

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Análise da Torrefação e Projeto
Sistemático para Dimensionamento de
Roscas Transportadoras de Reatores Tipo
Auger para Processamento Termoquímico
de Biomassas**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fernando Bortoncello Zorzi

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DA TORREFAÇÃO E PROJETO SISTEMÁTICO PARA
DIMENSIONAMENTO DE ROSCAS TRANSPORTADORAS DE
REATORES TIPO AUGER PARA PROCESSAMENTO
TERMOQUÍMICO DE BIOMASSAS**

Fernando Bortoncello Zorzi

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração: Pesquisa e Desenvolvimento de Processos

Linha de Pesquisa: Projeto, Simulação, Modelagem, Controle e Otimização de Processos Químicos e Bioprocessos.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Profa. Dra. Luciane Ferreira Trierweiler

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL


ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA


PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação Análise da Torrefação e Projeto Sistemático para Dimensionamento de Roscas Transportadoras de Reatores Tipo Auger para Processamento Termoquímico de Biomassas, elaborada por Fernando Bortoncello Zorzi, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS MANIQUE RAYMUNDO**
Data: 10/11/2023 20:53:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Lucas Manique Raymundo

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS AUGUSTO DE MORAES PIRES**
Data: 10/11/2023 16:24:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Carlos Augusto de Moraes Pires

LUIS ANTONIO REZENDE
MUNIZ:46465944553
Assinado de forma digital por LUIS ANTONIO REZENDE
MUNIZ:46465944553
Dados: 2023.11.10 16:17:33 -03'00'

Dr. Luis Antônio Rezende Muniz

Resumo

Este trabalho dispõe de duas partes: a primeira referente a uma ampla análise sobre torrefação e a segunda referente uma proposta metodológica para dimensionamento de roscas transportadoras para reatores tipo *Auger*. A biomassa, quando submetida ao processo de torrefação adquire propriedades aprimoradas, quando comparadas a biomassa original. Esse tratamento térmico custa à biomassa uma certa parcela de massa e energia, devido, principalmente a degradação da hemicelulose de sua estrutura. Os rendimentos mássicos e energéticos para biomassas lenhosas são relativamente elevados até temperaturas de 270°C, logo após esse ponto, a celulose inicia sua degradação e os rendimentos são semelhantes aos da biomassa não-lenhosa. De modo geral o material volátil diminui, teor de cinzas aumenta e características da biomassa se aproximam de tipologias de carvão mineral conforme é aumentado a temperatura de torrefação. Na segunda parte desse trabalho é proposta uma metodologia de cálculo para dimensionamento de roscas transportadoras, utilizadas em reatores *Auger*/parafuso, em que contabiliza variáveis de projeto básico (diâmetro *auger*, passo, comprimento, RPM, grau de preenchimento) e confronta com capacidade de carga e comprimento demandado para um determinado tempo de processamento (controlado pela rotação). O dimensionamento serve tanto para reatores de roscas simples, como de roscas duplas, sendo que esta última possui algumas vantagens em termos de eficiência operacional, bem como são menores em comprimento e diâmetro *auger*.

Palavras-Chave: biomassa, torrefação, rendimentos, temperatura, reator *auger*, rosca transportadora

Abstract

This work has two parts: the first refers to a broad analysis of roasting and the second refers to a methodological proposal for sizing screw conveyors for auger reactors. Biomass, when subjected to the torrefaction process, acquires improved properties when compared to the original biomass. This thermal treatment costs the biomass a certain amount of mass and energy, mainly due to the degradation of the hemicellulose in its structure. The mass and energy yields for woody biomass are relatively high up to temperatures of 270°C. Soon after this point, cellulose begins to degrade and the yields are similar to those of non-woody biomass. In general, volatile material decreases, ash content increases and biomass characteristics approach those of mineral coal as the torrefaction temperature is increased. In the second part of this work, a calculation methodology is proposed for sizing screw conveyors, used in auger/screw reactors, in which it takes into account basic design variables (auger diameter, pitch, length, RPM, degree of filling) and compares it with the capacity of load and length required for a given processing time (controlled by rotation). The sizing applies to both single-thread and double-thread reactors, the latter of which has some advantages in terms of operational efficiency, as well as being smaller in length and auger diameter.

Keywords: biomass, torrefaction, yields, temperature, auger reactor, screw conveyor

Agradecimentos

A meus pais, José Ângelo e Maria Izabel, por sempre me apoiarem, incentivarem e acreditarem em mim.

A meu irmão, Felipe, pelas várias discussões pertinentes.

A minha namorada, Alice, pelo companheirismo, apoio e horas compartilhadas de estudo.

Aos meus amigos próximos, por me distraírem nos momentos difíceis.

Aos meus orientadores, Professores Jorge Otávio Trierweiler e Luciane Ferreira Trierweiler por todo o apoio, orientação, debates e ensinamentos durante esta etapa.

A Débora e a Ana por toda ajuda e trocas durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do mestrado e do GIMSCOP, pela amizade e convívio.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de realização desta dissertação.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos os trabalhadores brasileiros.

E a todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

*Modernizar o passado
É uma evolução musical
Cadê as notas que estavam aqui
Não preciso delas!
Basta deixar tudo soando bem aos ouvidos
O medo dá origem ao mal
O homem coletivo sente a necessidade de lutar
o orgulho, a arrogância, a glória
Enche a imaginação de domínio
São demônios, os que destroem o poder bravio da humanidade
Chico Science*

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução e Motivação	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	2
1.2 Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Características da Biomassa	5
2.1.1 Variedades de Biomassas	6
2.1.2 Parede Celular.....	7
2.1.3 Desvantagens da biomassa para uso como combustíveis.....	12
2.2 Torrefação	13
2.2.1 Ganhos de Qualidade da Biomassa por Torrefação	14
2.2.2 Torrefação dos Polímeros da Biomassa e seus Produtos	17
2.2.3 Tipos de Torrefação – Branda, Média e Severa.....	20
2.2.4 Tipos de Reatores para Torrefação.....	23
2.3 Reator <i>Auger</i>	24
2.3.1 Condições e Observações Operacionais.....	27
2.3.2 Prevenção de Problemas de Alimentação em Reatores <i>Auger</i>	32
2.3.3 Operações Típicas e Materiais.....	34
Capítulo 3 – Metodologia	35
3.1 Torrefação	35
3.1.1 Rendimento da Torrefação de Biomassas	35
3.1.2 Concentração e Temperaturas de Decomposição dos Polímeros.....	36
3.1.3 Estudo da Torrefação dos Polímeros Individualizados.....	37
3.1.4 Equações de Rendimento.....	39
3.2 Reator <i>Auger</i> – Considerações Relevantes	41
3.2.1 Considerações da Roscas para Torrefação	41
3.2.2 Considerações Sobre a Rosca Transportadora	42
3.2.3 Considerações para Dimensionamento de um Reator <i>Auger</i>	44
3.2.4 Comparativo Simples (single) ou Duplo (twin).	47
3.3 Equações para Dimensionamento de Reatores Tipo <i>Auger</i>	48
3.3.1 Parâmetros Essenciais para Transporte de Biomassas.....	48
3.3.2 Equações para Dimensionamento - Reator Simples e Duplo	50
Capítulo 4 – Resultados	53
4.1 Torrefação	54
4.1.1 Avaliação da Torrefação dos Polímeros Individualizados.....	54
4.1.2 Avaliação da Torrefação de Diversas Biomassas	55
4.2 Reator <i>Auger</i> – Rosca Transportadora– Cavacos de Madeira	66
4.2.1 Dimensionamento - Reator Simples (Single).....	66
4.2.2 Dimensionamento - Reator Duplo (Twin).....	76
4.2.3 Comparativo de Carga entre Reator Simples e Duplo	81
Capítulo 5 – Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83
Anexo I – Dados em Base Seca	86
Referências	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura e composição geral da parede celular vegetal	8
Figura 2 – Estrutura da Celulose	9
Figura 3 - Açúcares que compõem as unidades de hemicelulose	10
Figura 4 - Monômeros de lignina	11
Figura 5 - Esquema de Rendimentos da Torrefação de Biomassas.....	15
Figura 6 - Comportamento Hidrofóbico da Biomassa Torrefada.....	16
Figura 7 - Mecanismos de reações em Ocorrência na Torrefação	18
Figura 8 - Esquema Típico da Torrefação e Composição de seus Produtos	19
Figura 9 - Curva TGA do Polímeros da Biomassa.....	20
Figura 10 - Etapas da Torrefação	23
Figura 11 - Reator de Leito Fixo	24
Figura 12 - Reator de Micro-ondas.....	24
Figura 13 - Reator Rotativo	24
Figura 14 - Demonstrativo Reator Auger	25
Figura 15 - Definições da Rosca Transportadora	28
Figura 16 - Desenho Esquemático Reator Tipo Auger.....	29
Figura 17 - Troca Térmica no Reator	30
Figura 18 - Reator Rosca Dupla	31
Figura 19 - Sentido das Roscas.....	31
Figura 20 - Sentido de Fluxo da Biomassa.....	31
Figura 21 - Conformações de Rotação das Roscas Duplas	32
Figura 22 - Estudo da Torrefação dos Polímeros Naturais Individualizados.....	39
Figura 23 - Grau de Preenchimento.....	48
Figura 24 - Variáveis de Roscas Transportadoras e suas Definições	49
Figura 25 - Variedade de Biomassas	56
Figura 26 - Concentração Dos Polímeros Da Biomassa Ao Longo De Uma Torrefação ...	56
Figura 27 - Rendimento Mássico de Biomassas Lenhosas e Não-lenhosas	58
Figura 28 - Rendimento de Biomassas Abaixo de 50%	58
Figura 29 - Poder Calorífico Final das Biomassas Torrefadas.....	59
Figura 30 - Poder Calorífico Total por 100 kg de Biomassa Inicial.....	60
Figura 31 - Concentração de Carbono, Hidrogênio e Oxigênio	61
Figura 32 - Redução de Material Volátil.....	62
Figura 33 - Aumento Carbono fixo a Torrefação	62
Figura 34 - Aumento da Concentração de Cinzas na Biomassa.....	63
Figura 35 - Diagrama de Van Krevelen – Biomassas Torrefada e Carvão Mineral.....	65
Figura 36 - Relação O/C com H/C e Dependência da Temperatura	65
Figura 37 - Fluxograma de Dimensionamento da Rosca Transportadora.....	66
Figura 38 - Resultado da Capacidade Volumétrica (C_v) da Rosca Transportadora Simples	69
Figura 39 – Carga Transportada (C_t) da Biomassa (kg/min) para diferentes RPM em rosca simples.....	70
Figura 40 – (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Geral	71
Figura 41 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Comercial (>2 ton/h).....	72
Figura 42 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Demonstrativo (0,5-2 ton/h).....	72

