
4.3.1	Modelo baseado na potência máxima de aquecimento	82
4.3.2	Modelo baseado na potência controlada	84

5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	87
	REFERÊNCIAS	89

1 Introdução

A pesquisa na área dos processos que envolvem a geração de energia da biomassa e a utilização de seus coprodutos apresenta-se como uma real alternativa para problemas ambientais e econômicos, principalmente com base no crescimento do mercado de energias renováveis. Com isso, há a perspectiva da diminuição da dependência do Brasil em relação aos derivados de petróleo, aproveitando sua vasta fonte de recursos energéticos, o que pode propiciar a autossuficiência energética e o desenvolvimento do país.

Nesse cenário, o Brasil se destaca por seu enorme potencial de utilização de biomassa para a geração de energia, seja ela oriunda da produção agrícola, florestal, industrial ou ainda de resíduos animais e urbanos. Na Nota Técnica PR 04/18 ([BRASIL, 2018](#)) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), são apresentados fatores favoráveis à produção de bioenergia no Brasil, sendo eles principalmente: (i) condições geográficas; (ii) mercado de produção e consumo; (iii) capacidade de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias; e (iv) existência de políticas nacionais sobre a destinação adequada de resíduos. Quanto ao último fator apresentado, dados do mesmo documento mostram que a biomassa residual agrícola representou, em 2014, 18% do consumo final de energia no país, e que a produção dessa matéria-prima deve crescer cerca de 240% até 2050, indicando, assim, um grande avanço no setor.

Com o intuito de explorar as potencialidades desses recursos, é fundamental desenvolver tecnologias que aprimorem seu uso como combustível e permitam um maior entendimento acerca dessas técnicas de aprimoramento. Seguindo a linha do desenvolvimento de sistemas modulares, o trabalho visa a concepção e a construção de um reator de bancada a ser empregado em pesquisas científicas com biomassa. O projeto se baseia em trabalhos semelhantes de implementação de bancadas experimentais, distinguindo-se pela intenção de permitir a associação de diferentes sistemas e diferentes rotas de conversão termoquímica num mesmo reator, facilitando a subsequente incorporação de tecnologias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Reativar e desenvolver os sistemas de um reator laboratorial para pesquisas de processos de conversão termoquímica da biomassa, visando o controle de parâmetros e a aplicação de tecnologias.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer os limites de trabalho do reator;
- Definir os sistemas de aquecimento e fluxo de gases;
- Projetar um sistema de acompanhamento da perda de massa;
- Caracterizar e desenvolver um modelo de transferência de calor para o reator;
- Instalar o reator no Laboratório de Combustão do LEA;
- Realizar ensaios de validação dos processos do reator.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Histórico do uso da biomassa

A biomassa sempre esteve diretamente ligada ao desenvolvimento tecnológico do ser humano, seja a partir de suas aplicações energéticas ou das não energéticas. A combustão do carvão é exemplo de uma de suas aplicações energéticas que se deu principalmente a partir do domínio da madeira associado à descoberta e à utilização do fogo (COLOMBO *et al.*, 2006). Já a utilização do carvão pelo ser humano para outros fins, além do fornecimento de calor, remonta ao período pré-histórico, quando ele era utilizado como pigmento para pinturas rupestres há cerca de trinta mil anos. A descoberta da obtenção de metais a partir do aquecimento de minérios em contato com carvão, o que provavelmente aconteceu de forma acidental, culminou nas Idades do Bronze e do Ferro, por volta de 4.000 A.E.C. Posteriormente, no século IX, o carvão foi utilizado pelos chineses no desenvolvimento de explosivos (SCHWARCZ, 2017).

Outras aplicações tecnológicas do carvão aconteceram também na civilização egípcia com as aplicações médicas em feridas (LEAKE, 1952) e nas civilizações hindu e fenícia para promover alterações no sabor da água (ÇEÇEN, 2011). Tais aplicações estão diretamente relacionadas com o fenômeno da adsorção, que só passou a ser conhecido no século XVIII, quando estudos mostraram que superfícies sólidas porosas, como no caso do carvão, possuem uma alta habilidade de reter fluidos como o vapor d'água (FILHO, 2012).

Já na Idade Moderna, a importância da biomassa se deu principalmente como fonte de aquecimento externo da máquina a vapor, descrita por (ENGELS, 2000), como sendo a primeira invenção verdadeiramente internacional, já que se desenvolveu inicialmente com Denis Papin, na França, em associação com Gottfried Leibniz na Alemanha. Posteriormente, os ingleses Thomas Savery e Thomas Newcomen desenvolveram máquinas mais aprimoradas, e James Watt, também inglês, introduziu o condensador de vapor separado como sistema de resfriamento de forma a reduzir perdas de energia no processo.

No final do século XIX, Rudolf Diesel apresentou um protótipo de motor à combustão interna com óleos vegetais, porém com o estabelecimento de tecnologias de refino do petróleo, suas frações se tornaram o principal combustível para esses motores, sendo os óleos vegetais utilizados esporadicamente por questões emergenciais (SHAY, 1993).

Apesar o domínio do petróleo na atualidade, o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia a partir da biomassa tem crescido significativamente nas últimas décadas por conta dos problemas relacionados à utilização do petróleo, como suas abruptas

variações periódicas de preço, sua eventual escassez e também devido aos problemas ambientais, como emissão de gases do efeito estufa, exploração maléfica ao solo e derramamento no mar (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

2.2 Visão geral da geração e do consumo de energia

2.2.1 No mundo

O 68^o *Statistical Review of World Energy* da *British Petroleum* (BP, 2019) apresenta uma série de dados sobre a demanda, o consumo e a produção de energia primária em escalas globais e regionais.

A partir da Figura 1 e da análise do documento, é possível observar que influências econômicas e ambientais são significativas na variação anual do consumo de energia. Exemplos claros da influência econômica sobre esse fator são a queda observada de 2007 a 2009, decorrente da grave crise financeira internacional ocorrida nesse período e também o vertiginoso crescimento econômico da China, baseado principalmente em setores produtivos que demandam um alto consumo de energia, como a produção de aço e cimento, juntamente à sua disputa comercial com os Estados Unidos. Como exemplo de influências ambientais está o maior número de dias quentes e frios em países centrais no ano de 2018, o que acabou aumentando a demanda por sistemas de calefação e de resfriamento. Apesar dessa variação que se dá em curtos períodos de tempo, a tendência de haver um aumento no consumo global de energia se mantém.

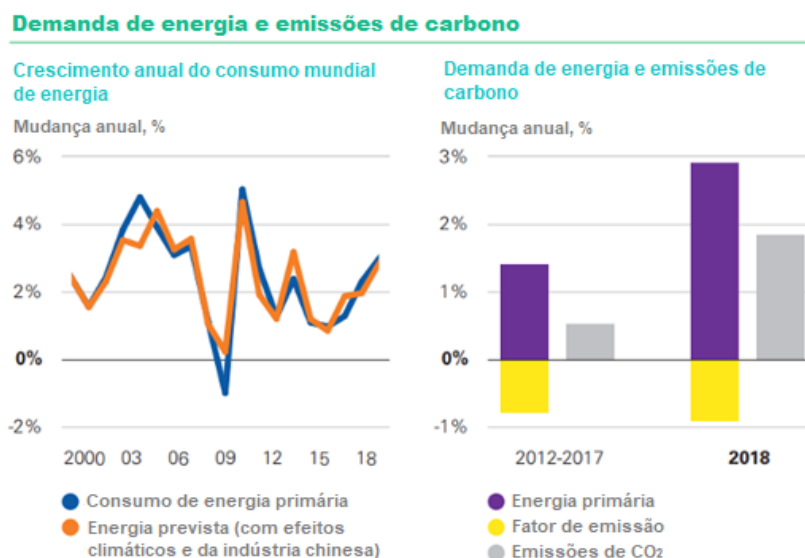


Figura 1 – Crescimento anual do consumo mundial de energia e demanda de energia e emissões de carbono (BP, 2019) - adaptada.

Acompanhando o aumento do consumo de energia em 2018 esteve também o aumento das emissões de carbono, como pode ser observado na Figura 1, sendo esse aumento

de quase 2,0%, o maior nos últimos sete anos. Esse aumento em emissões é um indício da correlação entre as principais fontes de energia no mundo e a poluição ambiental decorrente de seu uso.

Com dados de 1985 até 2018, a Figura 2 mostra o consumo percentual de energia primária por fonte. Apesar de queda percentual em consumo de petróleo quando comparado a outras fontes, ele continua sendo a fonte mais utilizada, representando quase 35% do consumo mundial. Sua produção segue crescendo, principalmente por parte dos Estados Unidos, que em 2018, apresentaram um aumento recorde incrementando sua produção em 2,2 milhões de barris por dia. Quanto às demais fontes, percebe-se que na última década as parcelas hidrelétrica e nuclear se mantiveram quase constantes; o aumento de gás natural compensou a queda do carvão mineral; já a parcela de energias renováveis (eólica, solar e biomassa) apresentou um elevado crescimento.

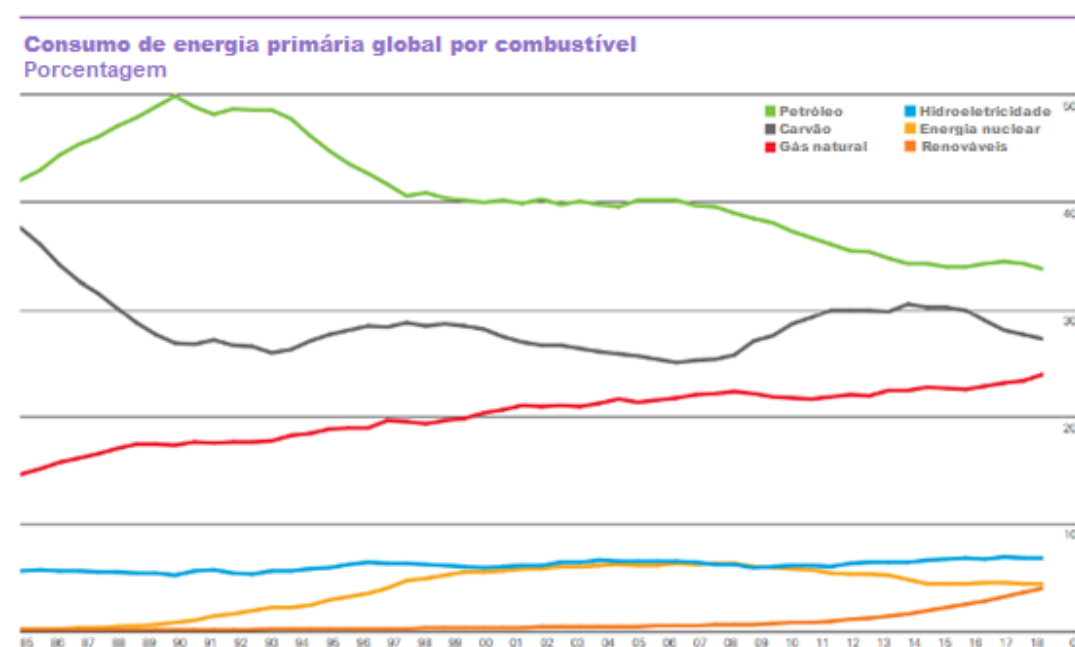


Figura 2 – Consumo percentual de energia primária por fonte ao longo do tempo (BP, 2019) - adaptada.

A contribuição das energias renováveis em escala global pode ser vista no aumento anual da geração de energia, já que mais de 25% de seu crescimento vem de fontes renováveis, como pode ser observado na Figura 3. A Figura 3 também mostra que os principais responsáveis pelo aumento da geração de energia no mundo são a Índia e a China, países em desenvolvimento. Outros dados do *Statistical Review* apresentam a correlação entre esse aumento da produção de energia como um todo e a geração de energias renováveis em países em desenvolvimento, dado que os países que não fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) produzem 41,1% da energia renovável e 41,6% dos biocombustíveis no mundo.

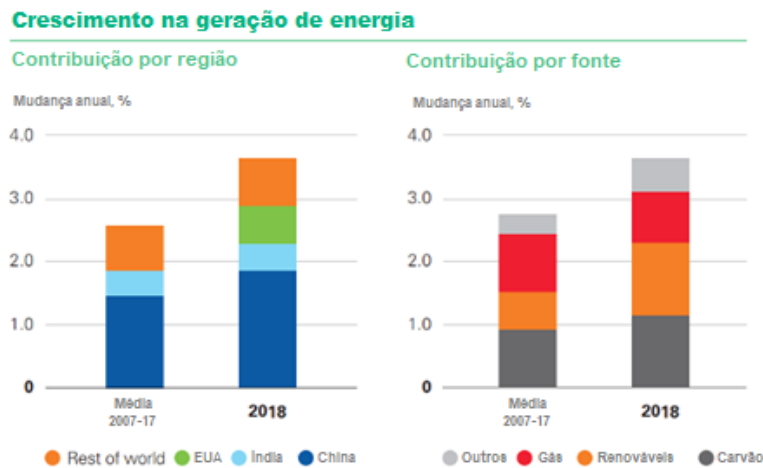


Figura 3 – Contribuição do aumento da produção de energia por região e por fonte (BP, 2019) - adaptada.

2.2.2 No Brasil

O Balanço Energético Nacional 2021 – ano base 2020 – publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2021), reúne dados e informações referentes à oferta e ao consumo de energia no Brasil que permitem um acompanhamento do setor energético brasileiro. Nele também são apresentados dados de séries históricas desse setor.

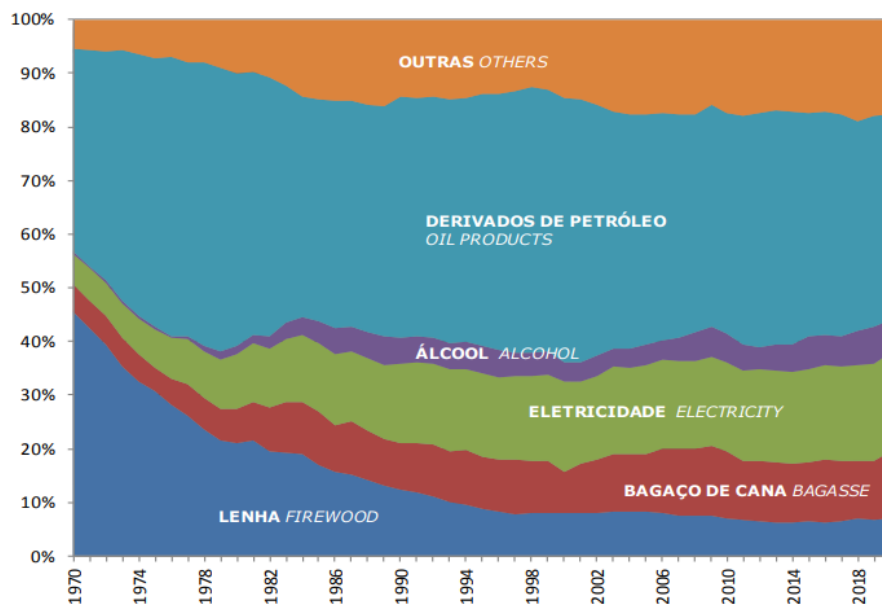


Figura 4 – Consumo final de energia por fonte no Brasil (BRASIL, 2021).

Quanto ao consumo final de energia, apresentado na Figura 4, percebe-se uma semelhança percentual em relação ao consumo energético de petróleo e seus derivados no Brasil e no cenário mundial (Fig. 2). Porém o consumo de fontes renováveis de energia no Brasil se mostra bastante superior ao global, principalmente pela utilização de biomassa,

que representada pela lenha, bagaço de cana e álcool corresponde a cerca de 30% da energia consumida no país. O Balanço também mostra que a produção e o consumo de fontes de energia primárias e secundárias no Brasil está, historicamente, equilibrado.

Como avaliado na Resenha Energética Brasileira (BRASIL, 2019), do Ministério de Minas e Energia, no ano de 2017 houve, pela primeira vez na história, um superávit de energia. Essa diferença positiva de 1,6% se deu pela maior exportação líquida de petróleo (52,2%) ocorrida nesse ano em relação a défices de seus derivados (10,6%), carvão mineral (84,3%), gás natural (28,4%) e eletricidade (5,5%). Ainda segundo a Resenha, a redução da demanda total de energia no país foi determinante para a balança comercial que foi positiva nesse ano.

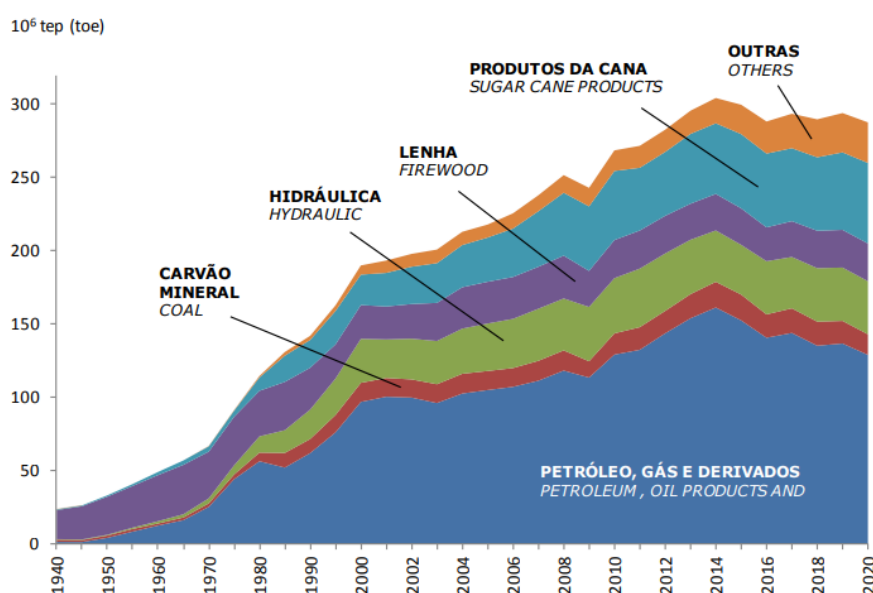


Figura 5 – Oferta interna de energia no Brasil (BRASIL, 2021).

Caso a energia hidrelétrica seja considerada renovável, o Balanço mostra que cerca de 80% da oferta interna de energia elétrica é proveniente de fontes renováveis, principalmente pela estável contribuição da produção de energia elétrica a partir da biomassa e a crescente instalação de usinas eólicas e solares. Sendo assim, pode-se chegar à conclusão que o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável.

Alguns destaques podem ser feitos quanto ao consumo de energia da biomassa por setores produtivos no Brasil. Como pode ser observado na Figura 6, o bagaço de cana e a lenha representam, respectivamente, 22,1 e 8,9% do consumo industrial de energia em 2020, tendo se mantido historicamente em uma margem parecida com a atual. Ainda no setor industrial, o carvão vegetal representa 4,2% desse consumo. No setor energético a utilização percentual do bagaço de cana é ainda maior, sendo esta de 49,3% da energia consumida.

Essa importância do bagaço de cana se dá por sua aplicação nas usinas de açúcar e

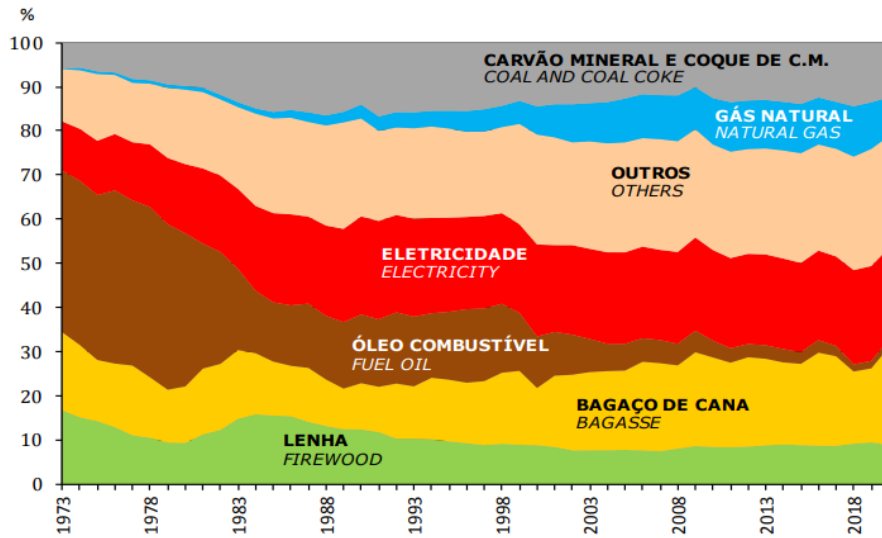


Figura 6 – Consumo energético no setor industrial brasileiro (BRASIL, 2021).

álcool, já que a cogeração de energia elétrica através desse resíduo é uma prática convencional desse ramo industrial em todo o mundo (WALTER; NOGUEIRA, 2008). Como pode ser visualizado na Figura 7, além do já convencional potencial da indústria sucroalcooleira, a projeção indica um alto potencial de outras biomassas residuais, principalmente agrícola e florestal. Como destacado pelo documento, além da vantagem econômica da valorização de resíduos eventuais impactos ambientais seriam diminuídos.

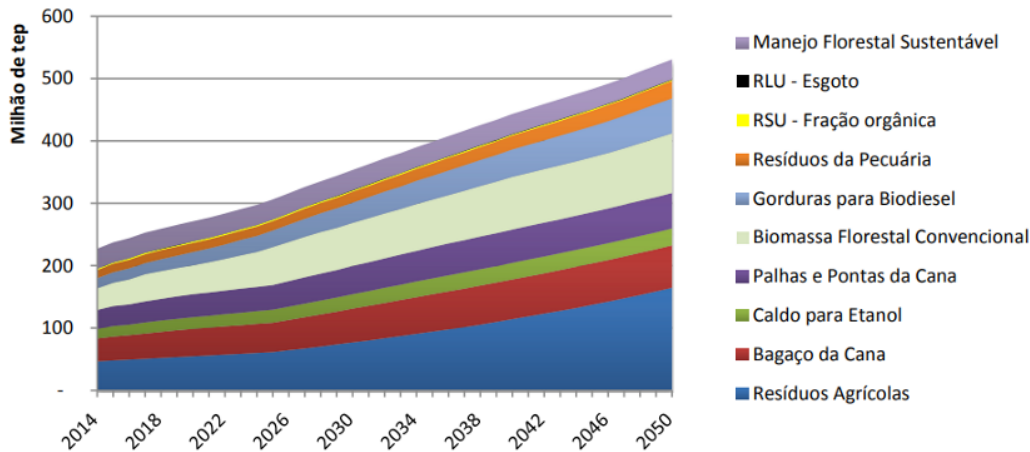


Figura 7 – Projeções do potencial de bioenergia até 2050 (BRASIL, 2019).

2.3 Biomassa

A matéria orgânica formada pelos carboidratos resultantes de reações entre o CO_2 presente no ar, a água e a radiação solar por meio da fotossíntese é chamada de biomassa. A biomassa é considerada uma fonte de energia, uma vez que a energia solar armazenada nas ligações químicas dessa matéria orgânica pode ser liberada em processos de digestão,

combustão e decomposição. O ser humano tem explorado há milênios essa energia contida nas ligações da biomassa tanto na forma de alimentação quanto na sua queima para produção de calor, e mais recentemente começou a explorar a biomassa fossilizada como carvão mineral e petróleo (McKENDRY, 2002).

Muitos são os métodos de conversão da biomassa em energia útil estudados e trabalhados no mundo, logo, podem ser obtidos também os mais variados biocombustíveis, sendo eles líquidos, gasosos e/ou sólidos a partir de diversas fontes. A Figura 8 apresenta alguns desses processos e os respectivos produtos que podem ser obtidos a partir deles.

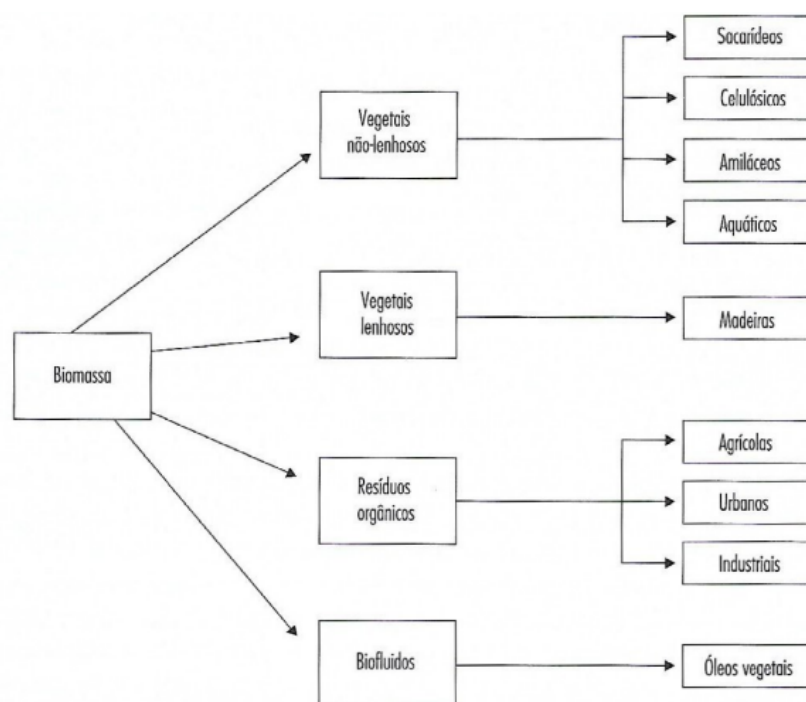


Figura 8 – Fontes de biomassa (CORTEZ; LORA; CASTAÑEDA-AYARZA, 2008)

O biodiesel, por exemplo, é um biocombustível líquido capaz de substituir o diesel em motores à combustão interna obtido pela reação de transesterificação de gorduras vegetais e animais, reação química na qual o glicerol é retirado das moléculas e substituído por um álcool menor (metanol ou etanol), de modo a melhorar suas propriedades combustíveis (ANGARITA et al., 2008). Como forma de conversão biológica, a biodigestão anaeróbica, processo natural realizado por bactérias e que tem como produto o biogás, constitui uma alternativa viável para o aproveitamento de resíduos industriais, agropecuários e de saneamento (BLEY JR., 2014). Já o carvão vegetal, biocombustível sólido que apresenta vantagens tanto em relação à madeira quanto ao carvão mineral, é um exemplo de produto obtido por um processo de conversão térmica, no caso, a pirólise da madeira (FAHMY et al., 2020).

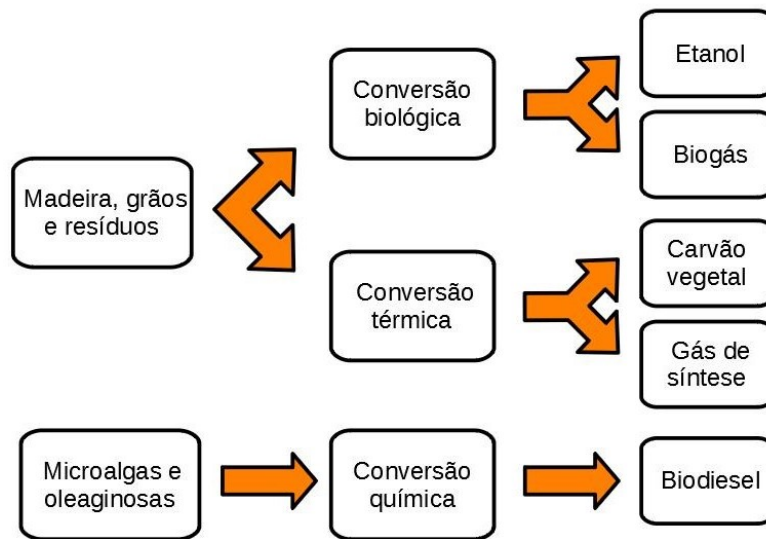


Figura 9 – Conversão da biomassa em energia útil (HINRICHS; KLEINBACH, 2003) - adaptada.

2.3.1 Madeira

Como definido por (ROWELL et al., 2005), a madeira é um biopolímero tridimensional composto majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, ainda contendo certas quantidades de extrativos e matéria inorgânica. Na natureza, a substância química mais presente na madeira é a água, porém em se tratando da madeira seca observa-se que sua composição é predominantemente de carboidratos (celulose e hemicelulose, de 65 a 75%) e de lignina (de 18 a 35%).

Os principais elementos químicos que compõem a madeira são os elementos organógenos. O carbono (*C*) compõe cerca de 50% da massa seca da madeira, sendo o elemento mais abundante seguido do oxigênio (*O*), que representa cerca de 45% da massa. Já o hidrogênio (*H*) e o nitrogênio (*N*) estão presentes em menor quantidade, com aproximadamente 5 e 1% da massa seca, respectivamente. As substâncias minerais presentes na madeira, necessárias para o crescimento das plantas, são compostas principalmente por potássio (*K*) e cálcio (*Ca*), que constituem até 50% dos cátions na cinza da madeira (KLOCK; ANDRADE, 2013).

Esses elementos estruturam os três principais componentes da madeira: (i) celulose, (ii) hemicelulose e (iii) lignina, e essa estrutura pode ser visualizada na Figura 10. Os dois primeiros formam a holocelulose, a qual compõe as paredes das fibras da madeira, enquanto o último tem a função de ligá-las. As proporções desses componentes exercem influência direta sobre as características da madeira. As madeiras duras, por exemplo, possuem de 18 a 25% de lignina, enquanto as moles possuem de 25 a 3% (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

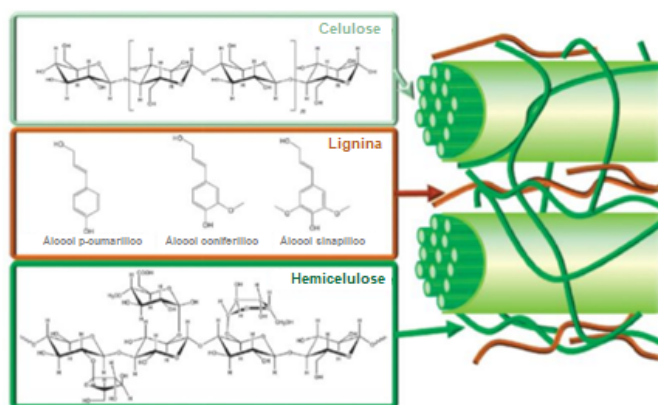


Figura 10 – Estrutura molecular de celulose, hemicelulose e lignina (NAG, 2010 apud SILVEIRA, 2018) - adaptada.

(GONZAGA, 2006) apresenta e caracteriza como principais elementos constituintes da madeira:

- **Celulose:** compoendo quase metade dos tecidos da madeira, é um polímero constituído por centenas de glicoses (açúcares), formando cadeias muito estáveis que unem por ligações hidrogênio. Essas ligações também podem acontecer entre a celulose e as moléculas de água, indicando o ponto de saturação das fibras (PSF), parâmetro importante para a secagem do material;
- **Hemicelulose:** compostas por diversas unidades de diferentes estruturas, os açúcares neutros pentoses e hexoses, possuem baixa polimerização e, conseqüentemente, cadeias mais curtas que as de celulose. Além disso, não produzem fibras e não possuem regiões cristalinas;
- **Lignina:** de diferente estrutura em relação à holocelulose, é um composto fenólico (aromático) de alta densidade que exerce função de adesivo entre os tecidos da madeira, conferindo-lhes dureza e resistência;
- **Extrativos:** substâncias presentes na madeira, que podem ser extraídas desta, que preenchem espaços entre os tecidos. Quando a radiação solar evapora os óleos essenciais extrativos, pode acarretar no colapso da madeira.

2.4 Tecnologias de conversão termoquímica da madeira

Algumas características da madeira influenciam seu processamento como fonte de energia. O teor de umidade, o poder calorífico, os teores de carbono fixo, de voláteis e de cinzas são exemplos dessas características. Logo, processos de conversão são aplicados de

forma a aprimorar as propriedades energéticas da biomassa, reduzindo custos operacionais subsequentes (McKENDRY, 2002).

2.4.1 Pirólise

A pirólise é um processo de degradação termoquímica no qual uma substância ou material é aquecido em atmosfera não-oxidante. Quando esse material é a biomassa lignocelulósica, observa-se a formação de uma fração sólida rica em carbono, uma fração líquida complexa de vapores condensáveis e uma fração gasosa que também pode ser combustível (LORA et al., 2012; LUENGO et al., 2008).

A complexidade dos processos pirolíticos no caso da biomassa lignocelulósica se dá, principalmente, por se tratar da decomposição de misturas de compostos orgânicos, uma vez que cada um deles se degrada de uma forma particular. Sendo assim, os produtos são resultados de reações paralelas e ainda de reações secundárias entre os produtos. Por essa alta complexidade, que dependem tanto de aspectos de transformação de massa e energia e dos fenômenos de transferência associados a eles quanto das condições da própria matéria-prima, entender o mecanismo e a cinética das reações de pirólise permite relacionar os rendimentos e a eficiência do processo de conversão (GÓMEZ et al., 2008).

O esquema do mecanismo de pirólise da madeira proposto por Soltes (1983) é apresentado na Figura 11. Nele são apresentadas tanto as reações primárias (principais) e secundárias (associação e dissociação) do processo. A formação das frações sólida (carvão vegetal), gasosa (CO , CO_2 , CH_4 e H_2) e líquida (ácido acético, metanol e alcatrão) acontece já pelas reações primárias com a degradação do material precursor. Quanto aos radicais livres e hidrocarbonetos saturados e insaturados de menor peso molecular liberados no processo, estes reagem entre si e pelo craqueamento são formados gases e líquidos de baixo peso molecular, enquanto pela polimerização formam-se alcatrões primário e secundário, piche e ainda carvão (GÓMEZ et al., 2008).

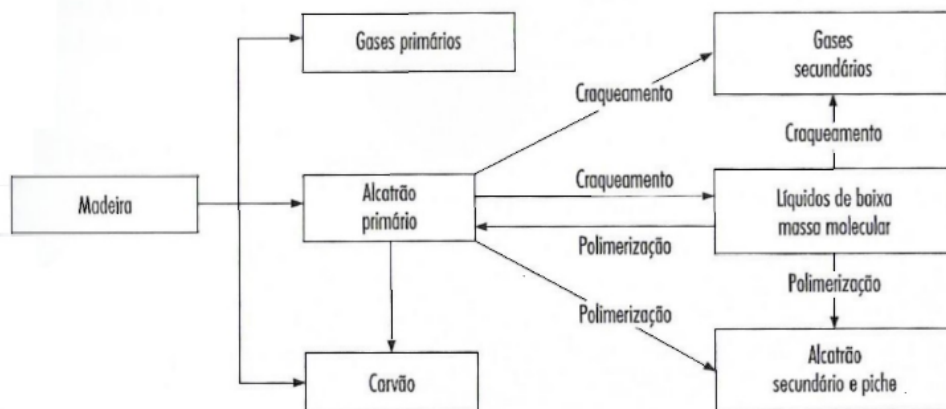


Figura 11 – Mecanismo de pirólise da madeira proposto por Soltes (GÓMEZ et al., 2008)

2.4.2 Carbonização

A carbonização é um processo pirolítico que tem como principais características uma lenta taxa de aquecimento, uma baixa temperatura de patamar final, geralmente entre 400 e 600 °C e um tempo de residência longo. A variação desses parâmetros característicos influencia diretamente na qualidade e nas proporções dos produtos e coprodutos obtidos. O processo pode ser dividido em quatro estágios teóricos principais, porém por sua complexidade as faixas de temperatura dessas etapas são difíceis de ser demarcadas (YI et al., 2017).

Como apresentado nos trabalhos de (TRUGILHO; SILVA, 2001; DONATO et al., 2017; YI et al., 2017), até uma temperatura de 200 °C acontece a secagem da biomassa, etapa na qual ocorrem poucas reações químicas. Na faixa de 150 a 280 °C, chamada de pré-carbonização, acontece o início da degradação térmica do material, principalmente da hemicelulose, formando os gases monóxido de carbono, dióxido de carbono e os líquidos ácido acético e metanol; além disso, essa etapa é caracterizada por reações endotérmicas, ou seja, que necessitam do aquecimento por uma fonte externa para acontecer. De 280 a 450 °C acontece uma carbonização “severa”, etapa na qual a degradação é acelerada. Pode ser observada uma formação de líquidos como ácido acético, metanol e alcatrão, assim como uma maior formação dos gases metano e etileno, e uma diminuição da formação de CO₂; essa etapa é considerada exotérmica pela alta geração de calor a partir de suas reações. A etapa final se dá acima de 450 °C, e nela acontece principalmente a liberação de voláteis do carvão, formando uma estrutura porosa com alta concentração de carbono.

2.4.3 Carbonização sob pressão

A aplicação da pressurização com gases inertes, geralmente o nitrogênio, no processo de carbonização foi estudada por uma série de autores, tanto na análise do carvão produzido quanto na análise dos subprodutos do processo. (MAHINPEY et al., 2009), que trabalharam com a caracterização dos produtos e subprodutos da carbonização sobre pressão, apontam que é esperado que o carvão produzido a diferentes pressões possua propriedades variadas. O estudo de (ROUSSET et al., 2011) mostrou que o rendimento da produção de carvão de eucalipto foi aumentado significativamente sob aplicação de 5 bars de pressão no processo, e esse resultado foi apresentado tanto no processo de pirólise lenta a 450 °C quanto a 600 °C. Já (QIAN et al., 2014) promoveram a remoção de oxigênio do bio-óleo produzido na pirólise de casca de arroz, uma vez que a pressurização do reator com nitrogênio facilitou a desidratação e a descarboxilação desse produto.

(MOK et al., 1992) explica que o aumento do rendimento do carvão e a redução das frações gasosas resultante da aplicação de pressão no leito do reator se dá principalmente pela ação catalítica da água de formação da pirólise e da umidade do material lignocelulósico. No processo, as altas pressões promovem uma retenção da fase vapor da água no

interior da madeira, o que ocasiona uma série de reações secundárias entre as estruturas monoméricas e oligoméricas altamente reativas da biomassa liberadas na carbonização, que logo se repolimerizam aumentando, assim, o seu rendimento em carvão.

2.4.4 Torrefação

Segundo (NOCQUET *et al.*, 2014), a torrefação pode ser definida como um processo térmico intermediário, mais intenso que a secagem, porém mais brando que a carbonização. O processo acontece em atmosfera inerte ou levemente oxidativa nas temperaturas de 200 a 300 °C, geralmente à pressão atmosférica, levando de alguns minutos a algumas horas (CHEN; KUO, 2011). As diferentes faixas de temperatura final na qual ocorre a torrefação podem caracterizar o processo, sendo ele considerado leve de 200 a 235 °C, moderado de 235 a 275 °C ou severo de 275 a 300 °C.

No caso da torrefação leve, acontecem principalmente a liberação de voláteis e a degradação da hemicelulose. Essas reações se intensificam na torrefação moderada e inicia-se a degradação da celulose ainda em certas proporções. Nas temperaturas de torrefação severa, a degradação da hemicelulose é quase completa e a da celulose é intensificada, resultando numa maior perda de massa e num aumento da densidade energética da madeira torrificada (CHEN *et al.*, 2015). Sendo assim, a perda de massa do material torificado acontece principalmente pela degradação da hemicelulose, já que sob as temperaturas de torrefação observa-se uma menor degradação da lignina e da celulose (BATIDZIRAI *et al.*, 2013).

2.4.5 Torrefação com acústica

O movimento ondulatório está presente na natureza e acontece por duas formas principais: ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas; sendo as primeiras devidas à perturbação de um meio físico e as segundas independentes da perturbação de um meio. No caso das ondas sonoras, que são ondas mecânicas longitudinais, sua propagação se dá através de qualquer material, e em gases acontecem por conta de perturbações que criam regiões de compressão (alta pressão) e de rarefação (baixa pressão) movimentando elementos do gás em movimento harmônico simples paralelo à direção da onda (JEWETT Jr.; SERWAY, 2011).

Uma vez que as ondas mecânicas e a convecção como mecanismo de transferência de calor no processo de torrefação estão relacionadas com o movimento de partículas em um meio, sugere-se que a aplicação da acústica combinada com a temperatura no leito de reatores pirolíticos possa influenciar na transferência de calor do sistema e, conseqüentemente, no processo de degradação da biomassa.

Com o intuito de investigar a influência da aplicação de acústica no processo de

torrefação, (SILVEIRA, 2018) trabalhou na implementação de um sistema acústico em um reator, caracterizando o campo gerado pelo *driver* para que fossem escolhidas as frequências e intensidades que produzissem as melhores condições quanto à velocidade das partículas em volta das amostras de madeira utilizadas nos experimentos, de forma a favorecer o processo de degradação da biomassa.

Observou-se que, nos experimentos com aplicação de acústica, temperaturas mais elevadas foram encontradas no interior da madeira em comparação com os experimentos realizados sem acústica, enquanto as temperaturas na superfície apresentaram uma pequena variação para os casos com e sem acústica. Também pôde-se perceber que o pico exotérmico do processo foi atingido mais rapidamente nos processos com acústica (SILVEIRA, 2018; GALVÃO, 2018).

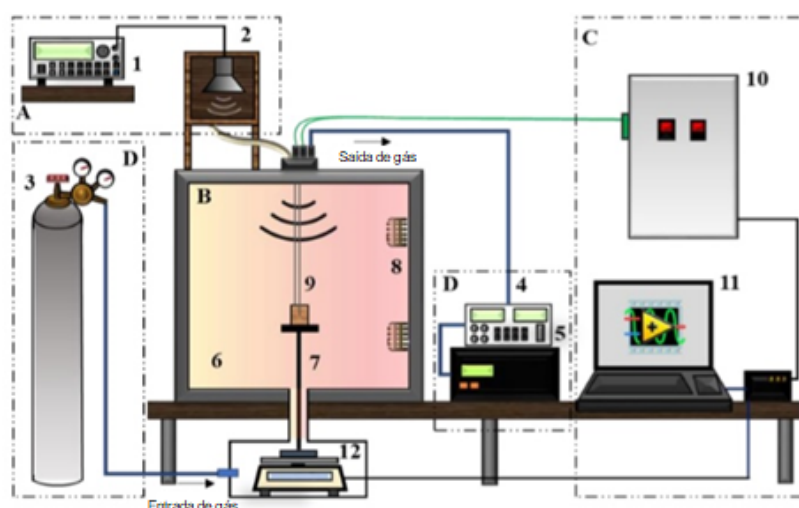


Figura 12 – Esquema do reator em escala laboratorial para torrefação com acústica desenvolvido por Silveira (SILVEIRA, 2018) - adaptada.

2.5 Parâmetros de controle dos processos termoquímicos

Tanto as variáveis relativas ao material precursor quanto ao reator e às condições do processo exercem forte influência nos produtos finais, seja no rendimento de suas frações, na sua composição elementar, em seu poder calorífico, entre outros. Em geral, aumentos na temperatura e na taxa de aquecimento refletem em aumentos na taxa de degradação térmica, contribuindo para a maior formação de frações líquidas em relação às sólidas (MACÊDO, 2012). A pirólise rápida, por exemplo, favorece a geração de produtos líquidos, enquanto a pirólise lenta (carbonização) maximiza a produção de carvão sólido (LISBOA, 2016). Sendo assim, o estudo dessa influência é determinante para a definição de projetos, a depender dos produtos finais desejados.

O trabalho de (JUNIOR, 2014) caracterizou a biomassa in natura, torrificada e carbonizada de um clone de *Eucalyptus urograndis*. A torrefação aconteceu à taxa de aquecimento de $3,00 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ e temperatura máxima final de $250 \text{ }^\circ\text{C}$ mantida durante 60 minutos. Já a carbonização aconteceu à taxa de aquecimento de $1,67 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ e temperatura máxima final de $450 \text{ }^\circ\text{C}$ mantida durante 30 minutos. Considerando os resultados apresentados na Tabela 1, percebe-se a influência dos parâmetros de controle dos processos realizados nas características dos produtos finais obtidos.

	In natura	Torrefação	Carbonização
Carbono fixo (%)	11,04	52,80	80,18
Teor de voláteis (%)	88,34	46,55	18,55
Teor de cinzas (%)	0,63	0,65	1,27
Rendimento gravimétrico (%)	-	50,30	31,59

Tabela 1 – Rendimentos e resultados da análise imediata do eucalipto submetido a diferentes processos.

2.6 Tecnologias de pirólise

Sendo apresentados alguns processos pirolíticos, é fundamental, então, estudar as tecnologias empregadas nesses processos, tanto em escala industrial quanto em escala laboratorial. Reatores são unidades de processamento de substâncias onde se produzem reações de transformação molecular. A construção desses reatores de processos termoquímicos pode se dar de diferentes maneiras, apresentando uma variedade de formas, tamanhos, materiais (alvenaria, metal, etc), fontes de aquecimento (interno ou externo), assim como pelo carregamento (contínuo ou por carga), mobilidade (fixos ou portáteis), entre outros detalhes (CEMIN, 2010; LUENGO et al., 2008).

2.6.1 Reatores em escala industrial

A carbonização de madeira pode ser realizada através do sistema de carbonização desenvolvido pela empresa brasileira DPC – Processos Termoquímicos (DPC, 2016). O desenvolvimento da tecnologia consistiu na otimização dos estágios de produção de carvão vegetal: secagem (*drying*), carbonização (*pyrolysis*) e resfriamento (*cooling*).

Como a carga é estática no processo, não há geração de finos em escala. Podem ser carbonizados diversos tipos de biomassa, e a lenha pode ter até 6,5 metros de comprimento e com umidade de superior a 45% em base úmida. A planta tem equipamentos modulares, permitindo sua realocação. Um diagrama da tecnologia é apresentado na Figura 13.

Diferentemente da maioria dos fornos convencionais, em que a energia fornecida para o processo é obtida pela combustão interna de parte do material a ser carbonizado, a tecnologia DPC tem combustão externa dos gases recuperados de processos. A carga sólida

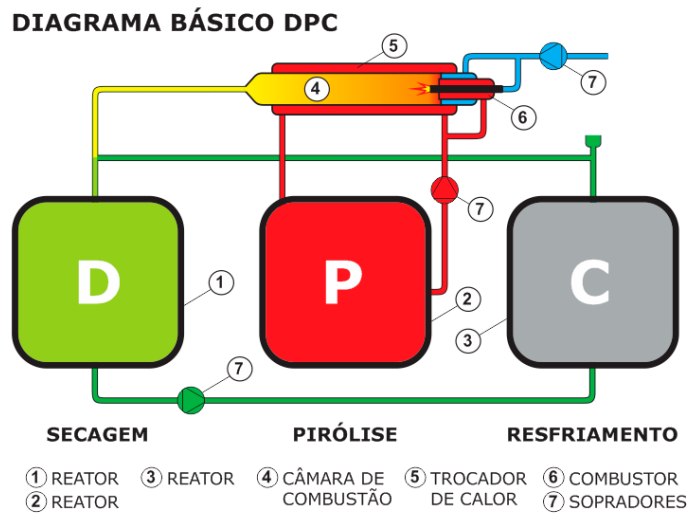


Figura 13 – Diagrama básico DPC (DPC, 2016).

em cada reator é percolada por gases cuja natureza depende da etapa em andamento. No estágio de secagem, as frações gasosas recuperadas da pirólise anterior percolam a carga de madeira, eliminando sua água em forma de vapor. Na pirólise, os gases são reaquecidos por um trocador de calor e retornam ao reator. E, ao fim do processo, o resfriamento é acelerado pela aspersão dos vapores d'água da secagem. O rendimento gravimétrico do sistema é da faixa de 40 a 42%, com forte redução de finos e com regularidade e uniformidade do carvão com qualidade previamente programada. Por ser reutilizado no processo, não há emissão de gás metano (CH_4) na atmosfera.

Outro sistema para conversão energética da biomassa é a tecnologia CarbonFX, da empresa canadense Airex Energy, que consiste na produção de péletes torreficados de biomassa, produto chamado de BiocoalFX (AIREX ENERGY, 2021). Essa tecnologia também permite que a empresa produza biochar (para a correção de solos), serragem levemente torreficada (para compósitos) e biocoque carbonizado (para aplicações na metalurgia).