Figura 43 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Piloto (0,05-0,5 ton/h).....	73
Figura 44 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Laboratório (<0,05 ton/h).....	73
Figura 45 - (SIMPLES) Demonstrativo eleição do Diâmetro Auger, RPM e Comprimento da Rosca.....	75
Figura 46 - Rosca Transportadora Dupla	76
Figura 47- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Geral	76
Figura 48- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Comercial (>2 ton/h).....	77
Figura 49- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$)- Demonstrativo (0,5-2 ton/h).....	77
Figura 50 - (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Piloto (0,05-0,5 ton/h).....	78
Figura 51 - (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Laboratório (<0,05 ton/h).....	78
Figura 52 - (DUPLO) Demonstrativo eleição do Diâmetro Auger, RPM e Comprimento da Rosca	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desafios de Processamento da Biomassas	13
Tabela 2 - Ganhos de qualidade na biomassa torrefada	17
Tabela 3 - Variação de Concentração de Extrativos.....	19
Tabela 4 – Classificação da torrefação e Características dos Produtos.....	21
Tabela 5 - Tipos de termoprocessamento e parâmetros de processo.....	27
Tabela 6 - Tipos de reatores mais comuns	27
Tabela 7 - Classificação de Fluidez de Materiais	33
Tabela 8 - Concentrações Típicas de Biomassas.....	36
Tabela 9 - Comportamento de Decomposição dos polímeros individualizados	55
Tabela 10 - Propriedades de Materiais Combustíveis	64
Tabela 11 - Relação de Diâmetro Interno e Diâmetro Auger.....	67
Tabela 12 - Classificação Cavacos de Madeira	68
Tabela 13 - Diâmetros, Passo e RPM da Rosca Transportadora.....	69
Tabela 14 - Comparativo Simples E Duplo (Variáveis).....	81
Tabela 15 - Carga, RPM, Velocidade para Reatores Simples e Duplo	82



Capítulo 1 – Introdução e Motivação

Abundante e diversa geograficamente, a biomassa lignocelulósica é um recurso natural, proveniente de variedades vegetais. A fotossíntese realizada pelas plantas converte luz (energia radiante do sol) e dióxido de carbono (CO_2) em estoque químico-energético (polímeros naturais: celulose, hemicelulose, lignina), ou seja, a biomassa pode ser considerada como uma forma indireta de energia solar e uma fonte renovável de carbono. Essa energia química armazenada na forma de polímeros pode ser convertida em bioenergia (calor e energia), biocombustíveis sólidos e líquidos, produtos químicos e outros de origem biológica. A utilização dessa biomassa de fato contribui para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa, os quais estão diretamente correlacionados ao aquecimento global (BROWN, 2009; TUMULURU et al., 2011a)

O Brasil é conhecido mundialmente pela sua produção agroindustrial. Essa atividade, no entanto, gera uma série de subprodutos, como é o caso das biomassas residuais (casca de arroz, bagaço de cana, galhadas de árvores, fibra de coco etc.). Diante desses problemas ambientais, o tratamento termoquímico é uma alternativa que vem se demonstrando como uma das mais promissoras. A torrefação, por sua vez, proporciona melhorias às biomassas de modo a possibilitar seu uso na forma de combustíveis e produção de especialidades químicas, proporcionando assim uma economia sustentável e circular.

A torrefação é um processo termoquímico, conduzido em condições de ausência de oxigênio, por tempo curtos ou longos, em temperaturas que variam de 200 a 300°C em diferentes tipos de reatores e que proporcionam melhorias notáveis às biomassas. Outros nomes populares também surgem para designar a torrefação: pirólise lenta ou suave, assar, cozimento e secagem em altas temperaturas. Inúmeras biomassas já foram tratadas nesse tipo de processo, como biomassa de castanheiro, carvalho e eucalipto, pinho, bétula, bagaço de cana, bambu, briquete de madeira, resíduos de óleo de palma e casca de arroz. Em temperaturas baixo de 200°C o processo é tipicamente utilizado para a preservação de

madeiras, entre 200 e 300°C o processo visa melhorias energéticas. O principal princípio da torrefação é a retirada da umidade e do ponto de vista químico é a remoção de oxigênio para formação de uma biomassa aprimorada (VAN DER STELT et al., 2011).

O reator *auger* (também conhecido como *screw*, parafuso ou rosca) é uma tecnologia contínua, utilizado para torrefação de biomassas, de aquecimento indireto (normalmente combustão e resistências), composta por uma ou mais roscas transportadoras de biomassa para o ambiente reacional da torrefação; aquecimento direto também tem sido pesquisado. Dentre os parâmetros de projeto mais importantes estão o grau de preenchimento do reator (G_p), frequência de rotação (RPM), temperatura (T) e tempo de residência (τ) da biomassa em ambiente reacional para o procedimento da torrefação (BROWN, 2009; CHEN et al., 2021).

A torrefação começou a ser usada no início da Revolução Industrial; não recebeu, no entanto, atenção naquela época. Teve suas primeiras patentes registradas no final do século 19 e início do século 20, mas logo superadas pelo desenvolvimento da indústria do café e seu processo de torrefação. Na primeira metade do século 20, surgiram os primeiros e raros estudos publicados sobre a torrefação de materiais lignocelulósicos; foram esses trabalhos que já indicavam melhorias nas propriedades das biomassas (estabilização térmica e preservação da madeira). Somente no início do século 21 é que milhares de publicações foram feitas em países como Brasil, França, Alemanha, Estados Unidos e Tailândia diante dos benefícios notados no processo (PIERSA et al., 2022).