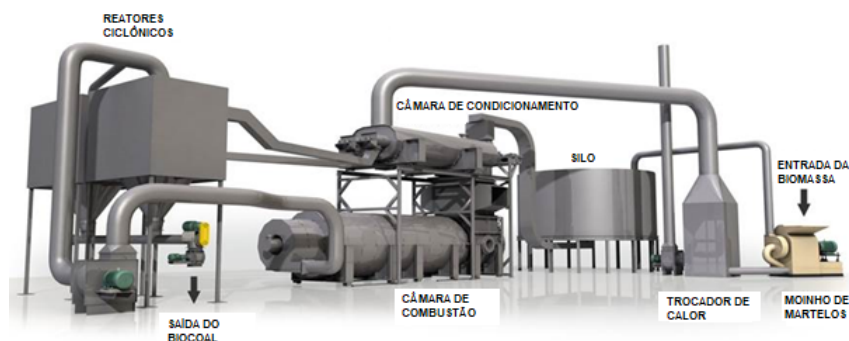


Figura 14 – Diagrama básico AIREX (AIREX ENERGY, 2021) - adaptada.

O processo de produção do BiocoalFX consiste em três etapas: pré-secagem, condicionamento e torrefação. Na pré-secagem, a biomassa é alimentada na unidade na forma de serragem, onde é pré-secada num ciclo aeráulico utilizando calor residual do processo de combustão de gás, reduzindo a umidade da biomassa de 50 para 25%. O condicionamento da biomassa acontece na atmosfera de vapor saturado criada pelo aquecimento indireto da própria biomassa durante a circulação dos gases de combustão numa parede dupla. A biomassa é então circulada pelos quentes gases de combustão da câmara de combustão até chegar ao reator de torrefação. A biomassa é alimentada no topo do reator e é espiralada seguindo um caminho ciclônico para se arranjar no anel de sustentação localizado na base do reator. O anel de sustentação permite que a biomassa permaneça suspensa no reator por criar um balanço entre a força centrífuga do efeito ciclônico, a força gravitacional do material a granel e o pushing effect do anel de sustentação. O tempo de residência total no reator é muito curto, de 2 a 3 segundos e acontece à temperatura de 525 °C (podendo esta temperatura variar de acordo com o teor de carbono e o poder caloríficos desejados). O processo como um todo é autossuficiente com até 42% de umidade no material precursor.

2.6.2 Reatores em escala laboratorial

De forma a avaliar os processos termoquímicos e entender melhor o comportamento dos materiais submetidos a esses processos, são concebidos diversos tipos de reatores em escala laboratorial para atender variadas análises. Tais reatores, em geral, visam possibilitar um melhor controle da temperatura, um melhor controle da atmosfera (seja ela inerte ou não), assim como o acompanhamento da perda de massa ao longo dos processos. Por vezes, também são acoplados aos sistemas dispositivos para análises das espécies gasosas e condensáveis oriundas dos processos realizados.

A planta piloto de torrefação em escala laboratorial Tornade, apresentando no trabalho de (NOCQUET, 2012), é um dispositivo experimental desenvolvido no CEA Grenoble para realizar ensaios de torrefação de faia e seus constituintes, em regime químico, a fim de quantificar as principais espécies voláteis em função do tempo através de balanços de massa. Esquematizado na Figura 15, o dispositivo é composto por: um reator impermeável (localizado dentro do forno, é onde acontece a torrefação), um espectrômetro FTIR (que permite a quantificação em tempo real dos principais compostos voláteis da torrefação), e dois condensadores (armadilhas frias para a coleta dos condensáveis).

O forno é constituído de um cilindro em inox de 75 cm de altura e 9 cm de diâmetro aquecido ao longo de 70 cm (tamanho das resistências), tendo suas extremidades cobertas por lã de vidro. O cilindro é aquecido de forma controlada por resistências de 3,9 kW com auxílio de termopar do tipo *K* em contato com a parte de fora do cilindro. A zona de aquecimento isotérmico está localizada entre 20 e 50 cm a partir da extremidade superior do forno. O reator é constituído em inox de 2,5 cm de diâmetro interno e 5 cm de altura, e

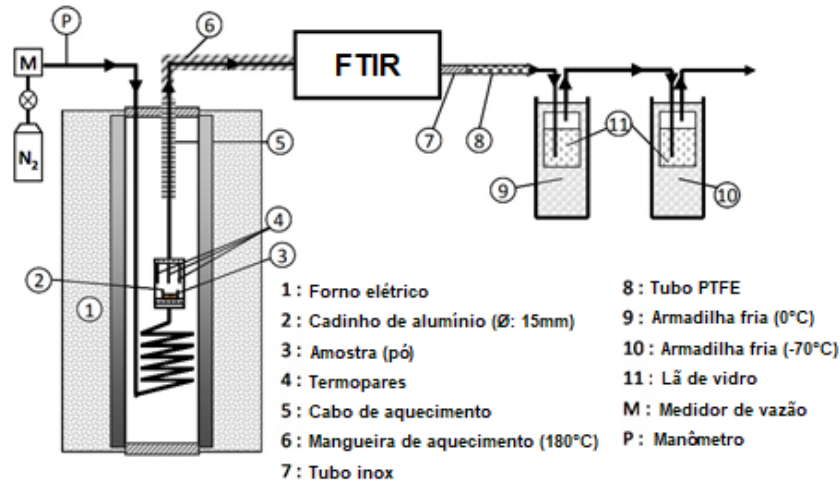


Figura 15 – Esquema do dispositivo experimental Tornade (NOCQUET, 2012) - adaptada.

é posicionado no centro da zona isotérmica, estando seu fundo a 43 *cm* do fundo do forno. O reator é alimentado com gás por uma tubulação de 2 *mm* de diâmetro interno e 1 *m* de comprimento, que desce ao longo do corpo do reator a partir da entrada superior do forno, sendo enrolado em 5 espiras abaixo do reator (de forma a permitir o aquecimento do gás) e é conectado na parte inferior do reator. No fundo do reator, um disco sinterizado em aço inoxidável dispersa o fluxo gasoso entrante pela seção do cilindro, e nesse disco é posicionado um cadinho de alumínio de 15 *mm* de diâmetro no qual é colocado o material a ser torreficado. O material é, então, aquecido na parte superior por convecção pelo fluxo gasoso, e na parte inferior por condução do cadinho em contato com o disco. A temperatura da câmara de reação é medida por 3 termopares do tipo *K* posicionados acima da amostra e sua média define a temperatura do processo. Os voláteis da torrefação são conduzidos pela tubulação para fora do reator até o espectrômetro e, a fim de evitar a condensação antes da análise, são mantidos em temperatura com um cabo de aquecimento de 220 °C até a saída do reator, e outro de 180 °C até o equipamento FTIR.

Um conceito de balança termogravimétrica em escala laboratorial foi concebido, testado e validado no trabalho de (COLATTO, 2013). Foram realizados ensaios com amostras de 250 *g* de biomassa com controle de temperatura, pressão e registro de decaimento da massa da amostra, o que permite o uso do sistema para pesquisa. O reator atingiu 450 °C a 5 °C·min⁻¹ sem perda de controle e trabalhou a uma pressão de 5 *bars*, conseguindo controlar os picos causados pela liberação de gases da amostra sem indícios de corrosão. Os rendimentos de carbonização e as curvas de decaimento foram coerentes com a literatura. A Figura 16 apresenta um esquema do sistema do trabalho de (ROCHA, 2012), que analisou e validou o desempenho da mesma termobalança.

A balança termogravimétrica é composta por uma câmara de medição, um trocador de calor, um reator de carbonização e sistemas de controle de pressão e temperatura. A

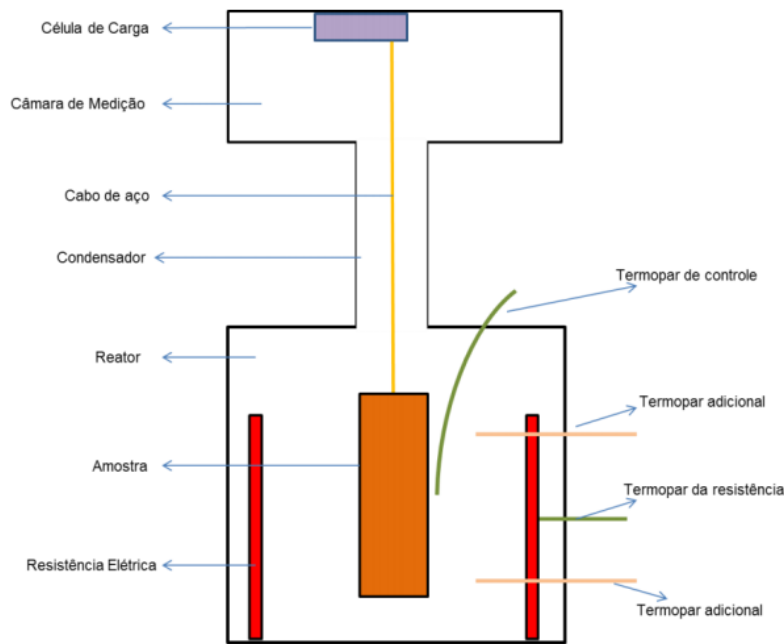


Figura 16 – Esquema da termobalança desenvolvida (COLATTO, 2013).

câmara de medição é onde se localiza a célula de carga, que deve operar entre -10 e 50 $^{\circ}\text{C}$ na ausência de gases agressivos, tem uma localização que garanta tais requerimentos. Também faz parte do sistema um trocador de calor, que consiste num duplo tubo entre o reator e câmara de medição, que tem função estrutural, diminui a transferência de calor e atua como condensador, evitando condensáveis na câmara de medição. O reator, feito em aço inox, tem diâmetro interno de $15,48$ cm , onde ocorre a carbonização. Para permitir altas taxas de aquecimento, o reator tem a resistência (três elementos de potência nominal 500 W) fixada em seu inferior, além de um isolamento feito com lã de vidro e folha de alumínio, tanto interna quanto externamente. O cadinho do sistema é o mais leve possível e permite que vapores e gases se desprendam facilmente da amostra, sendo ligado ao eixo de ligação (também leve e conduzindo o mínimo de calor) com a célula de carga em sua parte superior. Uma base e uma ponte para içamento também foram projetadas para facilitar a montagem, operação, carregamento e movimentação da balança.

Outro exemplo de reator com acompanhamento de massa é o utilizado no trabalho de (TAGUTCHOU, 2008), que visou melhorar a compreensão da zona de reação de gaseificação de resíduos de carvão vegetal para otimizar o projeto e a operação de reatores. O reator é constituído de um tubo de quartzo de 2 m de comprimento total e $7,5$ cm de diâmetro interno. A Figura 17 apresenta o reator e seu esquema.

O aquecimento é fornecido por três resistências elétricas reguladas independentemente por três termopares, assim, assegurando uma temperatura uniforme ao longo do reator. A atmosfera de reação é gerada pela mistura de nitrogênio com ar comprimido (fonte de O_2), vapor d'água e dióxido de carbono, controlada com medidores de fluxo de

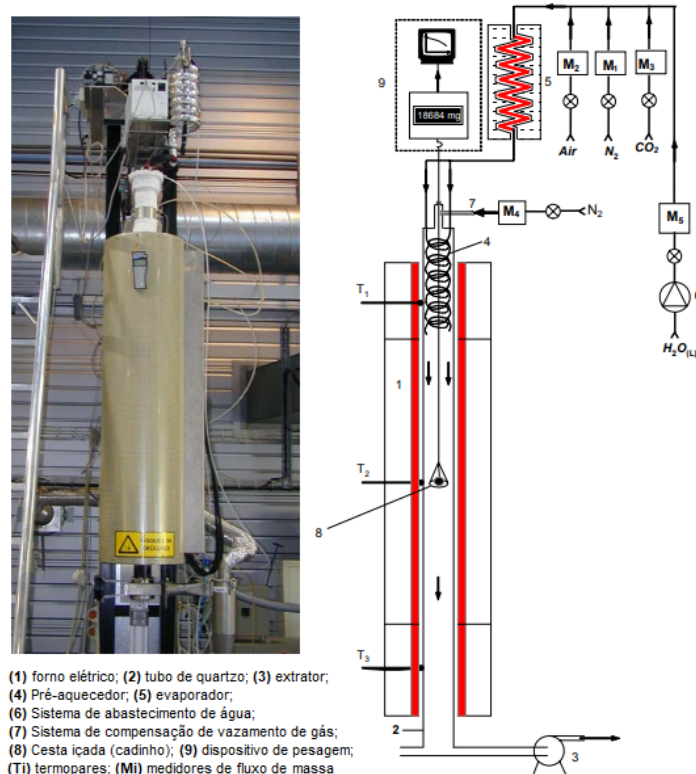


Figura 17 – Esquema do macro-TGA experimental (TAGUTCHOU, 2008) - adaptada.

massa em proporções variáveis de acordo com o tipo de mistura necessária. Um fluxo de nitrogênio, também controlado, compensa vazamentos pelo retorno de gases através do orifício de suspensão do fio utilizado para medição da massa. A mistura é então conduzida para um evaporador, que consiste em um tubo helicoidal de aço inoxidável aquecido eletricamente. A temperatura de saída do evaporador é de 200 °C. A mistura de gases passa então por um pré-aquecedor constituído por dois tubos helicoidais imersos no reator, o que permite que a mistura atinja a temperatura do forno.

2.7 Outras tecnologias aplicadas à biomassa

A biomassa e os processos apresentados anteriormente ainda podem ser utilizados na obtenção de outros produtos, seja por uma questão de logística como no caso da densificação em péletes e briquetes, ou para finalidades que não a energética, como no caso da ativação de carvão para a filtragem de água, por exemplo.

2.7.1 Densificação

Algumas características da biomassa dificultam sua aplicação direta para fins energéticos, um exemplo é a sua baixa densidade a granel, principalmente em se tratando de resíduos. Essa baixa densidade implica em maiores dificuldades em seu armazenamento,

maiores custos em transporte e eventuais perdas de material. Também são observados problemas em sua queima, tanto pelo seu teor de umidade quanto pela velocidade da queima, já que acontece de forma rápida, exigindo um maior trabalho do sistema de alimentação (ABDOLI et al., 2018).

Colocam-se como alternativas para esses problemas, então, a peletização e a briquetagem. Tais processos de densificação resolvem alguns dos problemas encontrados na aplicação direta da biomassa, uma vez que esses produtos densificados apresentam uma uniformidade em dimensões, qualidade e queima, maior facilidade de transporte e armazenamento, além de se apresentar como uma solução para a disposição de resíduos em procedimentos de corte e descarte da biomassa (BHATTACHARYA et al., 1985; ABDOLI et al., 2018).

Na produção de briquetes e péletes, a compactação da serragem acontece a altas pressões e temperaturas, já que a lignina contida nas partículas atua como ligante das partículas de madeira, passando pelo processo de sinterização entre as temperaturas de 80 e 200 °C, a depender da matéria-prima utilizada (GENTIL; VALE, 2015). O estudo de (SOUZA; VALE, 2017) sobre a briquetagem com variação nos parâmetros de temperatura, pressão e granulometria mostrou que um efeito positivo da elevação das densidades aparente e energética foi alcançado a maiores temperatura e com menores tamanhos de partícula, enquanto a variação da pressão de compactação exerceu pouca influência nas propriedades finais dos briquetes. (PENG et al., 2013) avaliaram a peletização de serragens torrificadas de madeiras macias canadenses e seu estudo mostrou que os péletes de madeira torrificada apresentaram maior poder calorífico e menor umidade que os péletes de controle; apesar disso a durabilidade mecânica dos péletes torrificadas foi comprometida e mais energia foi consumida em sua compactação.



Figura 18 – Comparação entre o volume de um briquete e da serragem de mesma massa.

2.7.2 Ativação de carvão

A adsorção é um processo no qual duas substâncias imiscíveis interagem de forma que uma delas se acumula na superfície da outra. O adsorbato é a substância, que pode ser líquida ou gasosa, retida na interface com o adsorvente, que possui fase sólida (FERNANDES, 2008). A adsorção pode ser classificada como química ou física, não havendo uma diferença clara entre elas, mesmo que sejam originadas por diferentes efeitos térmicos (BORBA, 2006).

A adsorção química é causada por ligações fortes entre o adsorbato e a superfície do adsorvente, que acontece de forma instantânea, sendo essas ligações, geralmente, covalentes ou iônicas. Dessa forma, a quimissorção, como também pode ser chamada, constitui um processo seletivo que acarreta na modificação do material adsorvido e na formação de uma monocamada sobre o adsorvente (CLARK, 2006).

No caso da adsorção física, ou fisissorção, as forças de atração das moléculas do fluido adsorbato são menores que as forças entre a superfície do adsorvente. O resultado do equilíbrio das forças presentes, como a de Van der Waals, favorece o fenômeno da adsorção de forma que se formem, lenta ou rapidamente, multicamadas sobre o adsorvente e que não haja transferência de elétrons não afetando, desse modo, o material adsorvido (FERNANDES, 2005).

2.7.2.1 Ativação física

A ativação física é resultado da reação entre o carvão e gases que se comportam como oxidantes moderados, geralmente vapor d'água e/ou dióxido de carbono, a temperaturas de 800 a 1000 °C (SOARES, 2001). A reação envolve os átomos de carbono mais reativos do carvão e o gás durante o processo de ativação, e faz com que se separem do carvão, formando monóxido de carbono. Sendo assim, a perda seletiva de carbono produz um alargamento da porosidade do carvão, no qual o volume dos poros aumenta com o decorrer da ativação (AGUIAR, 2014 apud OLIVEIRA; FRANCA, 2008).

2.7.2.2 Ativação química

A ativação química consiste na impregnação de agentes químicos no precursor, para que depois seja efetuada a carbonização a temperaturas de 400 a 800 °C (MORAIS, 2014). Agentes comumente utilizados são o cloreto de zinco ($ZnCl_2$), o ácido fosfórico (H_3PO_4) e o hidróxido de potássio (KOH), por exemplo. Na impregnação ocorre a ação desidratante do agente ativante, causando a degradação da celulose e de outros componentes presentes antes da carbonização do material (CAMBUIM, 2009). Após esse processo, é realizada a extração que expõe a estrutura porosa do carvão ativado (SOARES, 2001).

3 Materiais e métodos

Para a concepção do projeto de desenvolvimento do reator e dos sistemas propostos nos objetivos deste trabalho, foram levadas em consideração as seguintes características:

- Utilização de materiais construtivos comuns no mercado;
- Estrutura modular e simplificada;
- Suporte para fáceis modificações posteriores;
- Segurança operacional.

As fases de desenvolvimento do projeto foram:

- Pesquisa bibliográfica de equipamentos e tecnologias semelhantes;
- Caracterização das peças já disponíveis;
- Definição dos sistemas de operação do reator;
- Detalhamento e desenho do projeto;
- Construção e montagem;
- Ensaios de validação;
- Modelagem térmica do reator.

3.1 Caracterização do reator

O reator, objeto de estudo deste trabalho, encontrava-se, inicialmente, na Área de Energia de Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), tendo sido cedido ao laboratório pelo Centro Francês de Pesquisa Agrícola (Cirad), onde era utilizado no processo de hidroliquefação da biomassa. Após reuniões, o reator foi transportado para o Laboratório de Combustão da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, onde foi instalado em definitivo.

O estudo de (DOAT, 1984) foi realizado com o reator e nele é possível obter algumas informações sobre seus materiais. Na Figura 19, é apresentado o diagrama de seu funcionamento para hidroliquefação, realizado no trabalho de (LEMAIRE, 1982).

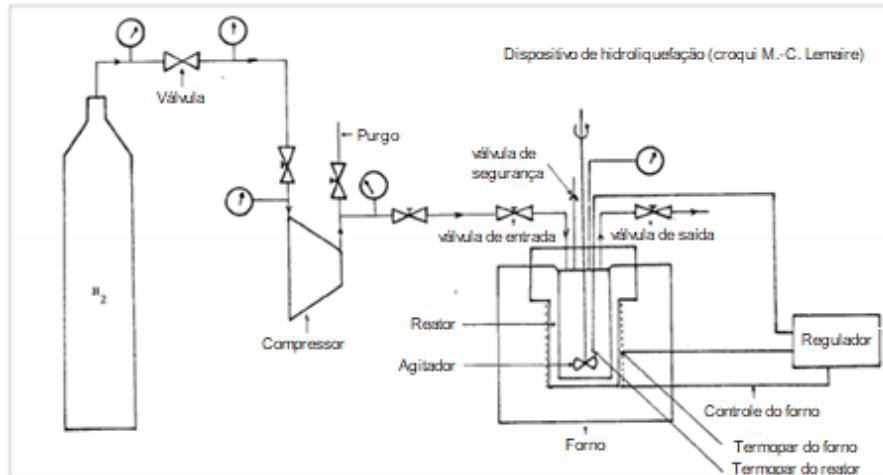


Figura 19 – Diagrama do sistema de hidroliquefação (DOAT, 1984) - adaptada.

(HORTA, 2006) adaptou o reator para sua utilização em estudos de carbonização sob pressão. Para isso, concebeu um projeto para essa transformação, definindo seus sistemas de aquecimento, isolamento térmico, fluxo de gases (pressão), medição, aquisição de dados e controle. Levando em consideração os componentes já disponíveis no reator original, fez um levantamento de quais seriam aproveitados ou não, de acordo com a utilidade e o estado desses componentes e propôs os novos a serem utilizados, assim como estruturou a automação do sistema.

Com a finalidade de analisar o efeito da pressão na carbonização de *Eucalyptus grandis*, o estudo de (FIGUEIREDO, 2009) foi feito utilizando o reator adaptado por Horta, porém com algumas alterações em seus sistemas de aquecimento e isolamento térmico. O diagrama de funcionamento do reator para esse fim pode ser observado na Figura 20.

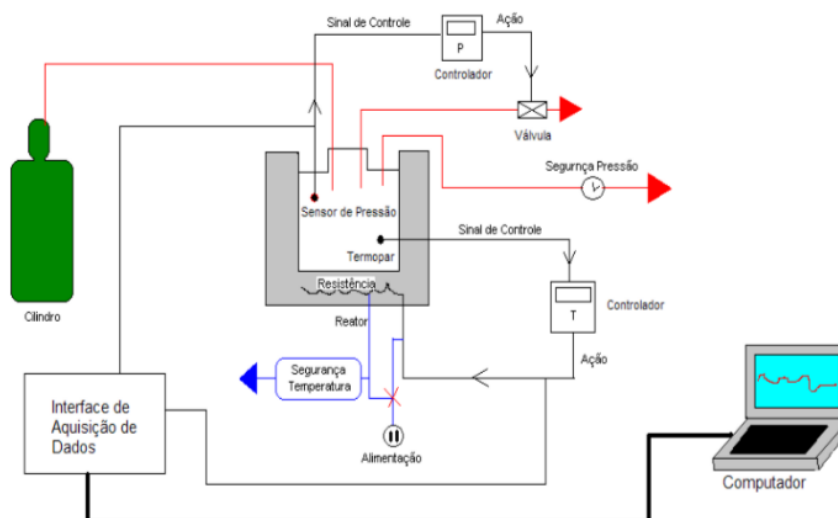


Figura 20 – Esquema do sistema de pirólise sob pressão (HORTA, 2006)

Com o desenvolvimento do projeto de reativação do reator, descrito neste trabalho, o equipamento agora está apto a trabalhar com processos de torrefação com controle de temperatura, taxa de aquecimento e concentração de oxigênio, tendo sido desenvolvido de forma a permitir a implementação de outras tecnologias de processos termoquímicos. A Figura 21 apresenta o esquema de funcionamento atual do reator, enquanto a Figura 22 apresenta o detalhe para a região interna do reator com o posicionamento do cadinho e do termopar.

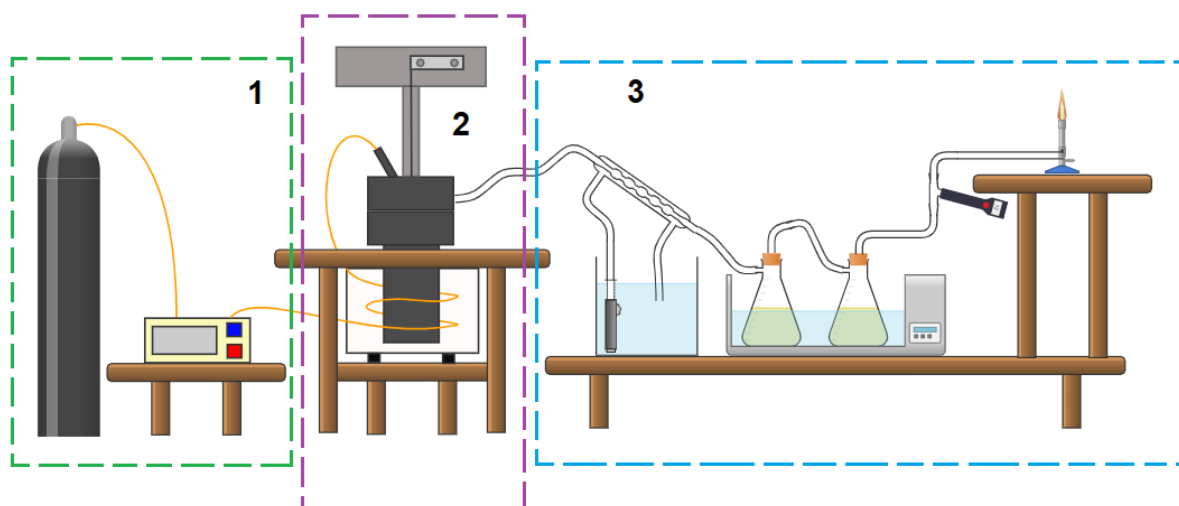


Figura 21 – Esquema do reator dividido nas seções: 1) injeção controlada de gás inerte; 2) aquecimento da amostra e medição da perda de massa; 3) saída, medição e condensação de gases.

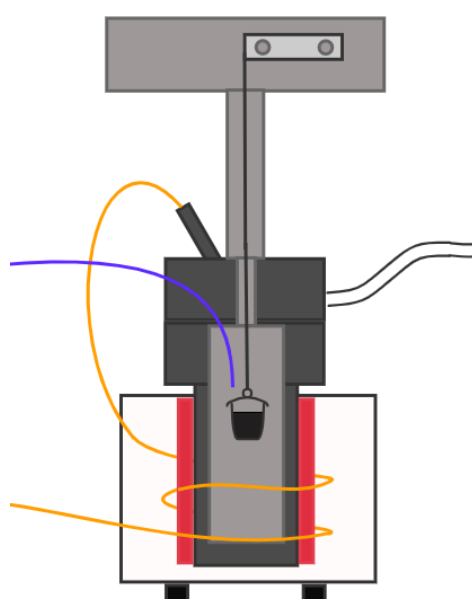


Figura 22 – Detalhe da Seção 2.

3.2 Componentes

3.2.1 Estado inicial

Ao realizar o estudos dos trabalhos realizados com o reator e identificar os seus componentes, foi possível listar os componentes ainda presentes no LPF, sendo eles:

- Copo do reator;
- Tampa do reator;
- Parafusos de fixação do reator;
- Camada de isolamento do antigo forno de aquecimento;
- Resistência do tipo coleira;
- Mesa de suporte.

3.2.2 Estado atual

Outros componentes foram adicionados aos sistemas do reator, os quais serão mais bem descritos e especificados nas seções subsequentes, sendo eles:

- Célula de carga;
- Estrutura de suporte para a célula de carga;
- Cadinho;
- Condensador;
- Válvula solenóide;
- Sonda para medição da concentração de oxigênio;
- Bomba hidráulica;
- Frascos lavadores;
- Bico de Bünsen;

3.2.3 Materiais e limites de trabalho

(HORTA, 2006) apresenta que o reator (copo e tampa), de 400 cm^3 de volume, é feito de aço *XN26TW*, aço refratário rico em níquel, próprio para peças submetidas a temperaturas elevadas. O datasheet da empresa Aubert & Duval sobre esse aço indica que suas características mecânicas são boas até a faixa de 650 a $700 \text{ }^\circ\text{C}$ e que sua resistência oxidação é alta em temperaturas de até 900 a $950 \text{ }^\circ\text{C}$ (AUBERT-DUVAL, 2021).

Como grafado na tampa, a temperatura máxima suportada é de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ e a pressão é de 750 bars . Apesar disso, de forma a utilizar uma menor quantidade de gás e ter mais opções de equipamentos no mercado, é viável trabalhar com uma pressão máxima estabelecida de 10 bars .

A resistência do tipo coleira, utilizada por (FIGUEIREDO, 2009), tem potência de $1,6 \text{ kW}$. A temperatura máxima que essa resistência pode atingir é de $900 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma taxa de aquecimento máxima de $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

A mesa suporte é de aço, porém foi identificado que ela não atinge altas temperaturas durante os processos, logo a preocupação com a temperatura máxima à qual pode chegar é baixa, ainda mais com o isolamento proposto por (HORTA, 2006), que utiliza uma junta de amianto entre o reator e a mesa. Neste trabalho nenhum isolamento térmico entre o reator e a tampa foi proposto, mas indica-se que, caso necessário, o ideal seja a utilização de outro material como placas de silicato de cálcio em substituição ao amianto, já que seu uso é proibido no Brasil desde 2017.

Parâmetro	Limite
Volume	400 cm^3
Temperatura	$800 \text{ }^\circ\text{C}$
Pressão	10 bars
Potência da coleira	$1,6 \text{ kW}$
Taxa de aquecimento	$15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}$

Tabela 2 – Limites de trabalho estipulados para o reator.

Os limites estão dispostos na Tabela 2, e não foi necessário alterar seus valores para o desenvolvimento do projeto de reativação do reator.

3.3 Sistemas

Para que a construção do reator pudesse ser realizada com base nos objetivos e requisitos do projeto, foi essencial o desenvolvimento de seus sistemas de aquecimento e isolamento térmico, de acompanhamento da perda de massa, assim como da linha de gases de entrada e saída dos processos. Tais sistemas precisaram estar alinhados com o

sistema de controle e automação desenvolvido afim de garantir o funcionamento do reator, integralizando os demais sistemas.

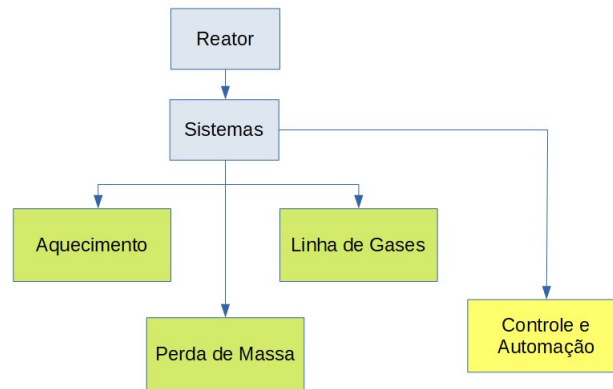


Figura 23 – Sistemas desenvolvidos no projeto.

A Figura 23 apresenta, nas caixas verdes, os sistemas estudados e concebidos a partir deste trabalho e, na caixa amarela, o sistema estudado e desenvolvido pelos integrantes da área de controle e automação do projeto de reativação do reator.

3.4 Sistema de Aquecimento

3.4.1 Resistência

Para o desenvolvimento do reator em questão neste trabalho: um reator de pequeno porte com finalidade de pesquisa e de necessidade de um controle fino, a opção que se apresenta como mais praticável é a do aquecimento por resistência elétrica. No caso da resistência escolhida, que é o tipo coleira por seu formato cilíndrico, a transferência de calor para a parte interna do reator acontece de forma indireta e externa em relação à Câmara de Reação, ou seja, a resistência é posicionada de maneira a revestir o copo do reator por fora. Sendo assim, a condução de calor no aço do reator tende a acontecer, majoritariamente, na direção radial.

A coleira utilizada no reator funciona à tensão de 220 V e à potência de 1,6 kW, podendo trabalhar até a temperatura de 900 °C. Sua taxa de aquecimento máxima é de 15 °C. É a mesma coleira utilizada no trabalho de (FIGUEIREDO, 2009).

Uma análise preliminar, realizada a partir da aquisição de dados do funcionamento da coleira à potência máxima (sem controle), mostrou que o aquecimento até a temperatura de 400°C apresentou uma taxa de quase 18°C · min⁻¹.

3.4.2 Isolamento térmico

Para reduzir as perdas de calor no reator, que acontecem de forma considerável, já que o isolamento da própria resistência não é o mais ideal, pode-se acoplar ao copo do reator um componente para isolar o sistema termicamente. Esse isolamento também se mostra útil para minimizar as perdas de calor pela parte de baixo do copo do reator, que fica descoberto quando só se utiliza o isolamento próprio da coleira. A Figura 24 apresenta o imageamento térmico na parte externa da coleira.

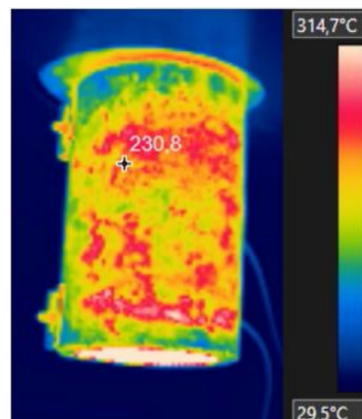


Figura 24 – Temperaturas na coleira.

3.4.3 Controle

O controle da potência da coleira para aquecimento do reator consiste num circuito PID, desenvolvido no trabalho de (CORDEIRO, 2021) e otimizado por (NETO, 2022). O controle de temperatura é, então, realizado através do controle de potência via ângulo de fase com um detector de passagem por zero. A temperatura do *setpoint* é comparada com a temperatura medida por um termopar de tipo *K*, escolhido por atuar na faixa de temperatura de operação do reator. A potência é medida com um sensor de corrente não invasivo. O circuito de controle do aquecimento via Arduino é apresentado na Figura 25.

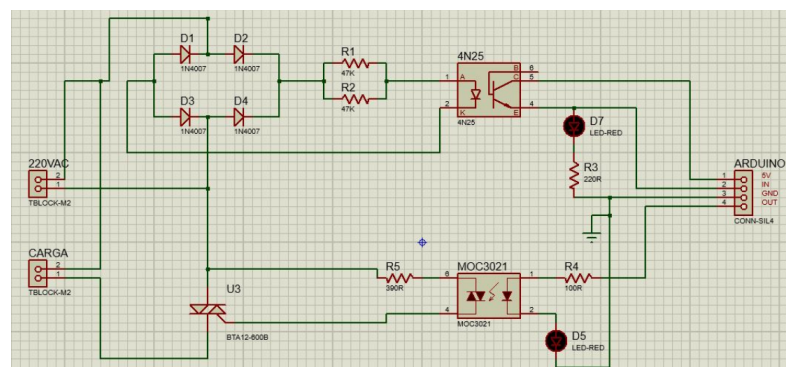


Figura 25 – Circuito de controle de temperatura (NETO, 2022).

3.5 Sistema de Acompanhamento da Perda de Massa

Constituindo uma técnica de análise instrumental importante por trazer informações acerca da natureza e da degradação de um material, as análises termogravimétrica (TGA) e de sua derivada (DTG) têm sido empregadas na caracterização de biomassa pela identificação das temperaturas de degradação da celulose, da hemicelulose e da lignina de diferentes materiais (LEÃO, 2016). Assim, foi projetado um sistema para o reator visando a aferição da perda de massa ao longo de diferentes processos levando em consideração a escala de amostras de biomassa na ordem de grandeza de gramas.

3.5.1 Definição do Sistema de Medição

O sistema de monitoramento da massa das amostradas projetado precisou estar em conformidade com a geometria do reator e com a disposição dos demais sistemas. Seu dimensionamento levou em consideração, principalmente, limites de temperatura ao longo da estrutura de forma a proteger o dispositivo de medição (célula de carga), em observância à condensação dos gases envolvidos nos processos do reator, alinhando tais necessidades às questões de custo e disponibilidade no mercado.

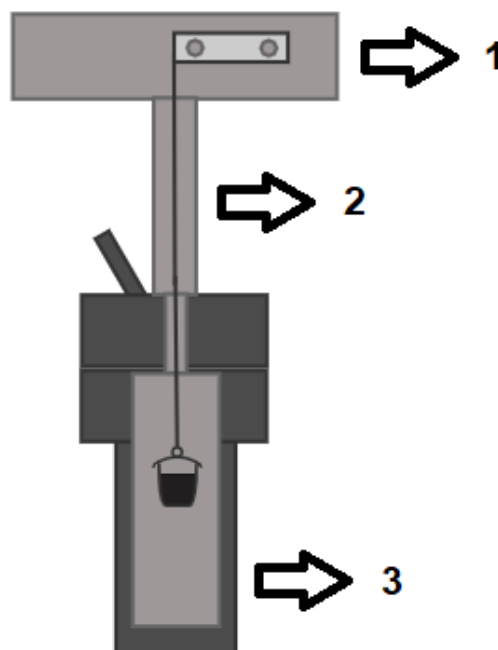


Figura 26 – Vista em corte do projeto conceitual para medição da massa.

O projeto do sistema, apresentado na Figura 26, conta com os seguintes compartimentos:

1. **Câmara de Medição:** é o local onde se posiciona a célula de carga, acima da Câmara de Reação a uma distância que permita a operação da célula de carga sem

interferência da temperatura;

2. **Trocador de Calor:** presente entre os dois outros compartimentos, possui tanto a função estrutural de suportar a Câmara de Medição quanto de diminuir a temperatura dos gases que eventualmente saiam da Câmara de Reação e condensá-los;
3. **Câmara de Reação:** local onde o cadinho com a biomassa é posicionado para passar por processos termoquímicos.

A configuração apresentada teve como base, principalmente, o trabalho de (COLATTO, 2013), que desenvolveu uma termobalança de estrutura semelhante.

3.5.2 Estrutura Construída

A Figura 27 apresenta o componente construído a partir do projeto conceitual posicionado no reator. Sua fixação na tampa é feita com os próprios parafusos do reator.



Figura 27 – Estrutura posicionada no reator.

A estrutura projetada e construída permite que seja feito o acoplamento de um tubo que transforme o Trocador (2) em um trocador de calor de tubo duplo para escoamento paralelo ou contracorrente. Apesar dessa possibilidade, o acoplamento dessa estrutura não foi realizado neste trabalho.

3.5.3 Cadinho

O cadinho foi desenvolvido em formato cilíndrico com malhas de aço, com diâmetro de 3 cm, para evitar que ele encoste nas paredes da Câmara de Reação. A Figura 28 mostra o cadinho e sua massa, suportando até cerca de 19 g de péletes de eucalipto. A conexão entre a célula de carga e o cadinho é feita com um fio de aço.

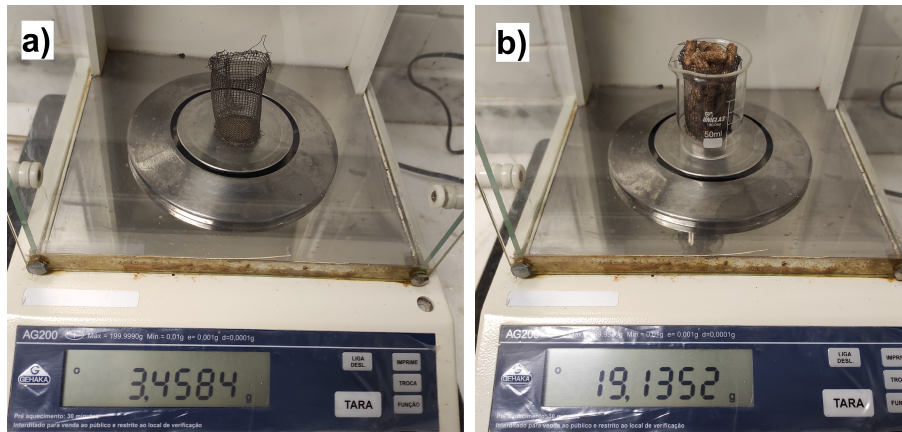


Figura 28 – a) Cadinho vazio; b) Cadinho cheio com péletes.

3.5.4 Controle

Para o acompanhamento da perda de massa ao longo do processo, é utilizada uma célula de carga associado ao módulo Max 6675, que interpreta os dados adquiridos para leitura no Arduino. Após a leitura, os dados são retransmitidos ao LabVIEW, sendo possível visualizá-los em tempo real através de uma interface (Fig. 29) que centraliza os sistemas de controle e aquisição de dados, assim como permite ao usuário a inicialização dos sistemas.



Figura 29 – Interface gráfica de integração dos sistemas.

3.6 Sistema de Gases

A definição da linha de gases do reator foi um ponto chave do trabalho. Na carbonização convencional e na torrefação, o gás precisa garantir uma atmosfera inerte para o sistema. Na carbonização sob pressão, o gás aplicado precisa também pressurizar o sistema. Na ativação física de carvão, o gás aplicado a altas temperaturas deve ter uma ação oxidante. No caso da saída dos gases, foi importante permitir a recuperação de condensáveis e a limpeza dos gases não condensáveis, de forma a não danificar os componentes envolvidos e evitar ao máximo a diminuição da qualidade do ar do laboratório.

3.6.1 Entrada de gases

Os componentes instalados na entrada do sistema são:

- **Cilindro de gás nitrogênio:** instalado para garantir uma atmosfera inerte na Câmara de Reação. Pode ser substituído por gás como, por exemplo, o argônio;
- **Válvula reguladora de pressão:** instalada diretamente no cilindro de nitrogênio com o intuito de definir a pressão de saída do cilindro;
- **Válvula solenóide:** possibilita a abertura ou o fechamento do fluxo de gás de acordo com as quantidades necessárias para garantir a atmosfera inerte para os processos do reator, tendo acionamento elétrico da parte mecânica da válvula;
- **Tubulação:** responsáveis por conduzir o gás do cilindro ao reator.

Nos ensaios realizados e apresentados na seção 4, a tubulação utilizada foi de PVC. Essa solução inicial foi empregada por motivos de flexibilidade e facilidade da conexão. Em trabalhos futuros o ideal é a utilização de uma tubulação de cobre que seja aquecida antes da entrada do gás na Câmara de Reação, já que o gás sai do cilindro a uma baixa temperatura comparada às temperaturas dos processos do reator. Ainda mais com a eventual diminuição de temperatura por efeito Joule-Thomson pelo estrangulamento do gás, é importante que o gás seja aquecido ainda antes de sua entrada no reator. Uma proposta de configuração para aproveitamento do calor perdido é apresentada na Figura 30.

3.6.2 Saída de gases

A linha de saída dos gases conta com componentes que permitem a condensação dos gases de saída do processo, assim como a filtragem dos gases não condensáveis. Esse maior controle visa permitir a análise quantitativa dos rendimentos de produtos em massa, líquido e gás, o que é importante para a caracterização desses processos.



Figura 30 – Montagem da estrutura para aproveitamento de calor do reator na entrada de gases.

Para isso, os seguintes componentes foram instalados:

- **Condensador:** trocador de calor de tubo duplo com escoamento contracorrente auxiliado por uma bomba de aquário que utiliza água de outro recipiente para evitar desperdícios. O aparelho é de vidro para a melhor identificação de incrustações e para a evitar a corrosão causada pelas frações gasosas da pirólise;
- **Frasco lavador de gases:** utilizado com a função de remover os gases condensáveis e algumas substâncias dos gases que o atravessem;
- **Sonda lambda:** utilizado na medição de gás oxigênio na saída do reator para o controle da atmosfera da Câmara de Reação;
- **Bico de Bunsen:** utilizado para a queima dos gases combustíveis que passem por toda a linha de saída de gases;
- **Tubulação:** responsável pelo encaminhamento dos gases do reator até os demais componentes.

Assim como no caso da entrada de gases, o PVC foi empregado como tubulação.

3.6.3 Controle

O controle de O_2 se dá pela injeção de N_2 (ou outro gás inerte) na câmara de reação por um sistema liga-desliga. Uma sonda lâmbda foi instalada na saída do reator (após o frasco lavador) para a medição do oxigênio, quando a concentração medida é maior que a concentração definida, a válvula solenóide instalada no cilindro de nitrogênio é acionada permitindo passagem de gás.

3.6.4 Ensaios de validação

Na Seção serão apresentados os ensaios de ajuste e os ensaios finais realizados com biomassa. Péletes de eucalipto (com folhas) foram utilizados em todos os ensaios para efeito de comparação. Os ensaios de ajuste se deram com injeção temporizada de gases, enquanto nos ensaios finais as amostras foram submetidas a diferentes concentrações de O_2 pré-definidas.

Antes de cada ensaio, a massa úmida inicial (m_0) da amostra foi medida em balança analítica de resolução 0,0001 g e comparada com a massa seca da amostra medida logo após o fim dos experimentos (m_f). Com esses dados, foi possível calcular o rendimento gravimétrico em base úmida (RG_{bu} %) de acordo com a Equação 3.1, servindo como indicador para a comparação entre os processos realizados.

$$RG_{bu}(\%) = 100 \cdot \frac{m_f}{m_0} \quad (3.1)$$

O teor de materiais voláteis determinado para as amostras torrificadas a 5% para a amostra *in natura* (Fig. 31) de acordo com a Equação 3.2. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) e se deram em base seca conforme a norma ISO 18123 (2015), num forno tipo mufla por 7 minutos na temperatura de 900 °C.

$$MV(\%) = 100 \cdot \frac{m_f}{m_0} \quad (3.2)$$



Figura 31 – Amostras preparadas para o ensaio de teor de voláteis.

A Figura 32 apresenta o reator com seus sistemas montados para a realização de um ensaio de torrefação, assim como o cadinho carregado e os péletes ao final de um ensaio.

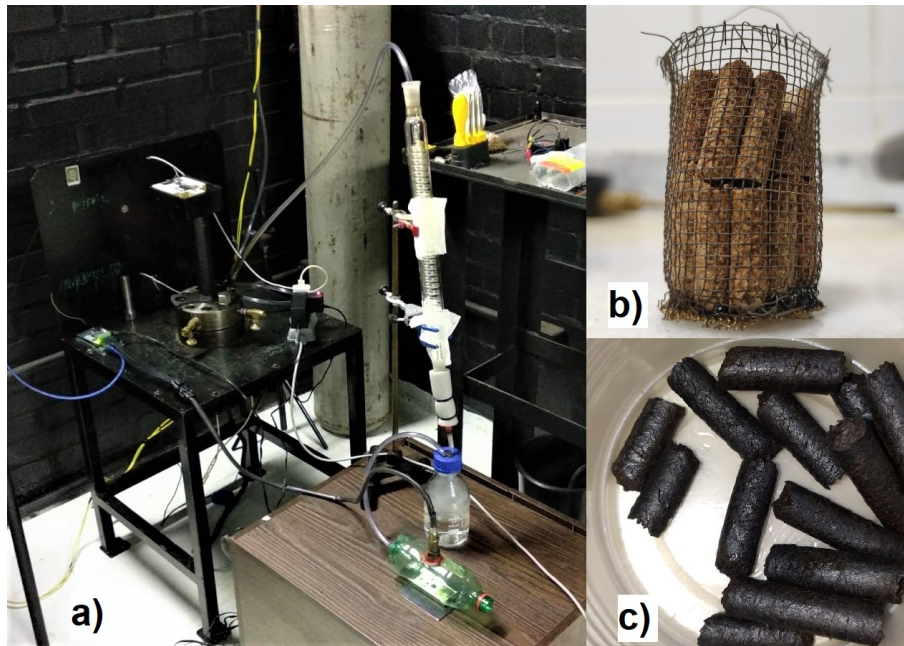


Figura 32 – Imagens do a) reator; b) cadinho com péletes e c) produto torreficado obtido.

3.7 Modelagem numérica da transferência de calor

O desenvolvimento de um modelo do comportamento da transferência de calor no reator apresenta vantagens significativas para uma melhor compreensão de seu funcionamento, uma vez que um modelo validado pode ser utilizado para apresentar detalhes do andamento de seus processos e indicar parâmetros a ser alterados no sistema, reduzindo, assim, o tempo de análises de projetos futuros a ser desenvolvidos e os eventuais custos de testes realizados.

As simulações foram realizadas com o auxílio do *software COMSOL Multiphysics®*, na versão 5.5, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para a solução das equações dispostas no modelo. O programa suporta os mecanismos fundamentais de transferência de calor (condução, convecção e radiação), além de poder combinar esse estudo com outras análises físicas como o escoamento de fluidos, por exemplo (COMSOL, 2018).