1.1 Objetivos do trabalho

As biomassas lignocelulósicas naturais apresentam algumas desvantagens quando avaliamos seu potencial uso como fonte de energia renovável: natureza higroscópica, alto teor de umidade e altas relações atômicas H/C e O/C, baixo valor calórico, moagem difícil, grande volume e baixa densidade aparente, elevada degradação biológica e não homogeneidade. No entanto, quando a biomassa passa por torrefação suas qualidades se elevam: maior hidrofobicidade ou resistividade à água, menor teor de umidade e relações atômicas H/C e O/C, maior poder calorífico, moagem facilitada, maiores densidades de massa e energia (adensamento), baixa degradação biológica e maior homogeneidade na biomassa. A torrefação se apresenta como um instrumento de melhoria das qualidades das biomassas, aproximando-se muito de algumas tipologias de carvões minerais.

Sendo assim, este trabalho possui dois grandes objetivos, divididos em duas partes:

- Primeira parte: realização de consistida análise sobre torrefação, onde será avaliado os processos de torrefação e benefícios adquiridos pela biomassa, bem como os rendimentos mássicos e energéticos de diferentes tipologias de biomassas: Lenhosas - *wood* - (Coníferas/Gimnospermas e Decíduos/Folhosas/Angiospermas) e Não-Lenhosas - *non-wood* - (Herbáceas/ Agrícolas/ Energéticas). Isso possibilitará um mapeamento ordenado de rendimentos das biomassas torrefadas em função principalmente da temperatura de processo. As características analisadas serão os seguintes (divididas em lenhosas e não-lenhosas): rendimento mássico e energético, teor de material volátil, cinzas, carbono fixo, composição elementar (C – H – O), bem como produção do Diagrama de Van-Krevelan e de energia disponível; todas as características relacionadas a temperatura e tempo de torrefação.

- Segunda parte: como segundo objetivo essencial desse trabalho, será proposta uma metodologia sistemática para dimensionamento (memorial de equações e cálculos) de uma rosca transportadora para reatores *Auger*, com demonstrativo de suas respectivas características, definições físicas, adequações e cuidados operacionais - tanto para reatores simples, como para duplos (duas roscas). Isso é proposto diante de baixa disponibilidade na bibliografia de uma metodologia de dimensionamento para processos termoquímicos. Os cálculos de dimensionamento propostos pela literatura e fornecedores de roscas são rígidos, dispostos em forma de catálogos; por isso, neste trabalho, o método proposto dará grande liberdade de cálculo para eleição de diversos tamanhos, grau de preenchimento, diâmetro de rosca e rotação de operação. A metodologia proposta nesse trabalho não se limita somente ao dimensionamento de roscas para torrefação (apesar de ser um dos objetivos desse trabalho), ela pode ser utilizada para dimensionamento de roscas (reatores simples ou duplo) para pirólise lenta, intermediária ou rápida, uma vez que somente devem ser alterado as condições de processo (tempo de duração, temperatura, rotação da rosca, meios assistidos). O ideal para o dimensionamento está na capacidade de uma mesma rosca possuir dimensões capazes de atender qualquer tipo de termoprocessamento.

1.2 Estrutura da dissertação

A estruturação dessa dissertação foi realizada de tal modo que transmitisse, de modo sistemático, conhecimentos básicos sobre o tema de Torrefação de Biomassas, divididas entre Lenhosas e Não-Lenhosas, além de propor uma metodologia de dimensionamento de roscas transportadoras para reatores tipo *auger*.

Primeiramente, no Capítulo 2, é exposto uma revisão bibliográfica básica sobre as biomassas lignocelulósicas (origem e estrutura química), torrefação (condução) e os reatores comumente utilizadas no processo, em especial, os reatores auger.

Posteriormente, no Capítulo 3, é apresentado as metodologias que deram suporte para a avaliação de resultados, como rendimentos dispostos pela bibliográfica na torrefação de biomassas (mássico, energético, terrores de cinza). Além disso, é apresentado uma ampla listagem de considerações para o dimensionamento de uma rosca transportadora para reatores auger, bem como uma proposta de metodologia sistemática para dimensionamento dessas roscas.

No Capítulo 4, adicionalmente, são apresentado os resultados, de forma gráfica, de uma ampla análise de diversas biomassas que passaram por processo de torrefação, divididas em Biomassa Lenhosas e Não-Lenhosas, e apresentado as diferenças de comportamento. Demais, é apresentado um passo a passo, com resultados, para dimensionamento de roscas transportadoras: seleção do diâmetro auger, bem como comprimentos e rotação da rosca.

Finalmente, no Capítulo 5, são apontados as principais conclusões da dissertação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

A biomassa, o sol (células solares fotovoltaicas e coletores convergente solares de calor), o vento (turbinas eólicas) e geotermiais são as fontes habituais de fornecimento de energia renovável; a biomassa, entretanto, é o único recurso renovável a base de carbono para a fabricação de produtos químicos, materiais e combustíveis (especialmente fontes não-estacionárias). Dentre os recursos renováveis, a biomassa é particularmente adequada, pois é considerada uma matéria-prima abundante geograficamente, de baixo custo e de base biológica para a produção de químicos e energia (queima direta ou termo-processada). As biomassas lignocelulósicas sozinhas muito provavelmente não resolverão todos os possíveis problemas globais envolvendo energia; elas podem, no entanto, satisfazer necessidades de fonte de carbono, pois sua composição única a torna especialmente adequada para a extração de produtos químicos de valor agregado e materiais que podem substituir petroquímicos. Além disso, apresenta-se como única fonte renovável viável para a produção de compostos aromáticos, hoje imprescindível na sociedade em que vivemos. (KANTARELIS, 2014; PAULUS, 2011).

2.1 Características da Biomassa

De modo geral, a biomassa é constituída de um complexo de macromoléculas, o qual inclui carboidratos na forma cristalina (celulose) e amorfa (hemicelulose), além da lignina (estrutura fenólica), ácidos graxos, extrativos, proteínas, material inorgânico mineral conhecido como cinzas e água (BROWN, 2009; ZENG, 2016).

2.1.1 Variedades de Biomassas

Como o estudo de tratamento de biomassas é muito amplo e variado, é proposto uma divisão por tipologia de biomassas: as Biomassas Lenhosas - *wood* - (Coníferas/Gimnospermas e Decíduos/Folhosas/Angiospermas) e Biomassas Não-Lenhosas - *non-wood* -(Herbáceas/Agrícolas/Energéticas) (DHYANI; BHASKAR, 2018). Este trabalho utiliza essas divisões para o melhor entendimento do comportamento de torrefação dessas biomassas.

Uma característica da biomassa lenhosa (*wood*) é que possuem maior quantidade de orgânicos estruturais (polímeros); já as herbáceas e de produção agrícola (*non-wood*) possuem maior concentração de cinzas. Por esse fato, a biomassa lenhosa pode liberar mais energia em comparação com a biomassa herbácea e agrícola durante a conversão termoquímica (DAI et al., 2019a; SOUZA; CORADIN, 2007).

Biomassas Lenhosas (*wood*)

- **Coníferas/Gimnospermas (*softwood*)**: cedro, pinho, araucária, abeto, sequoias e ciprestes (DHYANI; BHASKAR, 2018).

- **Decíduos/Folhosas/Angiospermas (*hardwood*)**: cipreste calvo, pau-brasil, faia, bétula, castanheiro, eucalipto, choupo híbrido e carvalho. Resíduos de madeira incluindo serragem, cavacos, pellets, resíduos de fábricas de móveis e outras indústrias de processamento de madeira também são enquadradas como biomassas lenhosas (DHYANI; BHASKAR, 2018; SOUZA; CORADIN, 2007).

Biomassas Não-lenhosas (*non-wood*):

- Resíduos Agrícolas:

Casca/capsula: algodão, amêndoa, amendoim, avelã, noz, óleo de palma, casca de girassol, casca de cacau. Cascas: azeitona, arroz, café. Talos: milho, algodão, colza Palha: milho, algodão, colza, trigo, arroz. Caroço: azeitona, damasco, bagaços, folha de bananeira, resíduo de bocaiuva, caroço de cerejeira, torta de caroço de algodão. Outros: miolo de coco, fibra de coco, talo de alho, resíduo de uva, resíduo de jatropha, palitos de juta, talo de pimenta, bagaço de sorgo, resíduos de chá e resíduos de tabaco (DHYANI; BHASKAR, 2018; SOUZA; CORADIN, 2007).

- Culturas Energéticas

Habitadas para locais de pouca fertilidade ou resistentes a seca, diferente das culturas agrícolas, produzem boa quantidade de biomassa: bambu, sorgo, gramas (capim

bermuda, capim elefante, capim esparto) (DHYANI; BHASKAR, 2018; SOUZA; CORADIN, 2007).

2.1.2 Parede Celular

Uma das estruturas mais importantes no reino vegetal é a parede celular. Desempenhando um papel essencial no crescimento e desenvolvimento de plantas, incluindo regulação da forma e expansão da célula, troca de íons, transporte, coesão dos tecidos e defesa contra patógenos e microrganismos invasores (SOMERVILLE, 2004). A maior parte do carbono fixo adquirido a partir da fotossíntese das plantas é armazenado na forma de polímeros e incorporados na parede celular das células vegetais, o que tornam as paredes celulares a fonte mais abundante de biomassa terrestre e energia renovável (BURTON, 2010).

Tratando-se de componentes químicos da constituição da parede celular vegetal, dentre os principais polímeros de elevado peso molecular encontrados nela estão os polissacarídeos de celulose, de hemiceluloses (xilana, glucuronoxilana, xiloglucana, arabinoxilana, glucana de ligação mista ou glucomanana) e de polissacarídeos pécticos, a lignina polifenólica e apenas pequenas quantidades de proteínas estruturais (ZHAO et al., 2019). Na parede celular lignocelulósica, além da hemicelulose, pectina, celulose e lignina, podem ser encontradas proteínas, lipídeos, sílica e outros componentes inorgânicos (INGRAM et al., 1999).

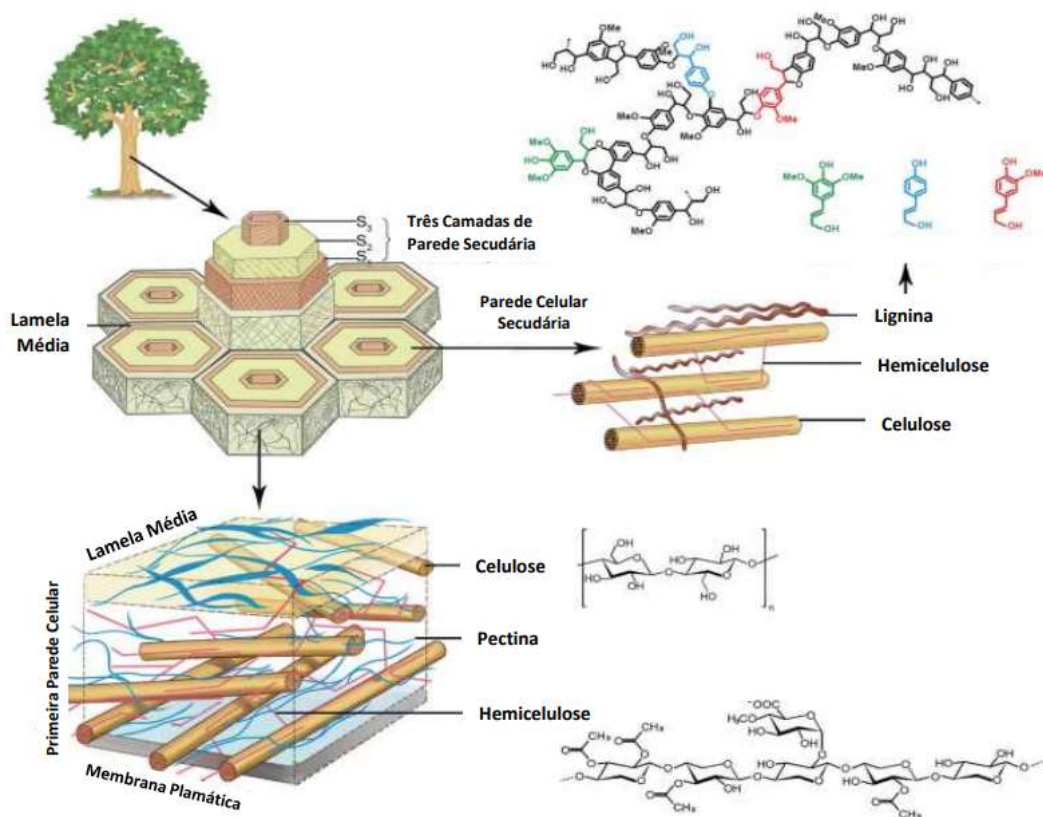
As células vegetais possuem dois tipos de parede celular: a parede celular primária e secundária, além da lamela média que une células adjacentes. A lamela média é composta por polissacarídeos pécticos e pequenas quantidades de proteínas. Já a parede celular primária é composta por microfibrilas de celulose embebidas em uma matriz semelhante a gel de polissacarídeos não celulósicos e glicoproteínas (GEITMANN, 2010). Algumas plantas somente possuem parede celular primária, enquanto outras depositam parede celular secundária internamente à primária após as etapas de crescimento vegetal. A parede celular secundária é dividida em 3 segmentos: S1, S2 e S3 especializadas para transporte, suporte e mecanismos do metabolismo (xilema, floração, sementes), sua composição é dada por celulose, hemicelulose, lignina e proteínas da parede celular (ZHAO et al., 2019).

A Figura 1 mostra as principais estruturas: parede celular primária e secundária e a lamela média. Como pode se perceber a lamela média é rica em pectinas; a parede celular primária, por sua vez, mostra microfibrilas de celulose entrelaçada por uma rede complexa de hemicelulose que são ligadas à superfície das microfibrilas por pontes de hidrogênio. Além disso, os polissacarídeos de pectinas (altamente hidrofílicas) são envolvidas

fortemente pela rede celulose-hemicelulose; já a parede celular secundária é majoritariamente composta por lignina, celulose e hemicelulose (ZHAO et al., 2019).

Do ponto de vista das biomassas de potencial uso energético e/ou produção de químico (passíveis de termoprocessamento), os polímeros naturais lignocelulósicos mais abundantes são os constituintes da parede celular secundária. As condições normalmente encontradas desses polímeros em biomassas residuais são: celulose (40-55%), hemicelulose (10-40%) e lignina (20-30%). A pectina (2-20%) é um polímero que pode ou não estar presente, variando conforme espécime (INGRAM et al., 1999). Várias amostras de biomassa diferem em termos de composições químicas e propriedades físicas (DAI, L. et al., 2019b).

Figura 1 - Estrutura e composição geral da parede celular vegetal



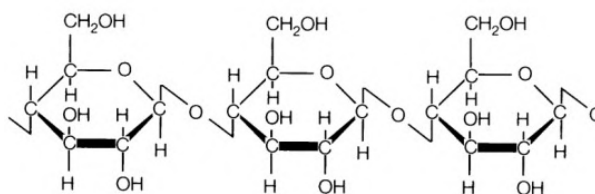
Fonte: adaptado de Zhao e colaboradores (2019).

Celulose

A parede celular das plantas representa um material extremamente complexo, heterogêneo em termos de estrutura e composição, variando conforme as variedades botânicas. Sua principal estrutura é a celulose (mais abundante biopolímero da terra), o qual é constituída de moléculas de glicose ligadas entre si repetidas vezes formando as microfibrilas (ZHAO et al., 2019; MACHADO, 2009; ESPIRITO SANTO, 2020).

Trata-se de um polímero natural (polissacarídeo) linear e cristalino de fórmula elementar $(C_6H_{10}O_5)_n$. Ela é composta de β -D glucopiranosose, que estão ligadas entre si por ligações (1 \rightarrow 4) glicosídicas, Figura 2. A estrutura da celulose é caracterizada pelo grau de polimerização, que pode ser superior a 10.000 em madeiras. A celulose possui a característica de difícil solubilização em solventes e de resistir a hidrólise enzimática (MORGANO, 2019). Além disso, as moléculas lineares de celulose são aleatoriamente ordenadas nas estruturas do material biológico, proporcionando uma tendência de formação de ligações intra- e intermoleculares (ligações de hidrogênio), decorrendo a existência de regiões empacotadas e com maior densidade, formando regiões cristalinas (maioria) e as conhecidas fibras vegetais (MOHABEER, 2018).