Como indicado por (CIESIELSKI et al., 2014), o COMSOL é uma plataforma capaz de integrar, com certa simplicidade, uma variedade de simulações de fenômenos físicos com complexas geometrias. Para o estudo da transferência de calor no programa, foram adotados os seguintes passos:

1. **Construção da geometria:** pela simetria do reator cilíndrico foi possível trabalhar com a dimensão espacial de simetria axial, como mostrado na Figura 33;
2. **Caracterização do material:** foram adicionados os dados do datasheet e da condutividade térmica do aço *XN26TW* (copo do reator), do nicromo (resistência

elétrica) e da manta cerâmica (isolamento da resistência); e para o fluido do interior do reator foi escolhido o ar;

3. **Seleção da interface física:** foi selecionado o *escoamento laminar não-isotérmico*, que combina a equação de calor convectiva com o fluxo laminar num domínio de fluido, permitindo através de sua interface a adição de domínios sólidos para a transferência de calor por condução e radiação;
4. **Definição do estudo:** foram realizados estudos em regime transiente, de acordo com tempo aplicado nos ensaios realizados no laboratório;
5. **Definição da malha:** foram escolhidos diferentes refinamentos de malha para a comparação entre seus resultados, como apresentado na Figura 34;
6. **Tratamento de dados:** os dados foram tratados no programa, de acordo com as análises a ser utilizadas;

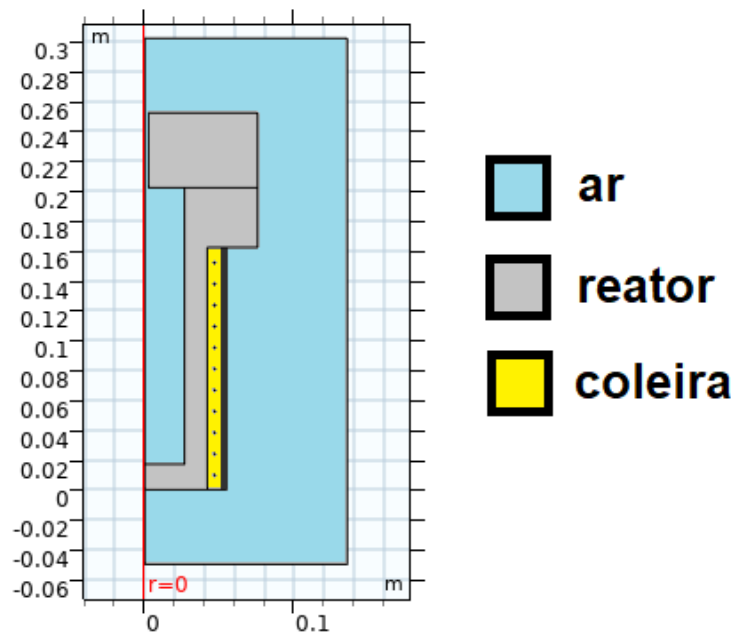


Figura 33 – Geometria do reator com as diferentes regiões de interesse explicitadas.

3.7.1 Condutividade térmica dos materiais do reator

Para a modelagem térmica do reator, a caracterização dos materiais conta com a configuração do coeficiente de condutividade térmica deles. Sendo assim, é importante que sejam definidos esses valores, seja de forma experimental ou a partir da consideração de valores obtidos na literatura.

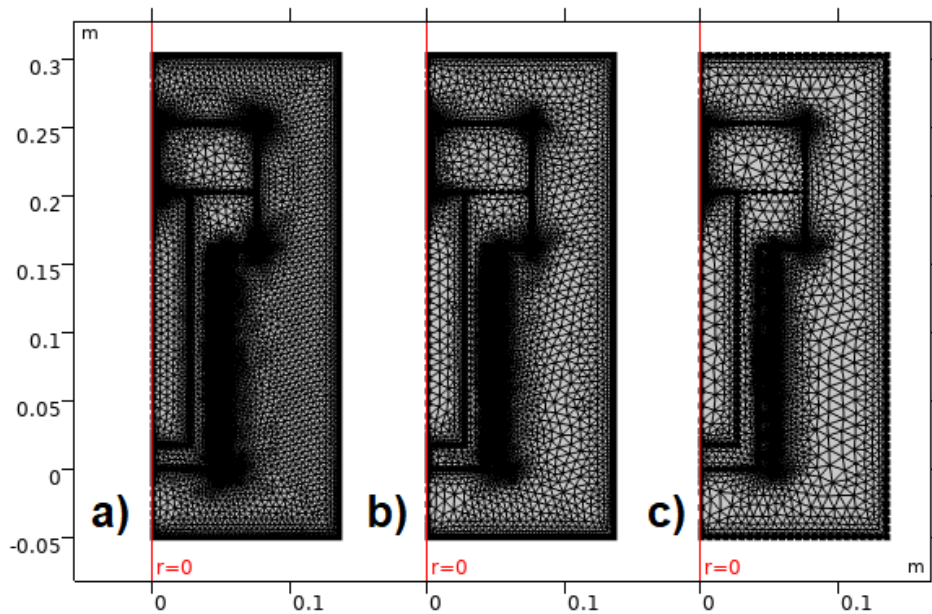


Figura 34 – Malhas a) fina; b) grossa e c) normal.

O coeficiente de condutividade térmica de um material representa a suscetibilidade deste de conduzir calor, e é dado pela razão entre uma taxa de calor e a multiplicação de uma unidade de área por uma unidade de diferença de temperatura, no S.I., a unidade desse coeficiente é $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. No caso dos sólidos, a condução de calor acontece devido a efeitos de ondas de vibração de rede e por meio do movimento livre dos elétrons (CENGEL; GHAJAR, 2011). Nos metais puros, a alta condutividade térmica é devida, principalmente, à contribuição do mecanismo eletrônico, uma vez que os elétrons estão em grande número, possuem velocidades mais altas e não são facilmente dispersos; já no caso de metais impuros e ligas, como o aço *XN26TW*, é observada uma maior dispersão e eventual redução da eficiência do movimento de elétrons e, conseqüentemente, a condutividade é reduzida, tornando os efeitos de vibração de rede e de movimento livre de elétrons comparáveis (MORA, 2010).

O estudo de (ENDO; SHIMA; SUSU, 2010), calculando a condutividade térmica de ligas Ni-Cr, como o caso do aço *XN26TW*, mostrou que o aumento da temperatura leva a um aumento na condutividade térmica desses materiais. Em seu estudo, foi proposta uma equação que permite calcular a condutividade da liga em função da temperatura e da fração molar de cromo da liga.

Sendo encontrada a condutividade térmica do aço constituinte do copo e da tampa do reator no *datasheet* indicado na Tabela 3, foram consultados outros *datasheets* para que fosse determinada a condutividade térmica dos demais materiais aplicados no modelo (resistência do tipo coleira). Em geral, os fios de resistências do tipo coleira são fios de ligas de níquel-cromo, e seus isolantes térmicos são constituídos de cerâmica esteatita. Os

Temperatura (°C)	Condutividade ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
150	15,0
300	17,8
500	21,8
600	23,8
Fonte	NAS Stainless Steel Strip MFG (2019)

Tabela 3 – Condutividade térmica para diferentes temperaturas do aço do reator.

Material	Condutividade ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Fonte
Fio de liga 80/20 Ni-Cr	11,3	Hyndman Inc. (2001)
Esteatita	2,9	Morgan Advance Materials (2009)

Tabela 4 – Condutividade térmica dos materiais constituintes da coleira de aquecimento do reator

valores de condutividade térmica desses materiais são apresentados na Tabela 4.

Restando apenas o ar, suas propriedades foram adicionadas de acordo com a biblioteca do programa, sendo adicionado apenas o coeficiente de expansão adiabática (γ) com o valor de 1,4.

3.7.2 Definições da física do modelo

O problema de transferência de calor é resolvido no COMSOL pela equação de convecção-difusão, representada de forma genérica pela Equação (3.3), onde u é o escalar transportado (no caso, a temperatura), β é o coeficiente de convecção, c é o coeficiente de difusão e F é um termo de fonte.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \beta \cdot \nabla u = \nabla \cdot (c \nabla u) + F \quad (3.3)$$

A interface selecionada de escoamento laminar não-isotérmico trabalha com equações de transferência de calor conjugada considerando a diferença de densidade no fluido por conta do campo de temperatura não homogêneo.

Para o fornecimento de calor para o reator, foi selecionada a condição de *fonte de calor nos contornos* dos fios da resistência, inserindo a taxa P_b a ser utilizada na Equação (3.4), onde A é a área dos contornos selecionados.

$$Q_b = \frac{P_b}{A} \quad (3.4)$$

Na interface entre sólido e fluido a condição de *não deslizamento* foi selecionada, o que significa que a velocidade do fluido é nula nesses pontos. Nos limites da camada de ar

que envolve o reator foi selecionada a condição de *limite aberto*, com a qual o calor pode entrar ou sair do domínio sem requisitos de definição de pressão e velocidade.

Ao considerar a irradiação térmica da superfície da coleira e do reator para o ambiente, a transferência de calor tem contribuição da Equação (3.5), em que ϵ é a emissividade do material, σ a constante de Stefan-Boltzmann e T_{amb} a temperatura ambiente definida.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \epsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.5)$$

3.7.3 Simulações realizadas

Considerando a potência máxima de aquecimento de $1,6 \text{ kW}$, uma simulação foi realizada avaliando a temperatura num ponto posicionado na parte interna (Ponto 1) e outro na parte externa do reator (Ponto 2). Um ensaio experimental foi realizado com a medição de temperatura nessas mesmas regiões. Os pontos em questão são apresentados na Figura 35.

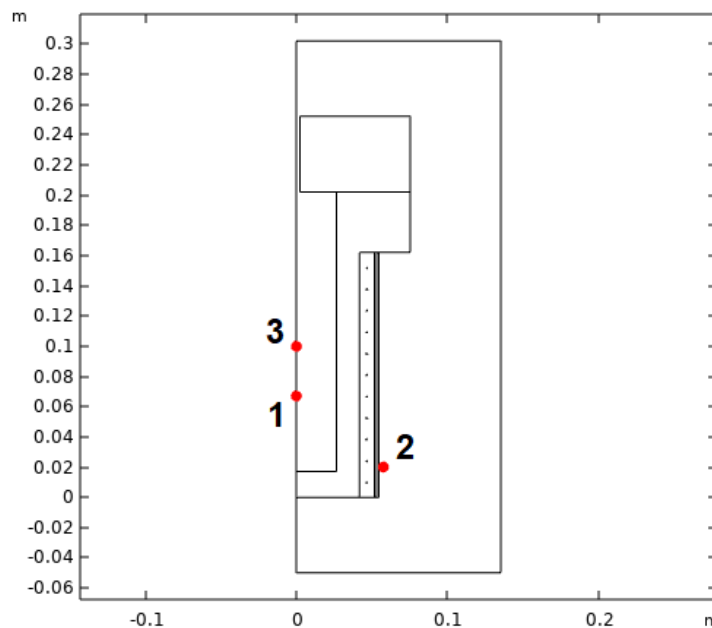


Figura 35 – Pontos de medição da temperatura.

Para a simulação da temperatura controle de potência, foi utilizada a interface de *eventos* no próprio programa. Assim, foram definidos dois estados discretos de atuação da potência (ligado e desligado). A temperatura de referência do patamar foi medida na parte interna do reator (Ponto 3). O indicador de estado para desligamento é a temperatura estar acima do patamar objetivado, e o oposto para a ligação. Nessa simulação a potência foi de $1,05 \text{ kW}$, valor que se adequou à taxa de aquecimento obtida experimentalmente.

Levando em consideração tais parâmetros, foi possível obter os campos e gráficos temperatura no reator para cada um dos modelos.

4 Resultados

4.1 Implementação dos Sistemas

4.1.1 Sistema de aquecimento

O aquecimento controlado do reator foi alcançado ao longo do trabalho e a Figura 36 apresenta curvas de ensaios com controle da temperatura e da taxa de aquecimento. Observa-se que as temperaturas de patamar de 200 e 275 °C foram atingidas a uma taxa de aquecimento muito próxima (entre 7,5 e 8,0 °C · min⁻¹).

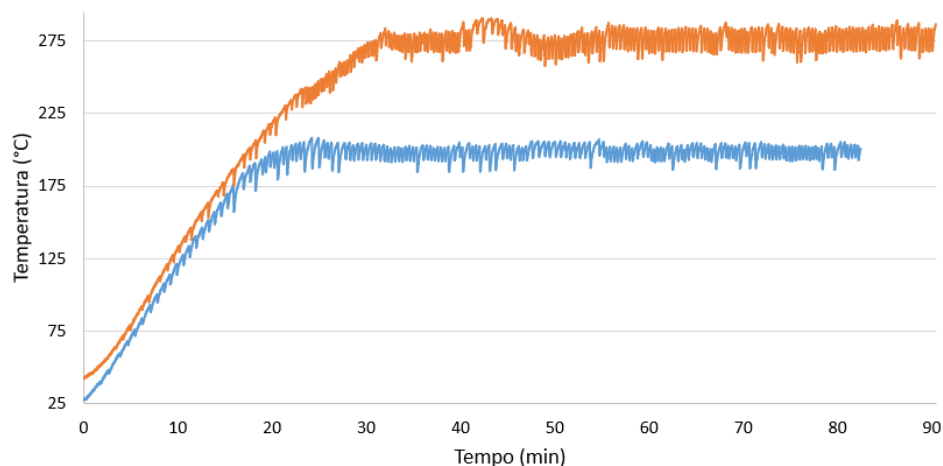


Figura 36 – Aquecimento do reator a uma mesma taxa de aquecimento para dois patamares diferentes.

Como a injeção de nitrogênio à temperatura ambiente promove um determinado resfriamento na atmosfera da câmara de reação, quedas de temperatura da ordem de 10 a 20 °C são observadas. Após alguns segundos, a temperatura medida pelo termopar volta a ser a temperatura de antes da injeção de gás nitrogênio. A Figura 37 apresenta o comportamento da temperatura ao longo do processo de torrefação com a injeção de nitrogênio, assim como apresenta o gráfico de temperaturas, obtido no trabalho de (DIREKTOR et al., 2020), em que é simulada a temperatura da biomassa na região de entrada de matéria-prima a 100 °C em um reator de torrefação de leito fluidizado carregado de forma cíclica.

Dado o rápido retorno da temperatura ao patamar estabelecido, entende-se que o processo termoquímico não é descaracterizado pelas quedas de temperatura, sendo considerada a temperatura média do patamar do processo para a análise dos ensaios.

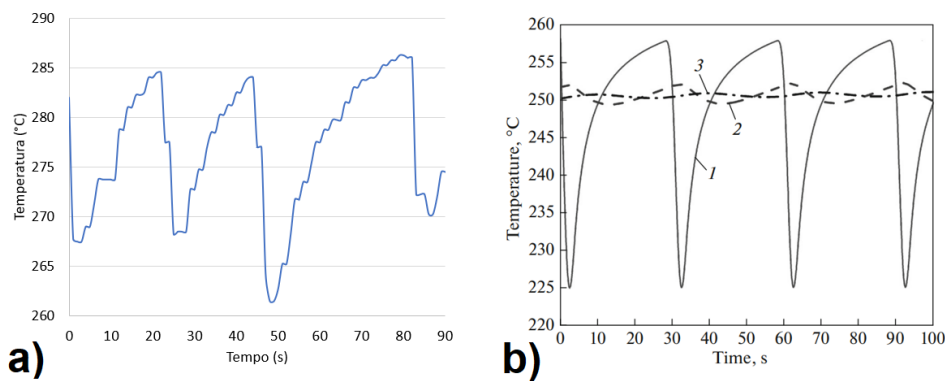


Figura 37 – Comportamento da temperatura por: a) injeção de gás no reator deste trabalho; b) entrada de biomassa no reator do trabalho de (DIREKTOR et al., 2020).

4.1.2 Sistema de Gases

O sistema de entrada e saída de gases cumpriu seu objetivo, possibilitando a realização dos ensaios com atmosfera controlada apresentados na seção 4.2.

A injeção de gases foi executada, tanto com intervalos definidos (injeção temporizada), quanto a partir da concentração de oxigênio (injeção controlada). A figura 38 apresenta o controle de oxigênio ao longo de ensaios a diferentes concentrações pré-definidas. Percebe-se que no ensaio a 5% acontecem mais atuações da válvula solenóide de que no ensaio a 12%.

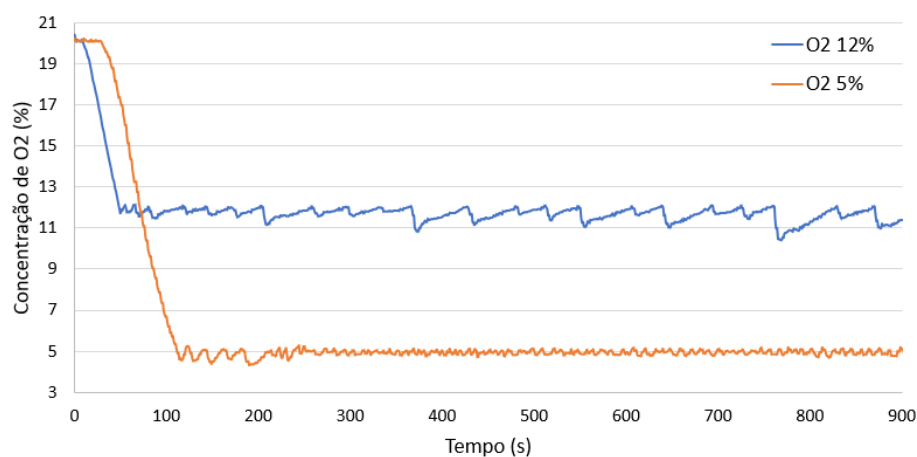


Figura 38 – Concentração controlada de O_2 .

Na saída foi implementado um sistema de recuperação de gases condensáveis, entretanto medições para o cálculo do balanço de massa do processo não puderam ser feitas, pelo fato de o sistema não estar completamente fechado e porque uma baixa quantidade de condensáveis foi obtida em relação ao volume do sistema. A Figura 39 mostra a com-

paração entre o frasco com água destilada, antes e depois da realização de uma série de ensaios.

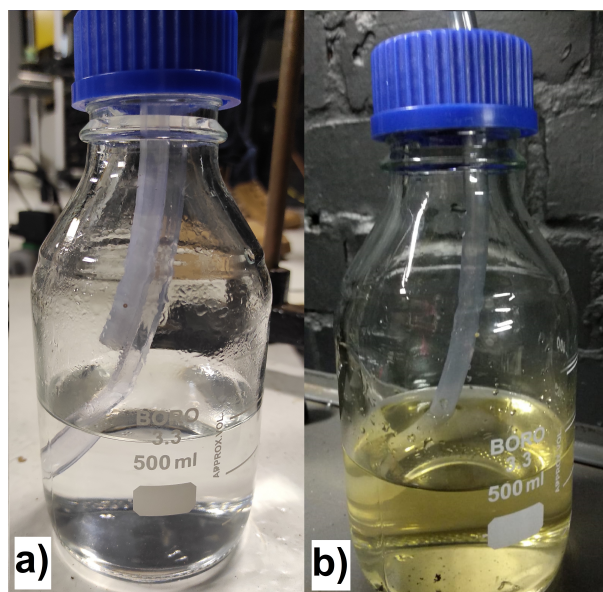


Figura 39 – Frasco lavador com água destilada a) antes de ensaios e b) depois de alguns ensaios.

4.1.3 Sistema de Acompanhamento da Perda de Massa

Muitos testes foram realizados com medição da perda de massa ao longo do processo, sendo importantes na identificação de problemas relacionados a materiais e estrutura escolhidos. As principais adversidades se deram pela injeção de gás na Câmara de Reação, já que a força do gás injetado exerce significativa influência nas medidas da célula de carga, causando instabilidade na medição da massa e descalibração na célula de carga. Em alguns ensaios, ocorreu o desprendimento da haste da célula de carga e a queda do cadinho ou de alguns péletes no fundo do reator. Pelo movimento gerado na atmosfera do reator, em alguns casos, o cadinho ficou enganchado no termopar.

Um dos ensaios em que o acompanhamento da perda de massa se deu de forma coerente com o processo de torrefação é apresentado na Figura 40. Variações bruscas na medição da massa, causadas pela injeção de gás, podem ser observadas. Também é possível observar que, em algumas regiões, acontecem elevações e picos na massa medida pela célula de carga, o que não é esperado, já que a massa sólida da amostra sempre diminui.

Um artifício que pode ser utilizado para suavizar a curva de perda de massa é a aplicação da média móvel simples (MMS). A Figura 41 apresenta a perda de massa percentual (termogravimetria - TG) com aplicação de janelas de 100, 300 e 500 medições em comparação com a massa medida a cada segundo. Percebe-se que com um maior

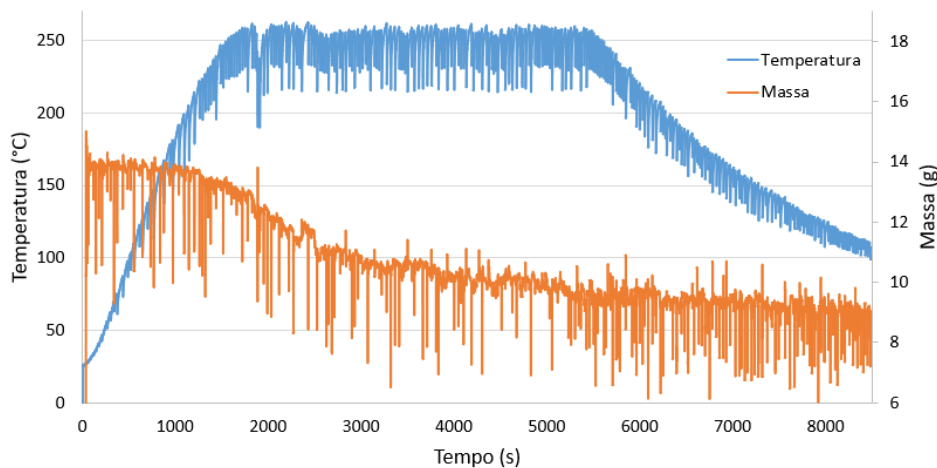


Figura 40 – Temperatura e massa ao longo do tempo para um ensaio de torrefação.

número de dados na janela a curva mais suavizada, por mais que uma perda de informação atrelada à média possa acontecer.

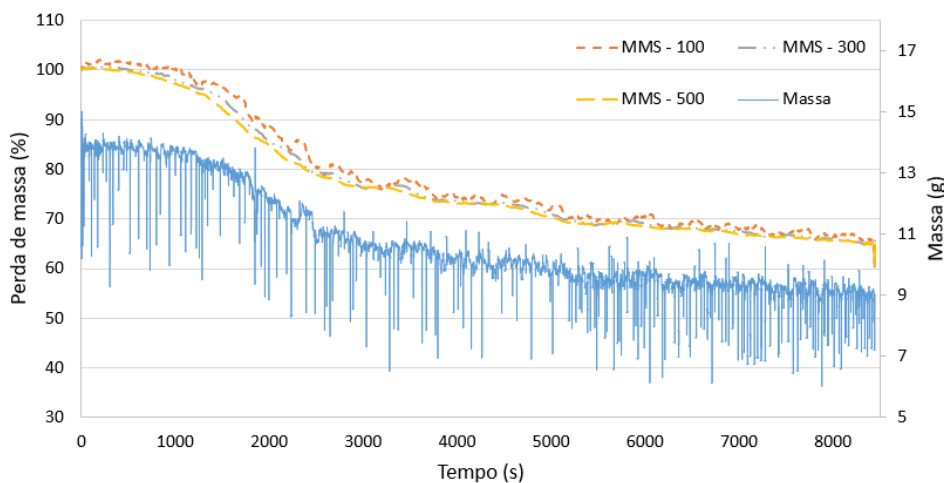


Figura 41 – Curvas de massa e perda de massa percentual com diferentes janelas de média móvel.