Figura 2 – Estrutura da Celulose



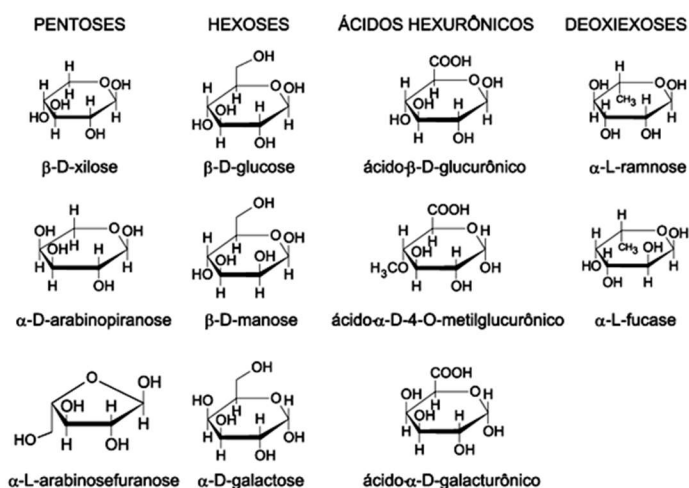
Fonte: adaptado de Morgano (2019)

Hemiceluloses

Em geral, as hemiceluloses $((C_5H_8O_4)_m)$ são constituídas de uma porção de polímeros de polissacarídeos, no entanto, geralmente é ramificada e com um grau de polimerização inferior, quando comparado a celulose, isso é, em média de 100 a 200. As hemiceluloses são compostas por combinação de pentose (xilose e arabinose) e hexoses (glicose, galactose e manose). Portanto, a hemicelulose não é um composto quimicamente definido, mas um conjunto de polímeros com unidades fundamentais que podem variar (Figura 3); diferente da celulose. A composição da hemicelulose é dependente do vegetal, podendo a quantidade desse polímero variar de acordo com a espécie (ROWELL, 2005; PERSSON, 2019).

As hemiceluloses são solúveis em meios alcalinos e são facilmente hidrolisadas por ácidos (WERTZ, 2011). Possuem estrutura amorfa com cadeias de pequeno comprimento. A forma mais abundante apresenta D-xilose na cadeia principal e L-arabinose nas cadeias laterais. A xilose, principal componente da hemicelulose, é composta primariamente por unidades de D-xilose unidas por ligações β -1,4-glicosídicas, e acredita-se que seja importante para a coesão das fibras e para a integridade da parede celular (BEG et al., 2001; HAMELINCK et al., 2005).

Figura 3 - Açúcares que compõem as unidades de hemicelulose



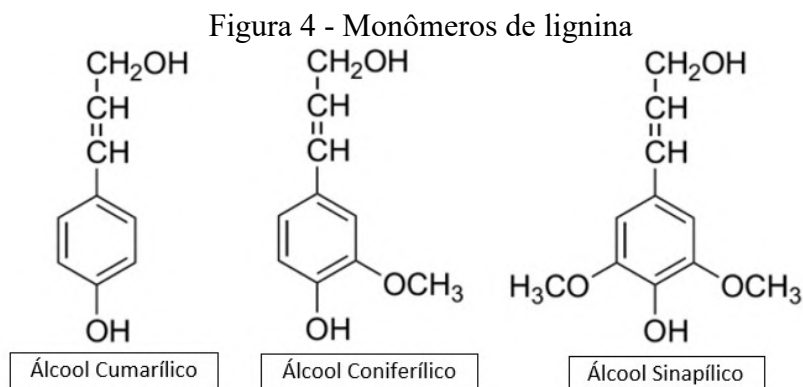
Fonte: adaptado de Moraes; Nascimento; Melo (2005)

Holocelulose é o nome da denominação da quantidade somada de celulose e hemiceluloses. Pectina e amido podem estar presentes, mas em geral em pequenas quantidades e por isso desconsideradas. Esses polímeros são constituídos de açúcares simples e ricos em grupos hidroxila (-OH), grupos que são responsáveis pela retenção de unidade devido a formação ligações de hidrogênio (ROWELL, 2005; PERSSON, 2019).

Lignina

As ligninas ($[(C_9H_{10})_3(OCH_3)_{0,9-1,7}]_m$) tratam-se de um composto fenólico aromático, tridimensionais, reticuladas e aleatoriamente conectadas por unidades de fenilpropanos substituídas. Esses monômeros de fenilpropano podem ser categorizados como unidades guaiacil, siringil e p-hidroxifenil (DHYANI; BHASKAR, 2018). Trata-se de um polímero amorfo, altamente complexo, majoritariamente aromático, principalmente composto de unidades fenilpropano, que se conectam, de uma estrutura a outra, por diferente tipo de ligação, sem auxílio enzimático. As irregularidades da lignina devem-se principalmente ao mecanismo de sua síntese, que é dado através do acoplamento de várias formas de ressonância e radicais livres. Os precursores da biossíntese de lignina são o álcool p-cumarílico, o álcool coniferílico e o álcool sinapílico, conforme Figura 4. A lignina não tem uma única unidade de repetição como a celulose, mas consiste em um arranjo complexo de unidades fenólicas substituídas. O crescimento desse polímero amorfo decorre nos entre espaços das microfibrilas de celulose e hemicelulose na parece celular, num processo denominado de lignificação (ESPÍRITO SANTO, 2020).

A lignina está presente em diferentes proporções e regiões das plantas, sendo o componente que interfere diretamente na eficiência do processo de hidrólise; isso se deve principalmente a complexidade dos tipos de ligação entre a estrutura de lignina (GRAY et al., 2006). A lignina é um polímero natural hidrofóbico, enquanto a hemicelulose e a celulose são hidrofílicas (ROWELL, 2005).



Fonte: adaptado de Prat (2012)

Extrativos e Cinzas

Nas biomassas há também uma porção variável de extrativos e composto inorgânicos. Biomassas lenhosas (*wood*) possuem a característica de conter principalmente os três principais componentes da biomassa frente as cinzas e extrativos (0,3 a 0,4% de inorgânicos e até 3% de extrativos), já as herbáceas e agrícolas (não-lenhosa, *non-wood*) apresentam maior teor de cinzas (até 15%) e compostos extrativos (até 72%) (HUBER; IBORRA; CORMA, 2006; WANG et. al., 2017; PAULUS, 2011).

Extrativos orgânicos compreendem compostos alifáticos, aromáticos e alicíclicos, hidrocarbonetos, terpenos, taninos, alcaloides, óleos essenciais, álcoois, cetonas, ácidos, ésteres, gorduras (cutícula), glicosídeos, gomas, mucilagens, pectinas, resinas, saponinas, ceras, proteínas, compostos fenólicos e outras substâncias que desenvolvem papel importante na vida vegetal, como o combate a microrganismo invasores, produção de intermediários do metabolismo e reserva energética. Outros componentes que podem aparecer como extrativos são os ácidos graxos (triglicerídeos); as gorduras normalmente são ésteres altamente hidrofóbicos, insolúveis em água (MORGANO, 2019; TRUBETSKAYA, 2016; WIGLEY, 2015; ZENG, 2016; DHYANI; BHASKAR, 2018). Tais compostos podem ser extraídos da biomassa por solventes polares (álcool, cloreto de metileno ou água) ou apolares (hexano ou tolueno) (DHYANI; BHASKAR, 2018).

O conteúdo mineral inorgânico é constituído de espécies como o Fe, Mn, Si, Al, P, Cl, metais alcalinos e alcalinos terrosos, como K, Ca, Na e Mg. Esses elementos estão presentes nas cinzas residuais da biomassa. Tais minerais são imprescindíveis do ponto de

vista nutricional para o processo de crescimento da biomassa via metabolismos. A composição de cinzas na biomassa varia de menos de 2% em madeiras macias (coníferas) a até 15% em biomassa não-lenhosas (DHYANI; BHASKAR, 2018; DAI et al., 2019b). Esses metais encontrados nas cinzas, em processos termoquímicos, apresentam comportamento catalítico, principalmente o potássio (K) e o sódio (Na); eles agem facilitando reações secundárias de vapores e reduzindo o rendimento de líquidos, e dependendo da concentração os efeitos podem ser mais severos, principalmente para as cinzas que se encontram expostas na biomassa (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; BRIDGWATER, 2012).

Algumas concentrações de cinzas em biomassas e principal mineral encontrado: casca de arroz (14,96% - silício), palha de arroz (23,7% - silício), casca de café (8,0% - potássio), casca de cacau (10,77% - potássio). Outros minerais encontrados nessas biomassas são: cálcio, magnésio, fósforo, enxofre, cobre, cloro, chumbo, cobalto, ferro, manganês, tungstênio, zinco, níquel e alumínio (ZINLA et al., 2021).