Como apontado por (CHEN et al., 2004), pela complexidade química das reações de degradação térmica e por erros experimentais, a curva de termogravimetria pode conter bastante ruído e esse ruído tende a ser amplificado ao se calcular a curva de termogravimetria derivada (DTG), fazendo com que técnicas de suavização de curvas tenham grande importância na análise térmica diferencial. A Figura 42 apresenta a curva TG com janela de 500 (TG - 500), a curva DTG obtida diretamente pela curva TG (DTG 500), e a curva suavizada com média móvel com janela de 500 (MMS 500). Na figura, pela curva MMS 500, é possível identificar o pico de degradação exotérmica entre 1000 e 2000 segundos, que acontece devido a reações exotérmicas na amostra de madeira (SILVEIRA et al., 2019).

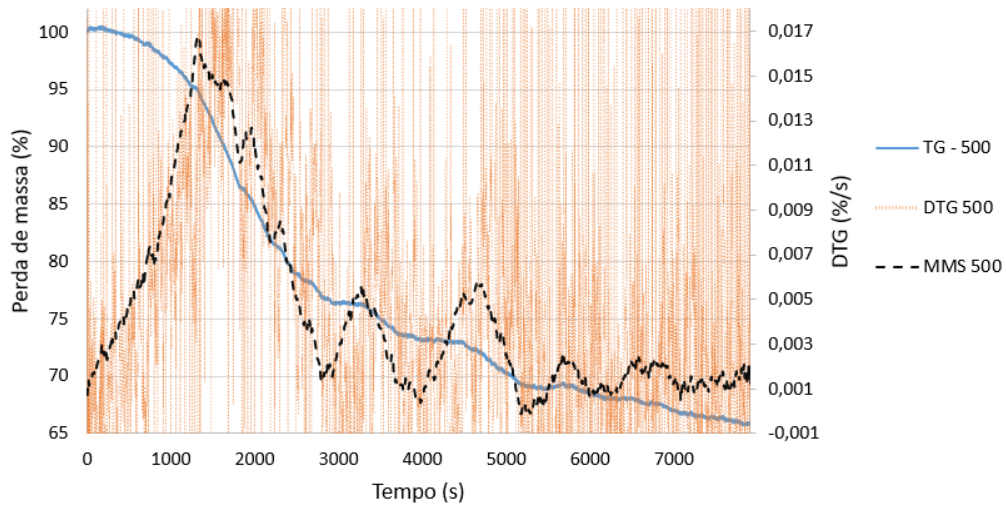


Figura 42 – Curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG).

4.2 Resultados experimentais dos sistemas implementados

4.2.1 Ensaios de ajuste

Considerando um desenvolvimento parcial dos sistemas do reator, uma série de ensaios de ajuste foi realizada. Os resultados desses ensaios foram importantes na identificação de problemas associados ao funcionamento do reator, de forma que alterações fossem propostas.

4.2.1.1 Ensaio 1

Um primeiro ensaio com biomassa foi realizado a uma temperatura média de patamar de $197,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 60 minutos. A taxa de aquecimento no ensaio foi de $4,6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, sendo adicionado gás nitrogênio durante 2 segundos a cada 1 minuto.

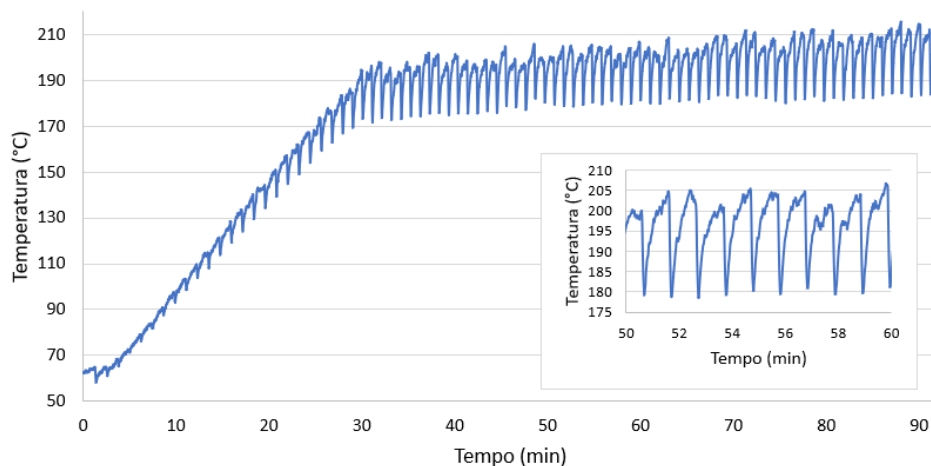


Figura 43 – Temperatura ao longo do Ensaio 1.

Conforme pode ser visualizado na Figura 43, do início ao final do patamar, aconteceu um considerável aumento de temperatura, já que o início do processo se deu à temperatura de $197,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o final se deu à temperatura de $209,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima atingida foi de $215,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tal característica deveu-se à interferência da injeção de gás na temperatura interna do reator, o que influenciou no controle da temperatura. Quedas de temperatura da ordem de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aconteceram por conta da injeção de N_2 .

O resfriamento do reator após o fim dos 60 minutos de patamar se deu à temperatura ambiente e com a interrupção da injeção de gás nitrogênio. Tal medida exerceu uma forte influência no produto final obtido, já que um aspecto de carbonização foi observado na biomassa (Fig. 46). Além disso, o rendimento gravimétrico em base úmida (RG_{bu}) foi de $63,15\%$, um valor incoerente para a degradação em um processo de torrefação branda.

4.2.1.2 Ensaio 2

Um segundo ensaio foi realizado com injeção de gás nitrogênio durante 2 segundos a cada 1 minuto e com ajustes nos parâmetros de controle do PID. O patamar de torrefação foi de 70 minutos na temperatura média de $198,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. A taxa de aquecimento se manteve próxima à taxa do Ensaio 1, sendo de $4,7\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

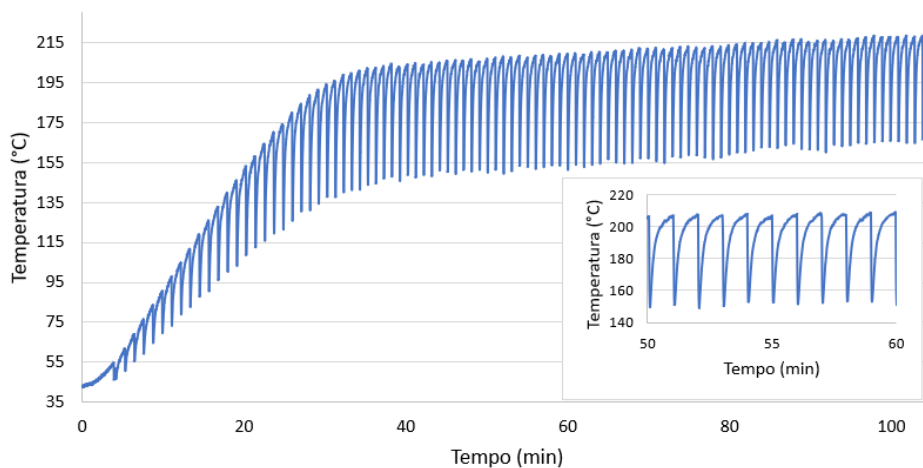


Figura 44 – Temperatura ao longo do Ensaio 2.

No Ensaio 2, também se observou uma considerável diferença de temperatura entre o início do patamar ($200,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o final do processo ($218\text{ }^{\circ}\text{C}$), sendo a temperatura máxima de $218\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura ao longo do processo pode ser visualizada na Figura 44.

Para evitar a carbonização durante o resfriamento, a injeção de N_2 foi mantida até a temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mesmo assim, uma forte degradação para torrefação branda foi

percebida (Fig. 46), tanto no próprio aspecto visual da biomassa, quanto no RG_{bu} , que ficou em 77,11%.

4.2.1.3 Ensaio 3

Com a alta degradação observada nos ensaios 1 e 2, presumiu-se que alguns orifícios na tampa do reator pudessem estar causando uma entrada de O_2 na câmara de reação, promovendo uma maior oxidação da biomassa. Por conta disso, uma solução tomada foi a de vedar tais orifícios para a realização do Ensaio 3.

O Ensaio 3 foi então conduzido a uma temperatura média de patamar de $194,4\text{ }^\circ\text{C}$, com taxa de aquecimento de $5,5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e injeção de gás nitrogênio durante 2 segundos a cada 60 segundos. A temperatura inicial do patamar se deu a $195,5\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a temperatura final foi, assim como a máxima, de $217,25\text{ }^\circ\text{C}$. A queda de temperatura pela injeção de N_2 foi da ordem de $60\text{ }^\circ\text{C}$. O resfriamento se deu com a continuidade na injeção de nitrogênio até $100\text{ }^\circ\text{C}$. A figura 45 apresenta a temperatura ao longo do processo.

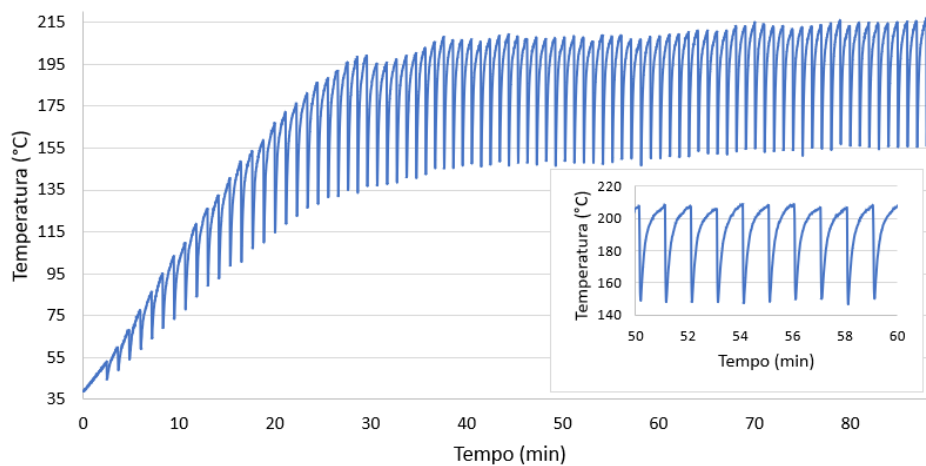


Figura 45 – Temperatura ao longo do Ensaio 3.

Diferentemente dos ensaios anteriores, um rendimento gravimétrico mais compatível com a temperatura do processo foi atingida, sendo ela de 86,09%. Nesse caso, os péletes ficaram visualmente com um bom aspecto, como pode ser observado na Figura 46

4.2.2 Ensaio 4

Partindo do aspecto coerente obtido no Ensaio 3, um ensaio a uma temperatura mais elevada foi realizado. Com taxa de aquecimento de $4,5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e patamar de 60 minutos, o Ensaio 4 se deu na temperatura média de patamar de $209,8\text{ }^\circ\text{C}$, tendo atingido a temperatura máxima de $233,5\text{ }^\circ\text{C}$. O mesmo comportamento de subida de temperatura desde o início do patamar ($213,25\text{ }^\circ\text{C}$) até o final do patamar ($230\text{ }^\circ\text{C}$) foi observado. O gráfico de temperaturas do Ensaio 4 pode ser visualizado na Figura 47. Nitrogênio foi



Figura 46 – Péletes obtidos após a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3; d) Ensaio 4; e) Ensaio 5 em comparação com os péletes f) *in natura*

injetado durante 2 segundos a cada 1 minuto, o que promoveu uma queda de temperatura da ordem de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ em cada injeção.

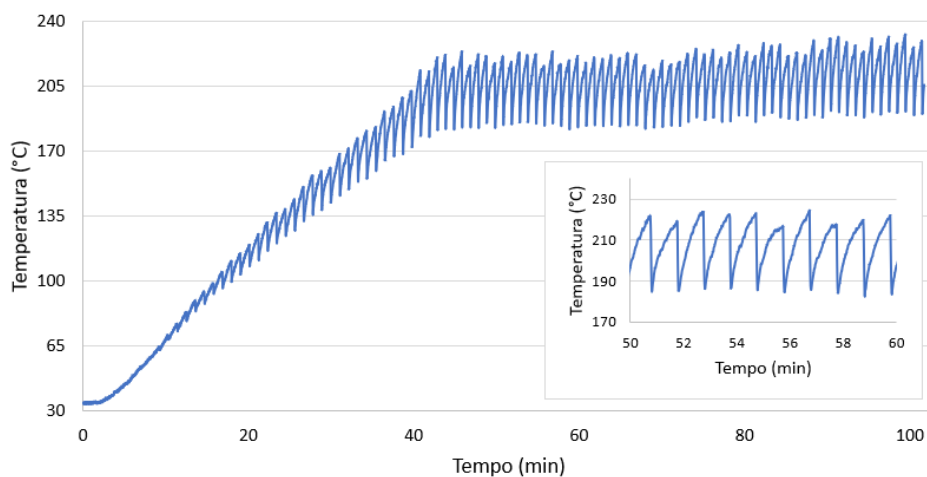


Figura 47 – Temperatura ao longo do Ensaio 4.

O Ensaio 4 apresentou um maior RG_{bu} (78,07%) e, visualmente, um aspecto de maior degradação quando comparado ao Ensaio 3.

4.2.3 Ensaio 5

Um ensaio com condições parecidas com as estabelecidas no Ensaio 4 foi realizado. Alterações foram feitas nos parâmetros de controle com o intuito de ajustar a taxa de

aquecimento e a variação de temperatura entre o início e o final do patamar. Apesar disso, poucas mudanças foram observadas.

O Ensaio 5 se deu com patamar de 60 minutos, temperatura inicial do patamar de $213,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura final de $226,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura média de $206,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima atingida foi de $226,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A taxa de aquecimento foi de $4,7\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. A injeção de nitrogênio aconteceu por 1 segundo a cada 30 segundos, ocasionando quedas de temperatura da ordem de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. As temperaturas ao longo do processo podem ser visualizadas na Figura 48.

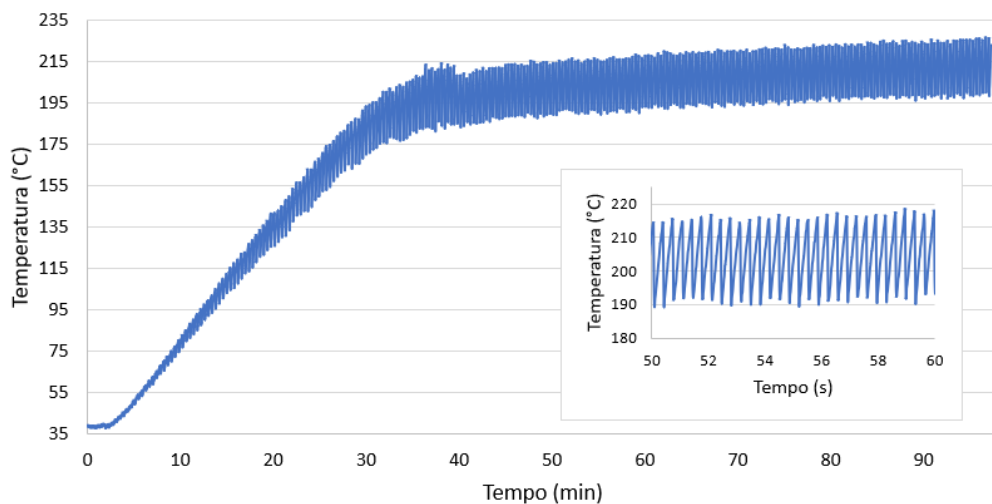


Figura 48 – Temperatura ao longo do Ensaio 5.

O rendimento gravimétrico em base úmica da amostra no Ensaio 5 ($78,82\%$) foi semelhante à do Ensaio 4, assim como o aspecto visual da biomassa, o que indicou uma uniformidade no processo, mesmo com a diferença na injeção de N_2 .

Após esses ensaios, percebeu-se que um aprimoramento no PID seria necessário para aproximar a taxa de aquecimento da faixa de 7 a $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, que é mais utilizada em ensaios de torrefação. Evidenciou-se também a necessidade de diminuir a variação de temperatura entre o início e o final do patamar, que chegou a variações de até mais de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que tem potencial de descaracterizar um processo de torrefação, já que essa faixa de temperatura é suficiente para passar de uma torrefação branda para uma moderada, por exemplo.

Observou-se ainda que a injeção de gás nitrogênio e a consequente queda de temperatura associada a essa injeção exercem influência sobre o controle, como demonstrado na Figura 49, que compara a temperatura do Ensaio 5 com a de um ensaio de aquecimento do reator, sem injeção de nitrogênio (e sem biomassa), com os mesmos parâmetros de controle. No caso do ensaio sem injeção, uma maior taxa de aquecimento e uma menor variação entre a temperatura do início e do final do patamar são observadas.

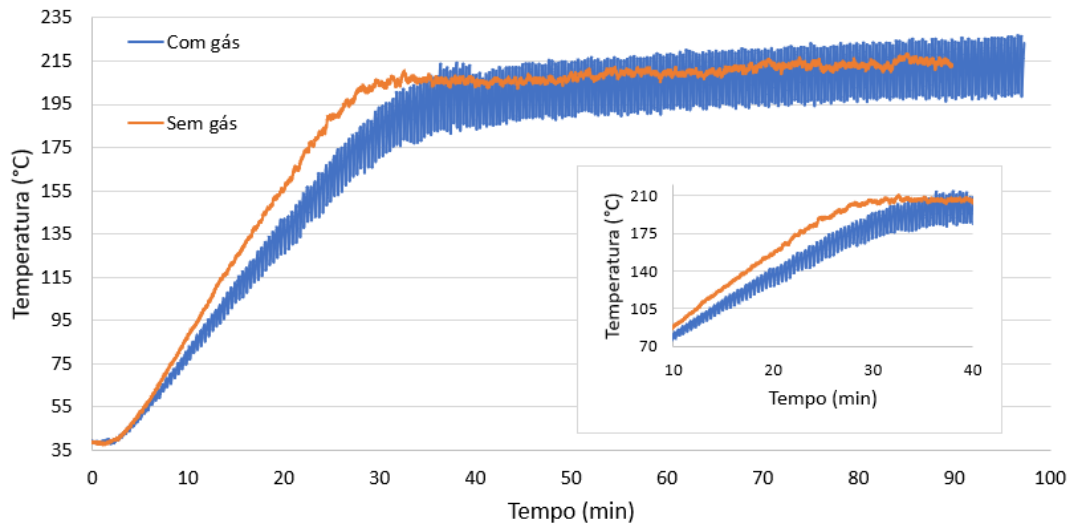


Figura 49 – Comparação da temperatura com e sem injeção de gás.

4.2.4 Ensaios finais

A partir das mudanças realizadas, uma série de ensaios finais foi realizada. Os resultados obtidos serviram para atestar o funcionamento do equipamento construído enquanto reator para processos termoquímicos. Os ensaios foram realizados com tempo de patamar de 60 minutos, nas temperaturas de 200, 250 e 275 °C e taxa de aquecimento entre 6,5 e 9 °C · min⁻¹ para efeitos de comparação. Todos os ensaios finais se deram com injeção controlada de gás nitrogênio com a medição da concentração de O₂ na linha de saída de gases. Nos ensaios com controle de injeção de N₂, percebeu-se que as quedas de temperatura são variadas, diferentemente do que acontecia nos ensaios de ajuste (injeção temporizada uniforme). Esse traço se deve aos diferentes tempos de acionamento da solenóide com a injeção controlada.

4.2.4.1 Ensaio 6

O Ensaio 6 foi realizado com taxa de aquecimento de 8,6 °C · min⁻¹ e a temperatura média no patamar foi de 248,1 °C (torrefação moderada). A concentração de O₂ foi definida para 12%. A Figura 50 apresenta a temperatura ao longo do tempo.

Podem ser observadas quedas de temperatura de 30 °C nas injeções mais rápidas de N₂ e de 45 °C nas injeções mais prolongadas.

Os péletes torrificados apresentaram um aspecto visual coerente com o processo e um rendimento gravimétrico em base úmida de 69,82%.

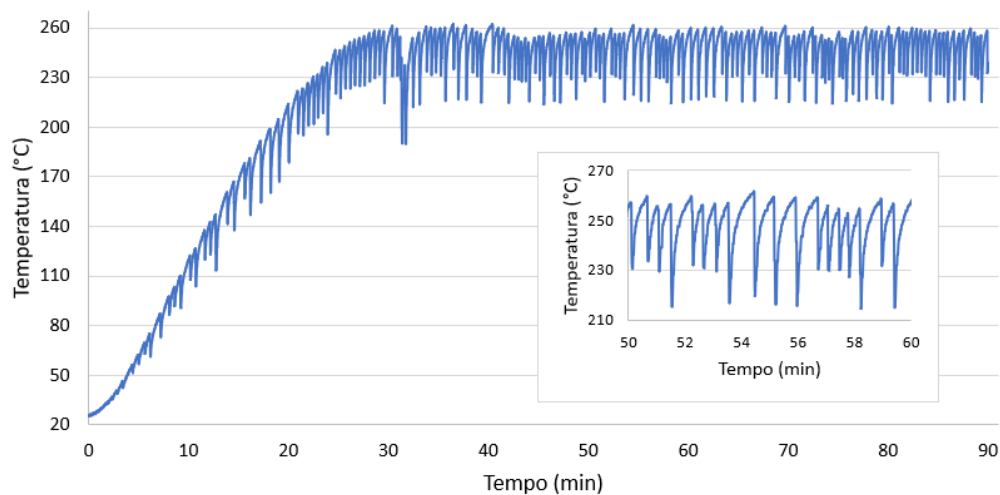


Figura 50 – Temperatura ao longo do Ensaio 6.

4.2.4.2 Ensaio 7

No Ensaio 7, a taxa de aquecimento foi de $7,8 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ e a temperatura média no patamar foi de $198,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (torrefação branda). A concentração de O_2 empregada foi de 10%. O comportamento da temperatura no decorrer do ensaio pode ser visualizado na Figura 51.

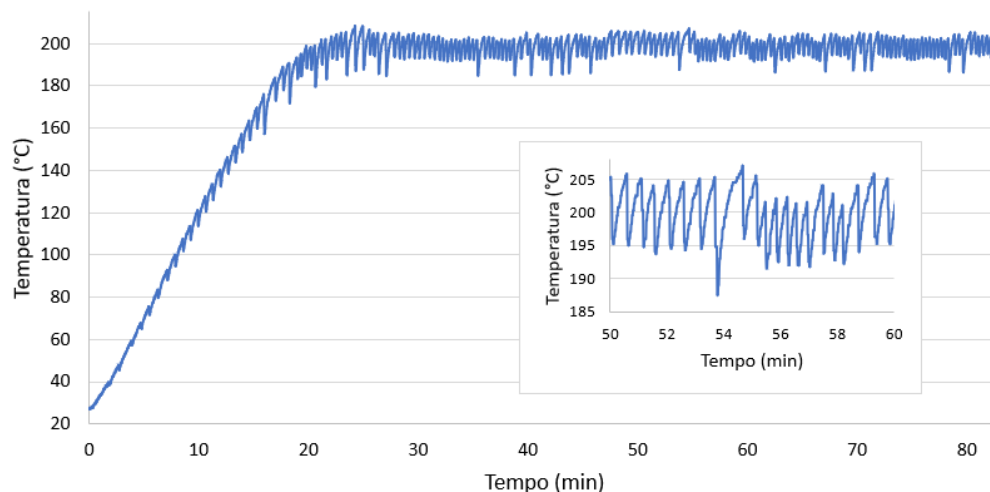


Figura 51 – Temperatura ao longo do Ensaio 7.

Por conta das injeções de N_2 , quedas de temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ podem ser observadas.

O RG_{bu} foi de 86,44%, com o produto torreficado obtido tendo bom aspecto visual para a torrefação branda.

4.2.4.3 Ensaio 8

O Ensaio 8, de torrefação severa a temperatura média no patamar de $276,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, foi realizado com taxa de aquecimento de $7,6\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. A concentração de O_2 foi definida para 10%, assim como no caso do Ensaio 7. A Figura 52 apresenta a temperatura ao longo do processo.