2.1.3 Desvantagens da biomassa para uso como combustíveis

Quando analisamos a biomassa como possível forma de combustível, primeiramente, deve-se avaliar algumas características do material e suas desvantagens frente ao uso. Dentre as principais características está a elevada umidade, baixa densidade, baixo potencial de redução de tamanho, higroscópica, elevada concentração de oxigênio, teor de cinzas e heterogeneidade. Isso, contudo, desprende desafios frente ao uso com combustível. Segue Tabela 1 ilustrando tais desafios e respectivas desvantagens.

Tabela 1 - Desafios de Processamento da Biomassas

Biomassa natural	Principais Desvantagens
Elevado conteúdo de Umidade	Redução do poder calorífico Demanda elevada de energia para secagem Redução a eficiência em processos de conversões Eleva custo e transporte e estocagem Eleva risco de biodegradação Eleva a corrosão devido a condensação
Baixa densidade volumétrica e energética	Eleva custo e transporte e estocagem Demanda de elevada taxa de alimentação aos processos
Baixa redução de tamanho	Elevado custo para redução de tamanho e moagem Partículas grosseiras
Natureza Higroscópica	Absorve umidade durante estoque Eleva risco de biodegradação
Elevado teor de oxigênio	Reduz o número de ligações de elevada energia Reduz o poder calorífico Reduz densidade energética Reduz estabilidade térmica
Cinzas (metais alcalinos)	Problemas com cinzas (sólidos)
Heterogeneidade	Grande variação nas propriedades e difícil alimentação

Fonte: adaptado de Bach; Skreiberg (2016)

2.2 Torrefação

A torrefação pode ser classificada como um tipo de pirólise lenta (ou pirólise parcial, ou pré-tratamento térmico), a qual é tipicamente realizada em temperaturas entre 200 e 300 °C, em atmosfera inerte e visa a produção de biomassa torrefada, um produto sólido. A torrefação é caracterizada por baixas taxas de aquecimento (< 50 °C/min) e longos tempos de residência da biomassa residual em ambiente reacional. É um processo de pirólise suave que tem por principal objetivo aumentar a densidade energética, retirar a umidade e modificar propriedades físico-químicas das biomassas. Durante o processo de torrefação, além da remoção da água, voláteis são removidos, enquanto os biopolímeros hemicelulose, celulose e lignina são parcialmente decompostas em material volátil; sendo a hemicelulose a que mais sofre decomposição (VAN DER STELT et al., 2011; BRIDGWATER, 2012; HORNUNG; APFELBACHER; SAGI, 2011; PIERSA et al., 2022; BERGMAN et al., 2005; BACH; SKREIBERG, 2016).

Segundo Tumuluru e colaboradores (2011), a torrefação proporciona melhorias física, químicas e bioquímicas à biomassa, o que as faz mais adequadas (melhor performance) para processos térmicos subsequentes como a gaseificação, pirólise,

coprocessamento e combustão. Estes pesquisadores ainda citaram que a torrefação é delimitada pelos seguintes parâmetros de processo:

- (a) temperatura de reação;
- (b) taxa de aquecimento;
- (c) ausência de oxigênio;
- (d) tempo de residência da biomassa em ambiente reacional;
- (e) pressão ambiente;
- (d) flexibilidade de material (variedades);
- (e) umidade da matéria-prima; e
- (f) tamanho de partícula da matéria-prima (influência os mecanismos de reação, cinética e duração do processo).

Diante disso, a torrefação vem se apresentando como uma etapa essencial de pré-tratamento da biomassa para logo em seguida ser destinada a outros processos termoquímicos, diante das melhorias adquiridas em questões energéticas, químicas, de transporte e biológicas. Além disso, podem ser gerados condensáveis (gases submetidos a resfriamento) com potencial uso, diante da ampla gama de especialidades químicas nele encontrados.

2.2.1 *Ganhos de Qualidade da Biomassa por Torrefação*

A biomassa *in-natura* possui baixo poder calorífico, estrutura volumosa, dificuldades de transporte, umidade residual (hidrofílica), baixa densidade de energia, baixo poder calorífico, estrutura não homogênea (o que dificulta o uso de biomassa na forma de combustível ou em larga escala). A torrefação, por sua vez, possibilita a obtenção de uma biomassa mais homogênea, densificada energeticamente, além de outras propriedades adquiridas (PIERSA et al., 2022). Devido às propriedades indesejadas da biomassa (Tabela 1), grandes quantidades são necessárias para que seja passível de algum tipo de transformação (térmica ou biológica) (TUMULURU et al., 2011a). A principal vantagem de torrefação é a melhoria da densidade energética, capacidade de moagem (menor gasto energético), além da baixa degradação biológica (VAN DER STELT et al., 2011). A hidrofobicidade adquirida é essencial para transporte e armazenamento, uma vez que a vida útil do material aumenta consideravelmente, já que se torna mais resistente a biodegradação (ataque microbiológicos) (PIERSA et al., 2022; GUIMARÃES; TANNOUS, 2020).

Durante a torrefação, a tenacidade (propriedade mecânica) e as fibras naturais da biomassa são destruídas, uma vez que o calor fornecido para a torrefação quebra essas estruturas poliméricas complexamente conectadas. Assim, ela quebra a matriz de

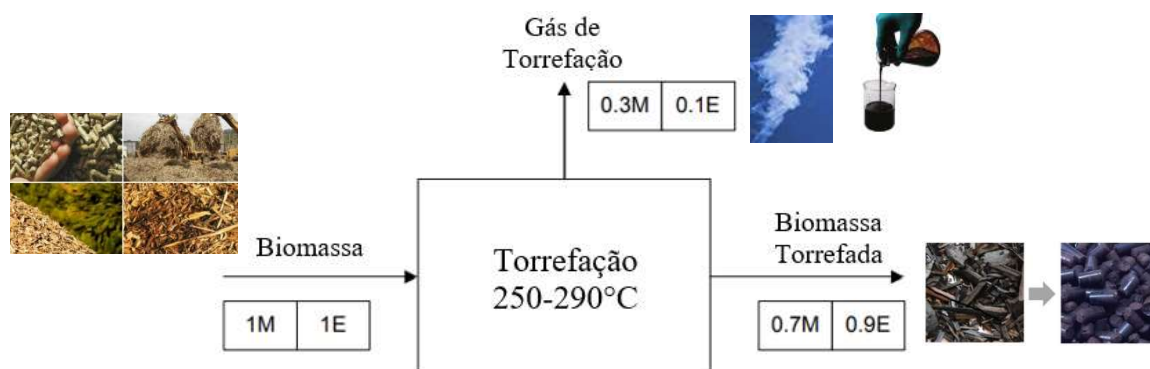
hemicelulose e despolimeriza a estrutura da celulose, resultando em uma diminuição no comprimento das fibras, facilitando o processo de fragmentação das biomassas (BERGMAN; KIEL, 2005; NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; TUMULURU et al., 2011a).

Durante o processo decorre desvolatilização, despolimerização e descarbonização dos polímeros naturais (hemicelulose, celulose e lignina). O polímero mais afetado nessa faixa de temperatura é a hemicelulose. A torrefação produz um material sólido uniforme, de cor marrom enegrecido (variando com a temperatura de processo), bem como gases condensáveis (água, orgânicos e lipídios) e gases não condensáveis (CO_2 , CO e CH_4). Além disso, com as propriedades adquiridas pela biomassa torrefada, o custo energético para redução do tamanho de partícula reduz em aproximadamente 70% (até 90%), possibilitando ganhos em esfericidade, área superficial e homogeneidade de partícula. (TUMULURU et al., 2011a; BERGMAN et al., 2005; VAN DER STELT et al., 2011; IEA, 2015).

A biomassa torrefada, por sua vez, é mais difícil de ser peletizada que a biomassa virgem, uma vez que a lignina é modificada no processo e as forças coesivas diminuem. O gasto energético para peletização das mesmas quantidades de material é maior para biomassa torrefada que de a biomassa original (80-210 kWh/ton vs. 50-60 kWh/ton, respectivamente). Aditivos podem ser adicionados para se proceder a densificação, como usos de aglutinantes, parafina, lignina, bioplásticos ou fração condensável do gás de torrefação (IEA, 2015).