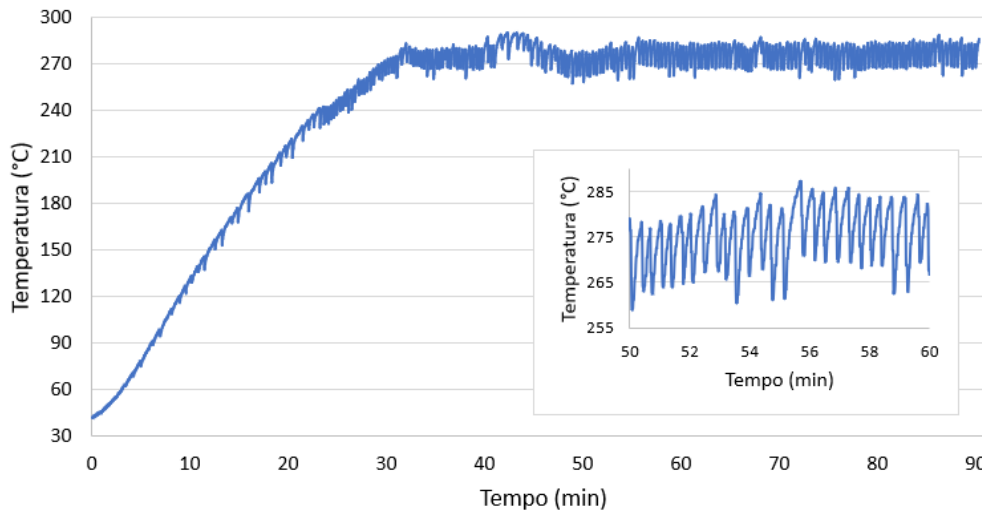


Figura 52 – Temperatura ao longo do Ensaio 8.

Foram observadas quedas de temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em decorrência das injeções mais prolongadas de N_2 .

Os péletes torreficados apresentaram um aspecto visual de uma torrefação mais intensa que a dos ensaios anteriores, ficando com RG_{bu} de 57,83%.

4.2.4.4 Ensaio 9

O Ensaio 9 foi realizado com taxa de aquecimento de $6,8\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, sendo a temperatura média no patamar de $194,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (torrefação branda). A concentração de O_2 foi definida para 5%. A Figura 53 apresenta o desenvolvimento da temperatura ao longo do processo.

Podem ser observadas quedas de temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nas injeções mais rápidas de N_2 e de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ nas injeções mais duradouras. Por algumas falhas na válvula reguladora do cilindro, observa-se uma queda na temperatura entre o minuto 36 e o minuto 39, assim como em alguns pontos da rampa de aquecimento. Mas julga-se que essas falhas não tenham comprometido o ensaio.

Como pode ser observado na Figura 54, os péletes torreficados apresentaram um aspecto visual semelhante ao do produto obtido no Ensaio 7, que também foi de torrefação branda. O RG_{bu} de 87,15% também é um valor próximo ao do Ensaio 7.

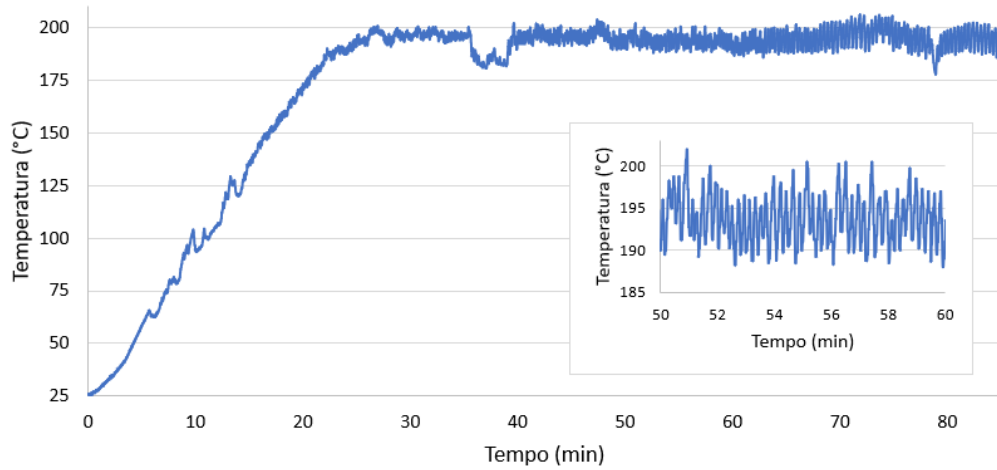


Figura 53 – Temperatura ao longo do Ensaio 9.

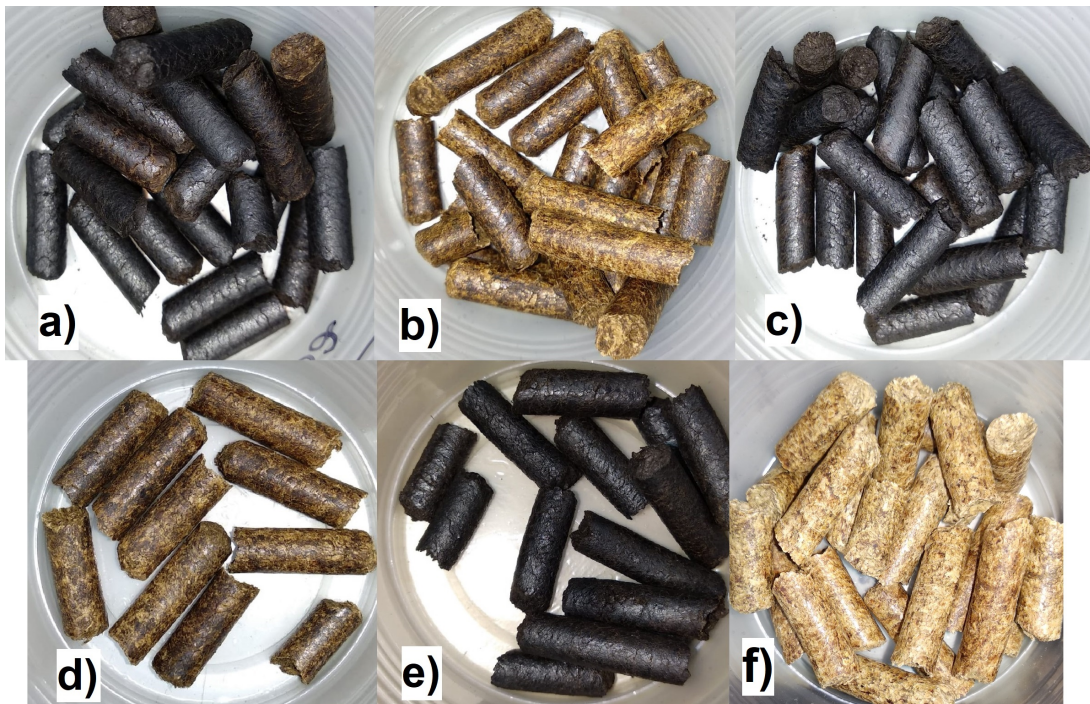


Figura 54 – Péletes obtidos após: a) Ensaio 6; b) Ensaio 7; c) Ensaio 8; d) Ensaio 9; e) Ensaio 10 em comparação com os péletes f) *in natura*

4.2.4.5 Ensaio 10

Um último ensaio de torrefação severa foi realizado com taxa de aquecimento de $6,5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ e temperatura média no patamar de $271,2 \text{ }^\circ\text{C}$. A concentração de O_2 foi definida para 5%, assim como no Ensaio 9. A Figura 55 apresenta a temperatura ao longo do tempo.

No Ensaio 10 ocorreram quedas de temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ocasionadas pelas injeções de nitrogênio.

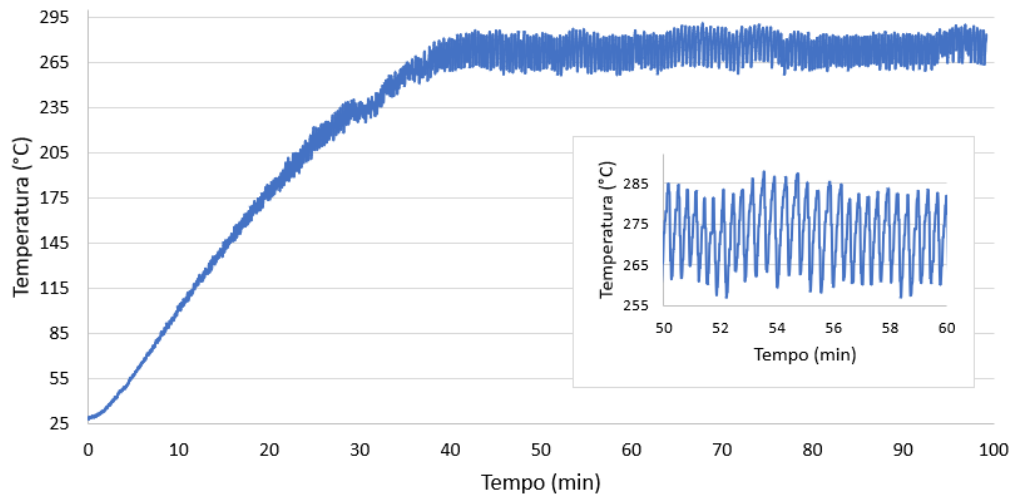


Figura 55 – Temperatura ao longo do Ensaio 10.

Os péletes torrificadores apresentaram um aspecto visual similar ao do produto obtido no Ensaio 8, e o rendimento gravimétrico em base úmida foi um pouco menor, ficando em 67,83%.

Nos ensaios 9 e 10 trabalhou-se com a válvula reguladora de pressão do cilindro de N_2 em $0,5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$, enquanto nos ensaios 6, 7 e 8 a pressão foi de $1 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$. Tal ocorrência pode ter ocasionado a diferença na taxa de aquecimento entre os ensaios.

4.2.5 Síntese dos Ensaios Finais

Para efeito de comparação entre os resultados dos produtos obtidos ao final dos ensaios finais realizados, a Tabela 5 apresenta o rendimento gravimétrico em base úmida (RG_{bu}) de acordo com os parâmetros de temperatura do patamar, concentração de O_2 e taxa de aquecimento.

Ensaio	Patamar	% O_2	Taxa de aquecimento	RG_{bu}
6	250 °C	12	8,6 6,5 °C · min ⁻¹	69,82
7	200 °C	10	7,8 6,5 °C · min ⁻¹	86,44
8	275 °C	10	7,6 6,5 °C · min ⁻¹	57,83
9	200 °C	5	6,8 6,5 °C · min ⁻¹	87,15
10	275 °C	5	6,5 6,5 °C · min ⁻¹	61,83

Tabela 5 – Rendimento gravimétrico em base úmida dos Ensaios Finais.

Por possuírem muitas instabilidades, os ensaios de ajuste apresentaram resultados variados e de difícil comparação entre si ou com a literatura. Apesar disso, tais ensaios foram úteis no aprimoramento do trabalho.

Já no caso dos ensaios finais, os dados são comparáveis e observa-se que, com o aumento da temperatura do processo, há uma diminuição no RG_{bu} .

No trabalho de (CARDONA et al., 2019), a torrefação de uma mistura de resíduos de eucalipto (madeira, casca e folhas) foi realizada. Para a torrefação a 250 °C por 60 minutos, o rendimento gravimétrico em base seca foi de 74 (± 4)%. Esse valor se aproxima do RG_{bu} obtido no Ensaio 6. Para a torrefação a 275 °C por 60 minutos, o rendimento gravimétrico em base seca foi de 69 (± 3)%. Nos Ensaios 8 e 10 o RG_{bu} ficou abaixo desse valor. Ao torrefar amostras de cavaco de eucalipto durante 60 minutos nas temperaturas de 240, 260 e 280 °C, (ROMAO; CONTE, 2021) encontraram, respectivamente, rendimentos gravimétricos em base seca de 83,33, 69,67 e 62,80%. O RG_{bu} obtido no Ensaio 6 se aproxima do rendimento do ensaio de 260 °C, enquanto o RG_{bu} obtida no Ensaio 10 se aproxima do rendimento do ensaio de 280 °C.

O ensaio de teor de materiais voláteis também dá indícios do funcionamento do reator como dispositivo para torrefação de biomassa. A Tabela 6 apresenta os valores de teor de voláteis para as amostras torrificadas a 5% de O_2 nas temperaturas de 200 e 275 °C e para o material *in natura*.

Amostra	Teor de Voláteis (%)	Média (%)
<i>In natura A</i>	80,76	80,61
<i>In natura B</i>	80,46	
200 °C A	78,41	78,58
200 °C B	78,74	
275 °C A	65,25	65,4
275 °C B	65,55	

Tabela 6 – Teor de materiais voláteis.

Percebe-se uma tendência de diminuição no teor de voláteis com o aumento de temperatura de patamar do processo de torrefação. O trabalho de (SILVA, 2013), que comparou diferentes temperaturas de torrefação com resíduos de *Eucalyptus grandis*, identificou uma baixa variação entre o teor de voláteis do resíduo *in natura* (83,2%) e o tratado a 200 °C (83,1%), enquanto uma maior variação foi identificada para as temperaturas de 250 °C (77,4%) e 300 °C (51,3%). O teor de voláteis encontrado para as amostras 275 °C A e B ficou entre esses valores. A mesma tendência foi encontrada por (BORGES, 2015), que indicou que essa diminuição ocorre devido à degradação da hemicelulose e da celulose, ficando retidos na biomassa torrificada apenas os voláteis de maior poder calorífico.

4.3 Resultados do modelo numérico

4.3.1 Modelo baseado na potência máxima de aquecimento

Para uma caracterização inicial do reator, simulações de transferência de calor em regime transiente considerando a potência máxima de aquecimento da resistência elétrica foram realizadas. A temperatura ambiente escolhida para o modelo foi a temperatura ambiente do momento de início do ensaio, que era de 25 °C. As demais condições fazem parte da própria interface escolhida de fluxo laminar não-isotérmico. Um ponto na câmara de reação (1) e um ponto fora do reator (2) (de acordo com a figura 35) foram selecionados para a medição de temperatura com termopares e para a comparação com o modelo.

Inicialmente, um modelo foi desenvolvido sem considerar a perda de calor do reator pelo fenômeno de irradiação térmica, o que levou a um comportamento significativamente diferente do medido experimentalmente. Ao inserir a condição de contorno de irradiação, o comportamento da temperatura se aproximou do real. A comparação entre as temperaturas dos dois modelos e a temperatura medida pode ser observada na Figura 56.

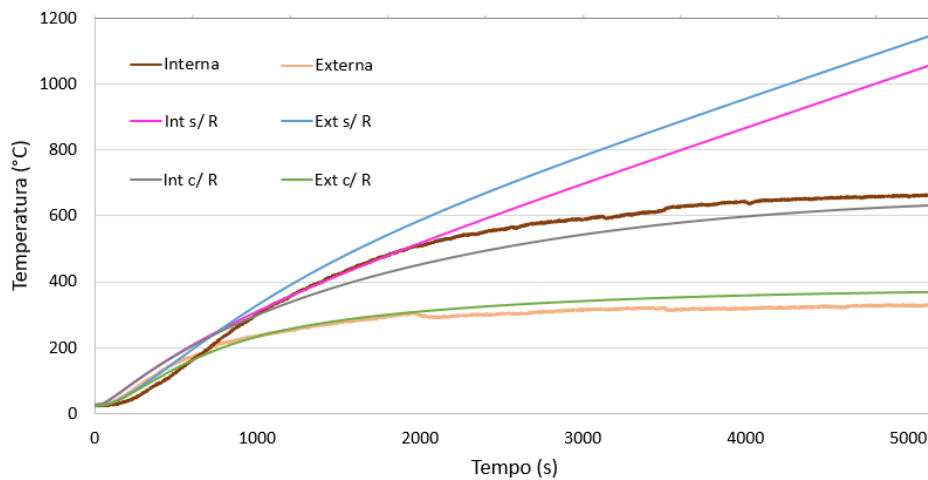


Figura 56 – Comparação entre as temperaturas nas partes interna e externa do reator.

A Figura 57 apresenta a vista dos campos de temperatura do reator para o processo de aquecimento do reator à taxa de fluxo de calor máxima da resistência ($\dot{Q} = 1,5 \text{ kW}$) nos tempos de 0, 30, 60 e 90 minutos. Percebe-se que as temperaturas aumentam nas proximidades dos fios da resistência ao longo do tempo, o que leva ao aquecimento das demais regiões do sistema.

Em se tratando da direção longitudinal, percebe-se uma grande diferença de temperatura entre a parte inferior e a parte superior da Câmara de Reação, em que as temperaturas são mais elevadas na parte inferior, indicando que um melhor aproveitamento do aquecimento pode ser obtido ao se posicionar a biomassa para tratamento nessa zona.

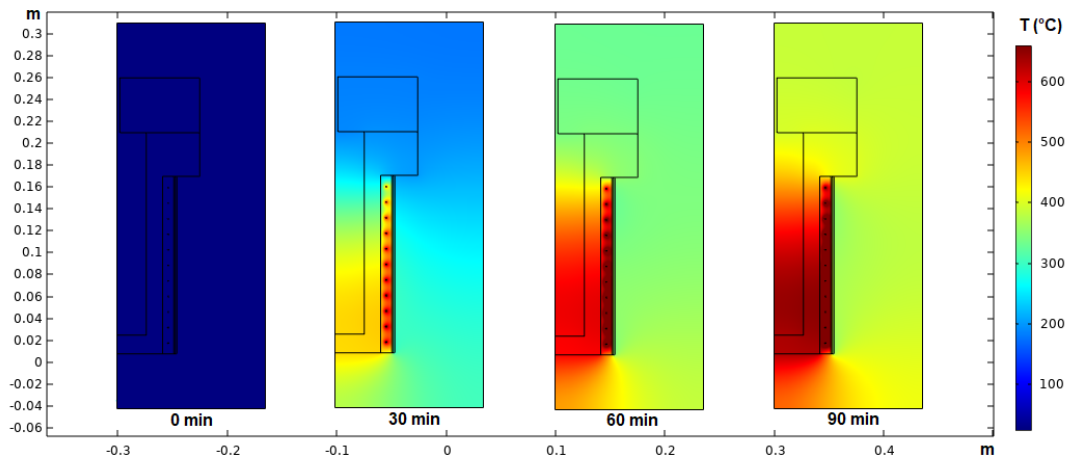


Figura 57 – Campos de temperatura ao longo do reator em diferentes tempos.

Quanto à direção radial, para a maior parte dos períodos de tempo, o gradiente de temperatura apresenta variações na ordem de:

- $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a superfície externa e a superfície interna do copo do reator;
- $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a superfície interna do copo e o centro;
- $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a superfície externa da coleira e o centro.

O terceiro valor listado pode ser importante para as aplicações nas quais a temperatura interna do reator não é medida, sendo necessário definir o controle a partir das medições da temperatura com o termopar posicionado entre a coleira e o copo do reator.

A Tabela 7 apresenta a comparação entre os valores de temperatura obtidos pelo modelo com diferentes tamanhos de malha disponíveis no programa, avaliados para o tempo de 90 minutos. A razão entre as temperaturas na parte interna (Ponto 1) é da ordem de 0,016%, já entre as da parte externa (Ponto 2) a diferença é de 0,042%.

Tamanho	Temperatura Interior ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Exterior ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo
Fina	636,65	370,06	2 min 56 s
Normal	636,59	370,10	2 min 3 s
Grossa	636,38	370,04	1 min 26 s

Tabela 7 – Comparação entre diferentes tamanhos de malha.

Os resultados obtidos são muito importantes para garantir a validade do modelo, principalmente porque a geometria, os materiais e as condições de contorno da física envolvida no processo são reproduzidas no modelo baseado no controle de potência.

4.3.2 Modelo baseado na potência controlada

A simulação da temperatura com controle (liga-desliga) de potência se deu com base no modelo desenvolvido na subseção anterior. A Figura 58 apresenta a comparação entre os valores de temperatura medidos experimentalmente num ensaio a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (com aplicação de média móvel de 20 dados).

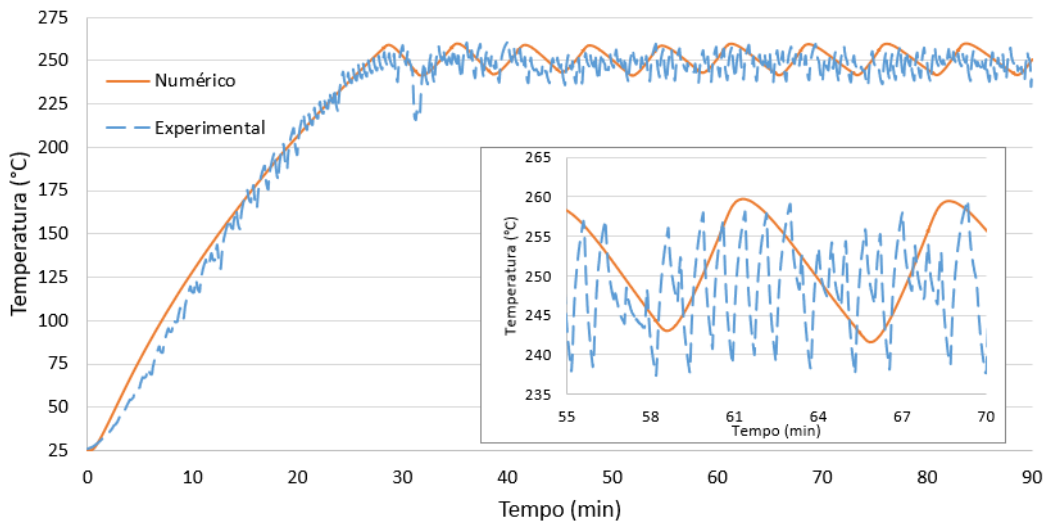


Figura 58 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.

Na Figura 59 é possível visualizar, em diferentes tempos, os campos de temperatura do modelo. Percebe-se que há uma maior uniformidade entre as regiões do modelo para 60 e 90 minutos, pois a temperatura já estava estável em torno dos $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. No minuto 30, o ponto do termopar (Ponto 3) no reator havia acabado de atingir a temperatura do patamar e vinha de uma alta taxa de aquecimento, por isso há uma maior diferença de temperatura entre as regiões nesse instante. Também é possível notar que, no minuto 30, a temperatura na coleira não está tão alta quanto no minuto 60, o que se deve ao fato de, no primeiro caso, a temperatura estar acima de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que leva ao “desligamento” da resistência elétrica, enquanto no segundo, a temperatura está abaixo e a resistência é “ligada”.

Reduzindo os limites de acionamento do sistema de controle do modelo, é possível obter uma melhor aproximação da temperatura objetivada. A Figura 60 apresenta os perfis de temperatura para simulações com tolerância de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (C1) e de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (C5). Na figura também é possível ver em detalhe os passos de tempo dos cálculos da solução. Intervalos de tempo mais curtos são observados nas proximidades dos eventos de acionamento da potência, enquanto intervalos mais longos são tomados quando a solução apresenta baixa variação em relação à anterior.

Os campos de temperatura 3D da simulação com tolerância C5 podem ser visualizados para diferentes períodos de tempo antes e depois de um evento na Figura 61.

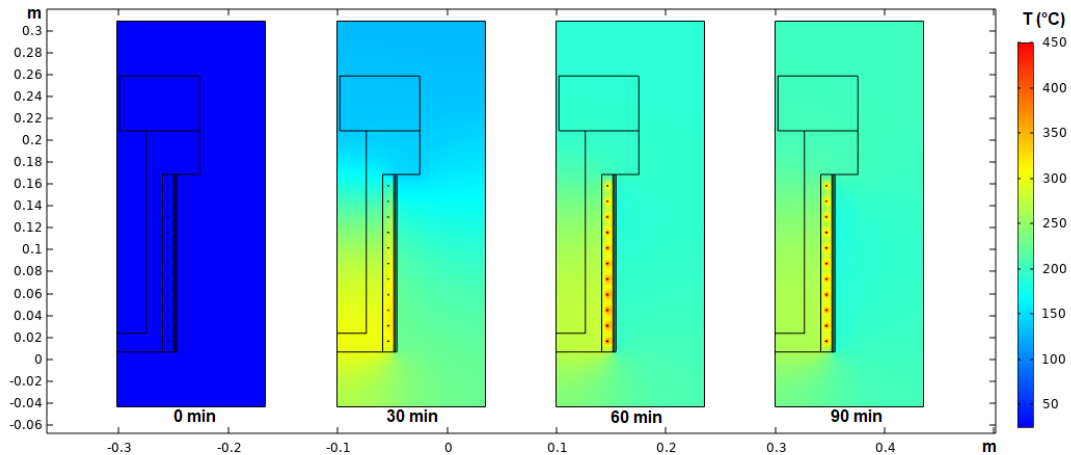


Figura 59 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.