Do ponto de vista dos sólidos, a perda de massa (M) na forma gasosa em um processo de torrefação de biomassa, normalmente, gira em torno de 30% (podendo chegar a 70%) e a perda de energia (E) é 10%, aproximadamente, em relação a biomassa inicial, Figura 5 (ONG et al., 2021). Uma vez que os voláteis possuem baixa energia, seu uso como fonte de calor no próprio processo é dificultado (CHEN; PENG; BI, 2015)

Figura 5 - Esquema de Rendimentos da Torrefação de Biomassas



Fonte: adaptado de Bergman e colaboradores (2005)

A biomassa naturalmente possui a característica de absorver e sustentar água em sua estrutura principalmente devido aos grupos hidroxilas (-OH). A saída desses grupos

hidroxilas por torrefação reduz drasticamente a capacidade de retenção de água pela biomassa tornando-a hidrofóbica. Adicionalmente, devido ao rearranjo das estruturas ao longo da torrefação, estruturas apolares insaturadas são formadas. Os depósitos sobre o sólido torrefado, como é o caso da condensação de tipos de alcatrão nos poros da biomassa, contribuem na hidrofobicidade, uma vez que impedem a condensação de vapor de água nessas regiões (TUMULURU et al., 2011a; BERGMAN et al., 2005; VAN DER STELT et al., 2011). Quanto maiores a temperatura e o tempo de torrefação, maior é a característica hidrofóbica da biomassa (BASU, 2013; NORDIN et al., 2013). O comportamento hidrofóbico pode ser percebido na Figura 6, onde pode ser observado a característica repulsiva da água do material.

Resumidamente, Chen e colaboradores (2021), definem a biomassa original bruta como: (1) natureza higroscópica; (2) alto teor de umidade e altas relações atômicas H/C e O/C; (3) baixo valor calórico; (4) moagem difícil; (5) grande volume e baixa densidade aparente; (6) maior degradação biológica; e (7) não homogeneidade. Já a biomassa torrefada supera em qualidade quando comparados a bruta, como: (1) maior hidrofobicidade ou resistividade à água; (2) menor teor de umidade e relações atômicas H/C e O/C; (3) maior poder calorífico; (4) moagem facilitada; (5) maiores densidades de massa e energia (adensamento) (6) menor biodegradação; e (7) maior homogeneidade na biomassa. Na Tabela 2 está demonstrado os ganhos de qualidade na biomassa torrefada esquematicamente.

Figura 6 - Comportamento Hidrofóbico da Biomassa Torrefada



Fonte: (NORDIN *et al.*, 2013)

Tabela 2 - Ganhos de qualidade na biomassa torrefada

Biomassa natural	Principais Ganhos com Torrefação
Elevada teor de umidade	Reduz drasticamente a umidade. Há um aumento na liberação de H ₂ na gaseificação (gás de síntese).
Elevada razão de O/C e H/C	Eleva a densidade energética da biomassa (diagrama de van Krevelen). A desoxigenação e a desidrogenação ocorrem relativamente mais rápido do que a descarbonização, proporcionando uma maior concentração de carbono na biomassa.
Elevada Biodegradabilidade	Após a torrefação, a quebra significativa de hemiceluloses, o qual serve de nutriente para o desenvolvimento de fungos, eleva a durabilidade da biomassa
Natureza higroscópica	Aumenta a hidrofobicidade. A biomassa torrefada tem menor teor de umidade, possibilitando um longo período de armazenamento.
Baixo poder calorífico e densidade	A torrefação é, portanto, usada para remover componentes, átomos de (H e O) da biomassa, produzindo poderes caloríficos próximos ao carvão mineral (25–35 MJ·kg ⁻¹).
Baixa Redução de Tamanho	As paredes celulares são destruídas e os poros se tornam o resultado da redução de matéria volátil. A torrefação aumenta a capacidade de moagem da biomassa, o que é essencial para outras aplicações

Fonte: adaptado de Piersa e colaboradores (2022)

2.2.2 Torrefação dos Polímeros da Biomassa e seus Produtos

Durante a torrefação da biomassa, os principais componentes da biomassa (especialmente a hemicelulose) são degradados em produtos gasosos e líquidos. Várias reações de degradação térmica (como desidratação, descarbonização, desidrogenação, desoxigenação, quebra de ligações glicosídicas e ligações C-O/C-C) ocorrem para formar componentes orgânicos gasosos, como ácidos (acético), álcoois, aldeídos, éteres, extrativos (TUMULURU et al., 2011a; CHEN, D. et al., 2020; CHEN, W. H. et al., 2021).

Na torrefação, há primeiramente a saída da água em temperaturas mais baixas. A hemicelulose é decomposta (desvolatilizada) e carbonizada até certo limite, produzindo consideráveis voláteis e biomassa torrefada (sólido). Já a lignina e celulose são menos desvolatilizadas, e despolimerizadas. A lignina é decomposta levemente a partir de temperaturas de 200 °C, porém gradualmente mais decomposta conforme há um aumento da

temperatura. Durante o processo de torrefação, a maioria das ligações intra- e intermoleculares de hidrogênio são rompidas e há quebra de ligações C-O, C-C e a saída, principalmente, de grupos hidroxilas (-OH) (TUMULURU et al., 2011a).

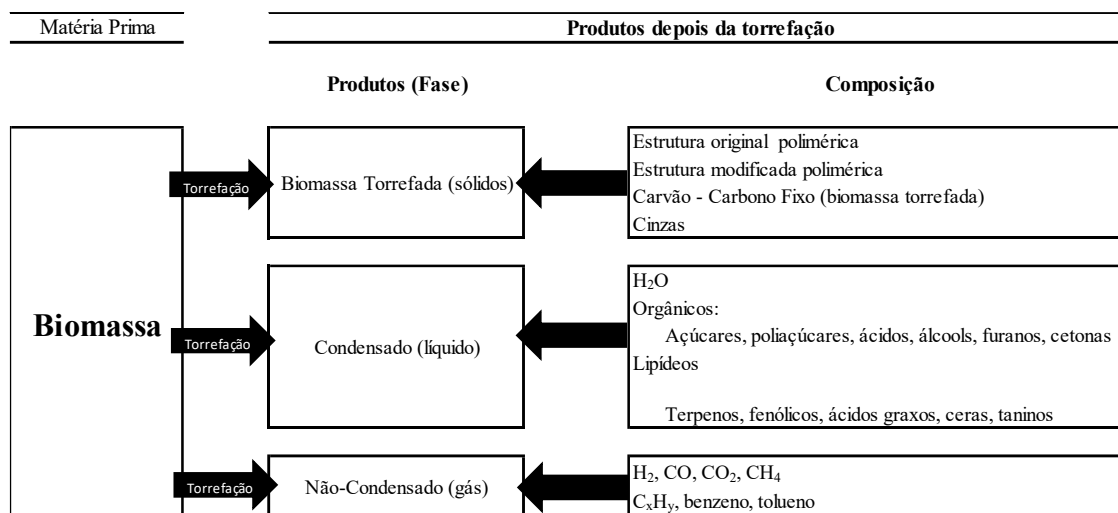
Figura 7 - Mecanismos de reações em Ocorrência na Torrefação

	200°C	225°C	250°C	275°C	300°C
Hemicelulose	Desacetilação		Degradação		
	Despolimerização				
Celulose	Despolimerização		Degradação		
	Decomposição da celulose amorfa	Decomposição da celulose cristalina			
Lignina	Desmetoxilação (siringol) Condensação	Despolimerização		Desmetoxilação (gualacils)	Clivagem das ligações alifáticas Degradação de monômeros

Fonte: Adaptado de Chen e colaboradores (2021)

Na torrefação, são gerados 3 tipologias de produto: um produto sólido chamado biochar (mais adequadamente denominado biomassa torrefada); gases permanentes (ou não condensáveis) incluindo hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos leves como metano (CH₄) e etileno (C₂H₄), principalmente atribuídos a decomposição da hemicelulose (BERGMAN; KIEL, 2005; NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; TUMULURU et al., 2011a); e uma mistura condensável (líquido) contendo principalmente água, compostos orgânicos (como o ácido acético, alcoóis, aldeídos, cetonas, furfural e outros mono-aromáticos) e lipídios (BACH; SKREIBERG, 2016; SARKER et al., 2021; VAN DER STELT et al., 2011; NORDIN et al., 2013). Tolueno, benzeno e hidrocarbonetos de baixo peso molecular (C_xH_y) também são detectados (Figura 8). As quantidades produzidas de voláteis aumentam conforme se aumenta a temperatura de torrefação (CHEN; PENG; BI, 2015; BERGMAN et al., 2005; NORDIN et al., 2013). A torrefação, resumidamente, retira das estruturas poliméricas naturais água, voláteis oxigenados de baixo peso molecular, além de hidrocarbonetos leves (DAI, et al., 2019a; TUMULURU et al., 2011b; VAN DER STELT et al., 2011; CHEN, et al., 2021; NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; CHEN; PENG; BI, 2015).