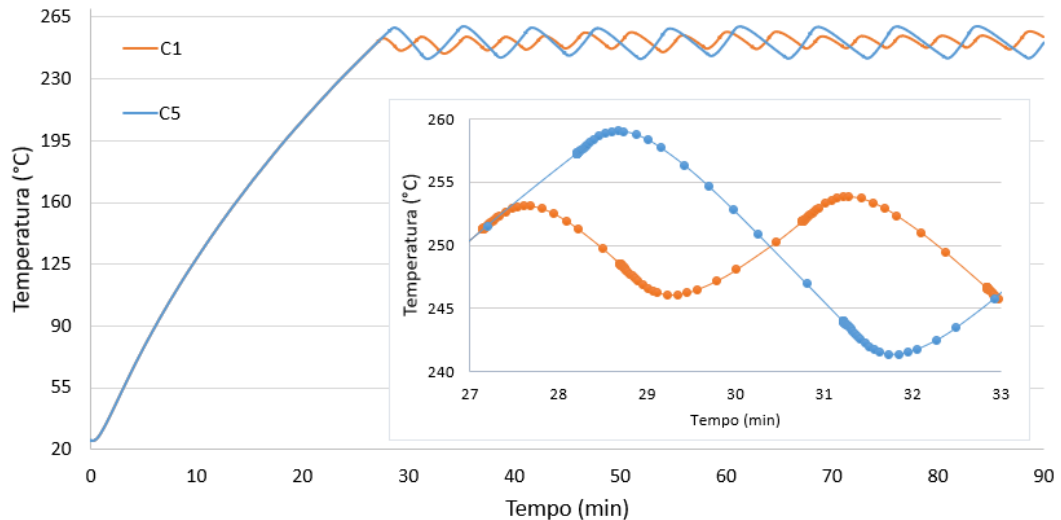


Figura 60 – Comparação entre valores numéricos e experimentais de temperatura.

Percebe-se uma estabilidade na temperatura das regiões do reator e da vizinhança mesmo com a mudança de potência. Já a Figura 62 apresenta a temperatura em diferentes pontos nos mesmos tempos apresentados na Fig. 61. Percebe-se que a temperatura no fundo da Câmara de Reação fica acima da temperatura medida no termopar, enquanto a temperatura na parte externa da coleira (em contato com o ar) fica abaixo.

O trabalho de (HEIDARI et al., 2021) apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático para um reator de carbonização hidrotérmica (HTC). Nele são simulados a transferência de calor e a cinética da reação. Ao se considerar o calor liberado pelas reações, a potência estimada ficou próxima da potência consumida. A inserção de modelos que considerem a incorporação da estrutura da biomassa e/ou das reações dos processos termoquímicos do reator são exemplos de aplicações e aprimoramentos para o modelo numérico de transferência de calor desenvolvido neste trabalho.

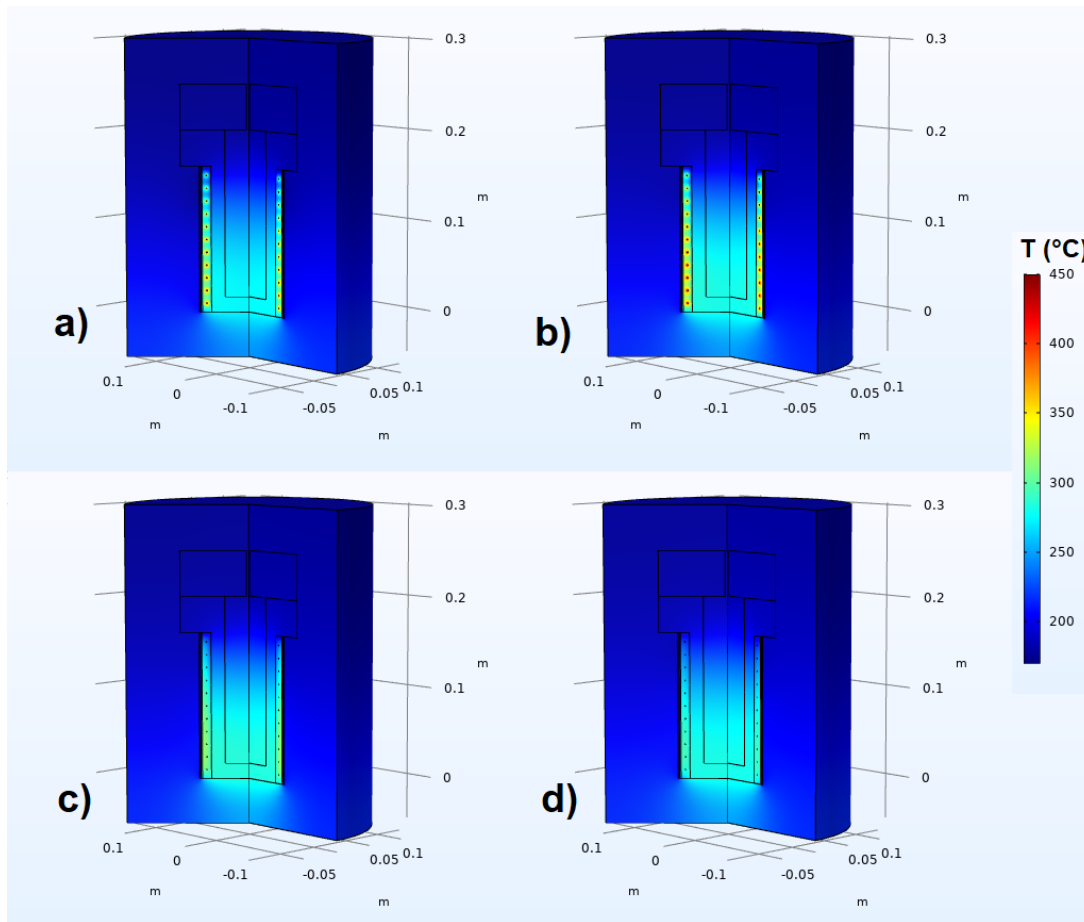


Figura 61 – Campos de temperatura para os tempos de: a) 45,96 min; b) 47,183 min; c) 48,114 min; e d) 49,330 min.

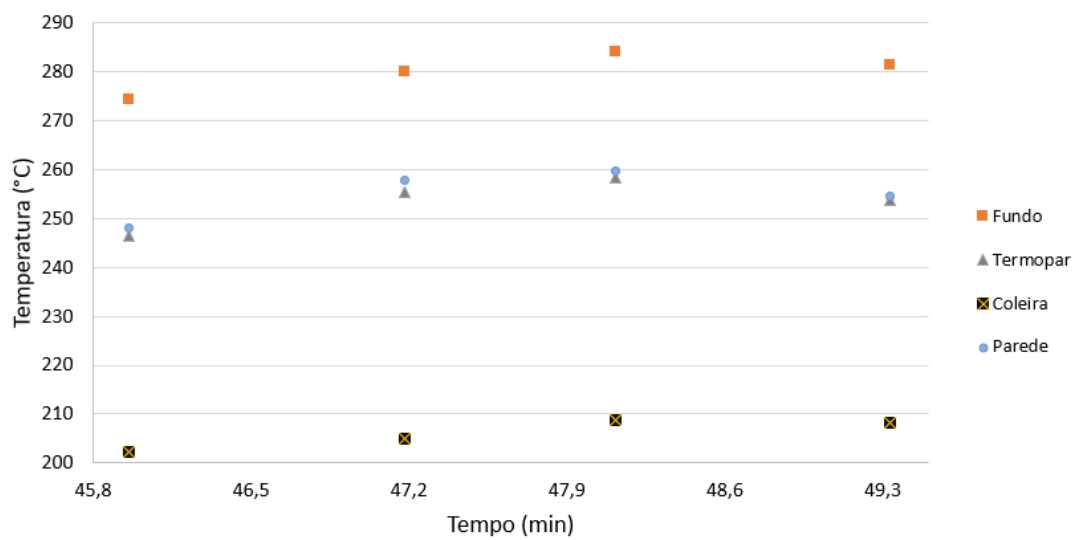


Figura 62 – Valores de temperatura em diferentes pontos para os tempos de: a) 45,96 min; b) 47,183 min; c) 48,114 min; e d) 49,330 min.

5 Conclusões e Perspectivas

O desenvolvimento deste trabalho apresentou uma série de avanços no projeto de reativação de um reator de processos termoquímicos com a adição de componentes, sistemas e tecnologias mais modernas. Os sistemas projetados para o funcionamento do reator mostraram tanto evoluções conceituais quanto construtivas, desde o início do trabalho até o presente momento, ainda precisando de aperfeiçoamento para seu ótimo funcionamento. O reator já permite a realização de ensaios de torrefação a diferentes temperaturas, taxas de aquecimento e concentrações de O_2 . Uma atenção especial deve ser dada ao sistema de acompanhamento da perda de massa, para que o reator opere como balança termogravimétrica. O modelo numérico da transferência de calor obteve resultados de temperatura próximos aos das medições experimentais e pode servir como indicativo para ajustes na estrutura e nos processos do reator.

O trabalho também representou a interdisciplinaridade de um projeto que envolve várias áreas de Engenharia, assim como refletiu na boa relação e na integração das diferentes instituições envolvidas.

Indica-se para o prosseguimento do projeto:

- ajuste na inserção de gases para reduzir a influência sobre a balança e sobre a temperatura interna;
- redução dos componentes da recuperação de gases;
- aprimoramento do modelo térmico com mais ensaios de validação e inserção de novos parâmetros;
- ensaios de caracterização da biomassa para avaliação dos processos do reator utilizando biomassas mais uniformes e já caracterizadas.

Referências

- ABDOLI, M. A. et al. Biomass densification. In: UNIVERSITY OF TEHRAN SCIENCE AND HUMANITIES SERIES. *Wood Pellet as a Renewable Source of Energy*. Cham: Springer, 2018. Citado na página 46.
- AGUIAR, C. R. L. de. *Adsorção do corante têxtil amarelo básico 28 sobre carvão ativado: modificação, isotermas, cinética e reúso*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014. Citado na página 47.
- AIREX ENERGY. *The CarbonFX Torrefaction Process*. 2021. Disponível em: <<https://www.airex-energy.com/en/technology>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 41.
- ANGARITA, E. E. Y. et al. Produção de óleos vegetais e biodiesel: tecnologia e análise do ciclo de vida. In: L. A. B. CORTEZ; E. E. S. LORA; E. O. GÓMEZ. *Biomassa para energia*. Campinas, SP, Brasil: Editora Unicamp, 2008. p. 531–572. Citado na página 33.
- AUBERT-DUVAL. *Stainless steels for high temperatures xn26tw*. 2021. Citado na página 53.
- BATIDZIRAI, B. et al. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. *Energy*, v. 62, p. 196–214, 12 2013. Citado na página 38.
- BHATTACHARYA, S. C. et al. Densification of biomass residues in asia. In: EGNÉUS, H. AND ELLEGÅRD, A. *Bioenergy 84. Biomass conversion, vol. 3*. Londres: Elsevier Applied Science Publishers, 1985. Citado na página 46.
- BLEY JR., C. *Biogás: a energia invisível*. [S.l.]: CIBiogás/Ed. Abril/Itaipu Binacional, 2014. Citado na página 33.
- BORBA, C. E. *Modelagem da remoção e metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006. Citado na página 47.
- BORGES, A. C. P. *Caracterização energética do cavaco de Eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2015. Citado na página 81.
- BP. *68° Statistical Review of World Energy*. [S.l.], 2019. Disponível em <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-reviewof-world-energy.html>>. Acesso em: 25 set. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 13, 28, 29 e 30.
- BRASIL. *Nota Técnica PR 04/18 - Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050*. [S.l.], 2018. Citado na página 25.
- BRASIL. *Resenha Energética Brasileira 2019: Exercício de 2018*. [S.l.], 2019. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 28 set. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 13, 31 e 32.

BRASIL. *Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020*. [S.l.], 2021. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021> >. Acesso em: 19 mai. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 13, 30, 31 e 32.

CAMBUIM, K. B. *Carvão de endocarpo de coco da baía ativado quimicamente com H_3PO_4 e fisicamente com vapor d'água: produção, caracterização e aplicações*. Tese (Doutorado em Química Analítica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2009. Citado na página 47.

CARDONA, S. et al. Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 31, p. 17–24, 02 2019. Citado na página 81.

CEMIN, D. da S. *Desenvolvimento de um forno para carbonização de resíduos agroflorestais em pequena escala*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Brasília, DF, 2010. Citado na página 40.

CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. Heat and mass transfer (a practical approach, si version). *McGraw-670 Hill Education*, v. 671, p. 52, 2011. Citado na página 64.

CHEN, H. et al. Smoothing and differentiation of thermogravimetric data of biomass materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., Budapest, Hungary, v. 78, n. 3, p. 1029 – 1041, 2004. Disponível em: <<https://akjournals.com/view/journals/10973/78/3/article-p1029.xml>>. Citado na página 70.

CHEN, W.-H.; KUO, P.-C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, v. 36, n. 2, p. 803–811, 2011. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210007267>>. Citado na página 38.

CHEN, W.-H. et al. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 847–866, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010910>>. Citado na página 38.

CIESIELSKI, P. N. et al. *Biomass Particle Models with Realistic Morphology and Resolved Microstructure for Simulations of Intraparticle Transport Phenomena*. 2014. *Energy Fuels*, vol. 29, p. 242-254. Citado na página 62.

CLARK, H. L. M. *Remoção de fenilalanina por adsorvente produzido a partir de torta prensada de grãos defeituosos de café*. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006. Citado na página 47.

COLATTO, I. V. W. *Desenvolvimento de uma termobalança para ensaios sob pressão de macropartículas*. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília, DF, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 13, 43, 44 e 57.

- COLOMBO, S. de Fátima de O. et al. O custo de produção como fator determinante do futuro da produção artesanal de carvão vegetal no Brasil. In: *XIII SIMPEP*. Bauru, SP, Brasil: [s.n.], 2006. Citado na página 27.
- COMSOL. *Heat Transfer Module User's Guide*. 2018. Citado na página 62.
- CORDEIRO, G. B. G. *CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE UM REATOR DE PIRÓLISE DE BIOMASSA*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021. Citado na página 55.
- CORTEZ, L.; LORA, E.; CASTAÑEDA-AYARZA, J. Biomassa no Brasil e no mundo. In: _____. [S.l.: s.n.], 2008. p. 733. ISBN 978-85-268-0783-9. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 33.
- DIREKTOR, L. et al. Comparison of the efficiency of the reactors for low-temperature pyrolysis of biomass. *Thermal Engineering*, v. 67, p. 296–303, 05 2020. Citado 3 vezes nas páginas 14, 67 e 68.
- DOAT, J. Hydro-liquéfaction de bois tropicaux et d'autres biomasses tropicales. *Bois et Forêts des Tropiques*, v. 206, p. 51–72, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 13, 49 e 50.
- DONATO, D. et al. Viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção de carvão vegetal em escala industrial. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, v. 8, p. 143–149, 10 2017. Citado na página 37.
- DPC. *Diagrama básico DPC*. 2016. Disponível em: <<http://dpcbiomassa.com.br/>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 40 e 41.
- ENDO, R.; SHIMA, M.; SUSA, M. Thermal-conductivity measurements and predictions for ni-cr solid solution alloys. *International Journal of Thermophysics*, v. 31, p. 1991–2003, 10 2010. Citado na página 64.
- ENGELS, F. *A Dialética da Natureza*. [S.l.]: Paz e Terra, 2000. Citado na página 27.
- FAHMY, T. et al. Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment Development and Sustainability*, v. 22, p. 17–32, 01 2020. Citado na página 33.
- FERNANDES, F. L. *CARVÃO DE ENDOCARPO DE COCO DA BAÍA ATIVADO QUIMICAMENTE COM ZnCl₂ E FÍSICAMENTE COM VAPOR D'ÁGUA: PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO, MODIFICAÇÕES QUÍMICAS E APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DE ÍON CLORETO*. Tese (Doutorado em Química) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2008. Citado na página 47.
- FERNANDES, R. *Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005. Citado na página 47.
- FIGUEIREDO, C. K. *Análise estatística do efeito da pressão na carbonização da madeira de Eucalyptus grandis*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 50, 53 e 54.
- FILHO, P. F. S. *Comparação do potencial adsorptivo do carvão produzido a partir do mesocarpo do coco ativado com diferentes ativantes*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Citado na página 27.

GALVÃO, L. G. O. *Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de Eucalyptus grandis*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018. Citado na página 39.

GENTIL, L.; VALE, A. Energy balance and efficiency in wood sawdust briquettes production. *Floresta*, v. 45, p. 281–288, 01 2015. Citado na página 46.

GONZAGA, A. L. *Madeira: Uso e Conservação*. Brasília, DF, 2006. Citado na página 35.

GÓMEZ, E. Ivares et al. Pirólise rápida de materiais lignocelulósicos para a obtenção de bioóleo. In: L. A. B. CORTEZ; E. E. S. LORA; E. O. GÓMEZ. *Biomassa para energia*. Campinas, SP, Brasil: Editora Unicamp, 2008. p. 353–434. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 36.

HEIDARI, M. et al. Development of a mathematical model for hydrothermal carbonization of biomass: Comparison of experimental measurements with model predictions. *Energy*, v. 214, p. 119020, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220321277>>. Citado na página 85.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. *Energia e Meio Ambiente*. [S.l.]: Thomson, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 13, 28 e 34.

HORTA, P. H. de M. *Desenvolvimento de um reator de laboratório para estudo do impacto da pressão na transformação termoquímica da biomassa e dos resíduos densificados*. Dissertação (Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 13, 50 e 53.

JEWETT Jr., J. W.; SERWAY, R. A. *Física para cientistas e engenheiros: Oscilações, ondas e termodinâmica*. 8. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2011. Citado na página 38.

JUNIOR, S. D. M. *RENDIMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA TORRADA E CARBONIZADA DO CLONE DE Eucalyptus urograndis*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis)) — Universidade Federal do Paraná, Palotina, PR, 2014. Citado na página 40.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. de. *QUÍMICA DA MADEIRA*. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2013. Citado na página 34.

LEAKE, C. D. *The Old Egyptian Medical Papyri*. [S.l.]: Lawrence, Kan., University of Kansas Press, 1952. (Logan Clendening lectures on the history and philosophy of medicine). Citado na página 27.

LEMAIRE, M. C. Hydro-liquéfaction d'un eucalyptus congolais. *D.E.A*, 1982. Citado na página 49.

LEÃO, R. M. *Análise ambiental e técnica para a obtenção de nanocristais de celulose de bagaço de cana-de-açúcar em nanocompósitos*. Tese (Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. Citado na página 56.

- LISBOA, F. C. de. *Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade*. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. Citado na página 39.
- LORA, E. et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: _____. [S.l.: s.n.], 2012. p. 411–498. ISBN 978-85-7193-228-9. Citado na página 36.
- LUENGO, C. A. et al. Pirólise e torrefação de biomassa. In: L. A. B. CORTEZ; E. E. S. LORA; E. O. GÓMEZ. *Biomassa para energia*. Campinas, SP, Brasil: Editora Unicamp, 2008. p. 333–352. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 40.
- MACÊDO, L. A. de. *Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. Citado na página 39.
- MAHINPEY, N. et al. Analysis of bio-oil, biogas, and biochar from pressurized pyrolysis of wheat straw using a tubular reactor. *Energy Fuels - ENERGFUEL*, v. 23, 05 2009. Citado na página 37.
- McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Biore-source Technology*, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. ISSN 0960-8524. Reviews Issue. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.
- MOK, W. S. L. et al. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 31, n. 4, p. 1162–1166, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ie00004a027>>. Citado na página 37.
- MORA, N. D. *Apostila de materiais elétricos*. 2010. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Citado na página 64.
- MORAIS, E. D. de. *Produção do carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (cocosnuciferalinn) utilizando H₃PO₄, CH₃COONa e KOH como ativantes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2014. Citado na página 47.
- NAG, A. *Biosystems Engineering*. New York: McGraw-Hill, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 35.
- NETO, A. C. N. de C. *OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE UM REATOR DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 55.
- NOCQUET, T. *Torréfaction du bois et de ses constituants: Expériences et modélisation des rendements en matières volatiles*. Tese (Doctorat) — Université de Toulouse, Toulouse, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 13, 42 e 43.
- NOCQUET, T. et al. Volatile species release during torrefaction of biomass and its macromolecular constituents: Part 1 - experimental study. *Energy*, v. 72, p. 180–187, 2014. Citado na página 38.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética da biomassa vegetal. In: EDUARDO JOSÉ FAGUNDES BARRETO. *Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*. Boca Raton, Flórida: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52–72. Citado na página 34.

OLIVEIRA, L.; FRANCA, A. Low-cost adsorbents from agri-food wastes. *Food Science and Technology: New Research*, p. 171–210, 04 2008. Citado na página 47.

PENG, J. et al. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, v. 111, p. 411–421, 09 2013. Citado na página 46.

QIAN, Y. et al. Pressurized pyrolysis of rice husk in an inert gas sweeping fixed-bed reactor with a focus on bio-oil deoxygenation. *Bioresource Technology*, v. 174, p. 95–102, 2014. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414014242>>. Citado na página 37.

ROCHA, B. R. da. *VALIDAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE UMA BALANÇA TERMOGRAVIMÉTRICA PRESSURIZADA*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica)) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. Citado na página 43.

ROMAO, E. L.; CONTE, R. A. Energy gains of Eucalyptus by torrefaction process. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 23, 00 2021. ISSN 0718-221X. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2021000100403&nrm=iso>. Citado na página 81.

ROUSSET, P. et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. *Fuel Processing Technology*, v. 92, n. 10, p. 1890–1897, 2011. ISSN 0378-3820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382011001767>>. Citado na página 37.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROGER M. ROWELL. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2005. p. 121–138. Citado na página 34.

SCHWARCZ, J. *Charcoal is one of the most important substances ever discovered*. 2017. Disponível em: <<https://www.mcgill.ca/oss/article/environment-health/charcoal-one-most-important-substances-ever-discovered>>. Citado na página 27.

SHAY, E. Diesel fuel from vegetable oils: Status and opportunities. *Biomass and Bioenergy*, v. 4, n. 4, p. 227–242, 1993. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096195349390080N>>. Citado na página 27.

SILVA, A. G. *Condicionamento de resíduo de Eucalyptus grandis para produção de biocombustível sólido*. Tese (Doutorado em Química) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2013. Citado na página 81.

SILVEIRA, E. A. *Acoustic field influence in the kinetics of thermochemical degradation during biomass torrefaction*. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 13, 35 e 39.

- SILVEIRA, E. A. et al. Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of eucalyptus grandis macro-particulates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, 01 2019. Citado na página 70.
- SOARES Álvaro G. *ADSORÇÃO DE GASES EM CARVÃO ATIVADO DE CELULIGNINA*. Dissertação (Doutorado em Física) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001. Citado na página 47.
- SOUZA, F.; VALE, A. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, p. 405, 01 2017. Citado na página 46.
- TAGUTCHOU, J. P. *GAZEIFICATION DU CHARBON DE PLAQUETTES FORESTIERES : PARTICULE ISOLEE ET LIT FIXE CONTINU*. Tese (Doctorat) — UNIVERSITE DE PERPIGNAN, Perpignan, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 13, 44 e 45.
- TRUGILHO, P.; SILVA, D. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*himenea courbaril* l.). *Scientia Agraria*, v. 2, p. 45–53, 10 2001. Citado na página 37.
- WALTER, A.; NOGUEIRA, L. A. H. Sistemas de produção de eletricidade a partir da biomassa. In: L. A. B. CORTEZ; E. E. S. LORA; E. O. GÓMEZ. *Biomassa para energia*. Campinas, SP, Brasil: Editora Unicamp, 2008. p. 573–607. Citado na página 32.
- YI, W. et al. Technologies of biomass pyrolysis. In: _____. *Bioenergy: principles and technologies Volume 2*. De Gruyter, 2017. p. 87–168. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/9783110476217-002>>. Citado na página 37.
- ÇEÇEN, F. *Water and Wastewater Treatment: Historical Perspective of Activated Carbon Adsorption and its Integration with Biological Processes*. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH, 2011. Citado na página 27.