Figura 8 - Esquema Típico da Torrefação e Composição de seus Produtos



Fonte: adaptado de Bergman *et al.*, (2005)

O produto sólido, principal produto da torrefação, basicamente é composto por uma estrutura caótica dos açúcares iniciais da biomassa, conjuntamente com os produtos das reações de torrefação de seus polímeros que se mantiveram no sólido. Os produtos das reações são constituídos de grande quantidade estruturais de açúcares modificados, estruturas poliméricas recém formadas com certo grau de anéis aromáticos (típica estrutura de carvão rico em carbono) e uma porção de cinzas (BERGMAN *et al.*, 2005).

Há um aumento dos teores de extrativos a medida que se aumenta a temperatura de torrefação, quando comparados à biomassa sem tratamento térmico (PEREIRA *et al.*, 2016; SILVA, 2016; TUMULURU *et al.*, 2011a; BOURGEOIS; BARTHOLIN; GUYONNET 1989), Tabela 3. Isso, no entanto, contradiz a teoria, que informa que os extrativos são volatilizados da biomassa original ao longo do processo de torrefação. Esse aumento, entretanto, está relacionado à contabilização de resíduos da degradação parcial da celulose, hemicelulose e das ligninas que permanece nos sólidos (Figura 9, onde são demonstradas curvas termogravimétricas). As modificações químicas e físicas das biomassas torrefadas em temperaturas entre 200 e 300°C podem torná-las compatíveis aos solventes utilizados para a extração (SILVA, 2016).

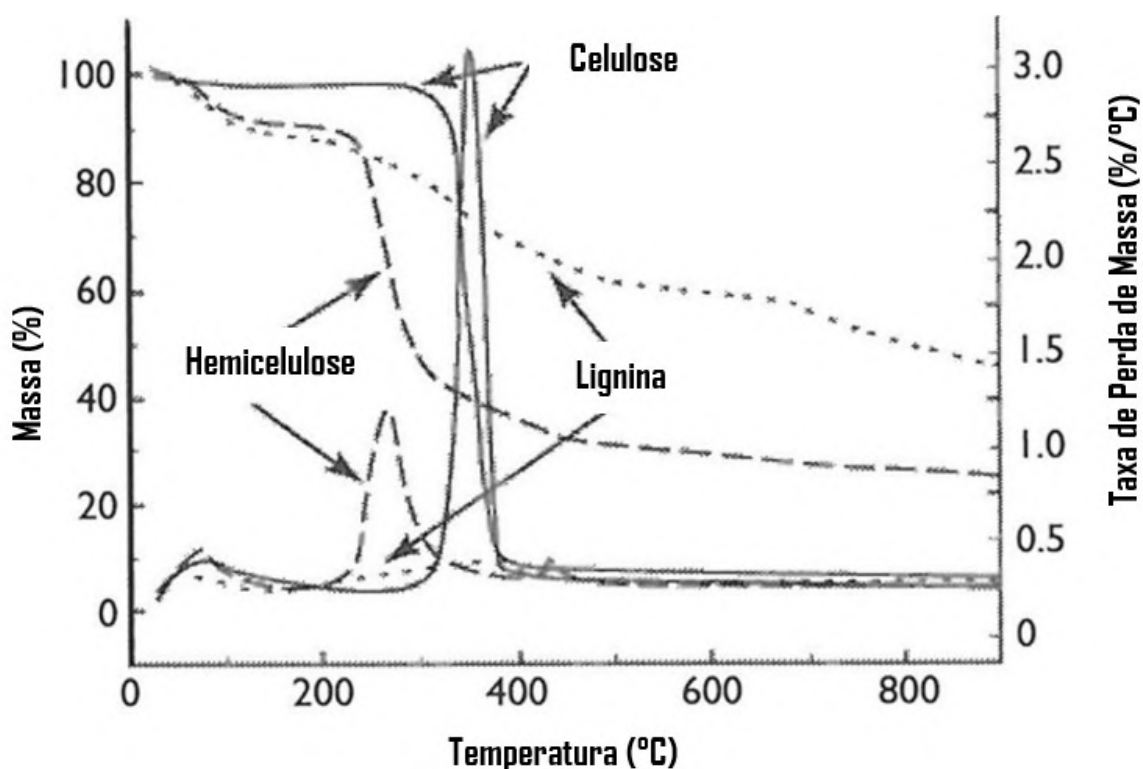
Tabela 3 - Variação de Concentração de Extrativos
Teor de Extrativos (%) (biomassa original e torrefada em diferentes temperaturas)

Biomassa	Original	200°C	220°C	240°C	250°C	260°C	290°C	300°C	Ref.
Eucalipto	2,60	3,03			4,35			3,10	(PEREIRA <i>et al.</i> , 2016)
Eucalipto	2,8		2,0			6,5		7,4	(SILVA, 2016)
Pinha	14,67			8,19	14,09	19,35	17,98		(BOURGEOIS, BARTHOLIN, GUYONNET 1989)

2.2.3 Tipos de Torrefação – Branda, Média e Severa

A curva de termodegradação (TGA - Figura 9) dá o entendimento da dinâmica térmica (aumento da temperatura) dos polímeros da biomassa. As curvas apresentam como o polímero se decompõem na medida com que gradativamente é elevada a temperatura. Como pode-se observar, a hemicelulose é a primeira a iniciar sua decomposição e em seguida a celulose é quem inicia o processo. A lignina apresenta decomposição contínua ao longo do aumento de temperatura (HORNUNG, STENZEL, 2019). Estas curvas são essenciais para a avaliação da temperatura de torrefação.

Figura 9 - Curva TGA do Polímeros da Biomassa



Fonte: (HORNUNG, STENZEL, 2019)

O pré-tratamento térmico por torrefação, propostos por Chen e Kuo (2011), pode ser classificada em três tipos segundo faixas de temperatura de processamento: severa (*severe*), moderada (*mild*) e leve (*light*); suas faixas de temperatura correspondentes são 275–300 °C, 235–275 °C e 200–235 °C, respectivamente.

Dentre os polímeros naturais (celulose, hemicelulose e lignina), a hemicelulose apresenta-se como sendo a mais reativa. Durante a torrefação leve (200-235°C) a umidade e moléculas de baixo peso molecular contidas na biomassa são retiradas e a hemicelulose é

degradada até certo ponto, enquanto a celulose é pouco ou dificilmente afetada e a lignina afetada continuamente, mas sem grandes perdas de massa; isso faz com que a perda de peso seja pequena e o poder calorífico aumente minimamente. Quando a torrefação segue para moderada (235-275°C), há a degradação intensa da hemicelulose e em concomitância há grande geração de voláteis; a hemicelulose é substancialmente consumida e a celulose somente afetada até certo ponto (quebrada em alguns ramos). Já na torrefação severa (275-300°C), a hemicelulose é praticamente esgotada e a celulose é consumida em grandes proporções (rompida até certo ponto). A lignina, por sua vez, permanece pouco degradada nessas faixas de temperaturas (mais estável). A síntese do processo está esquematizando na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação da torrefação e Características dos Produtos

Classificação	Leve	Moderada	Severa
Temperatura	200-235	235-275	275-300
Decomposição			
Hemicelulose	Moderada	Moderada-Elevada	Elevada
Celulose	Leve	Leve-Moderada	Leve-Moderada
Lignina	Leve	Leve	Leve
Produtos			
Gás	H ₂ , CO, CO ₂ , tolueno, benzeno, CH ₄ , C _x H _y		
Líquido	água, ácido acético, alcools, cetonas, aldeídos		
Sólido	Biomassa Torrefada e Cinzas		
Cor Líquido	Marrom	Marrom/Negro	Negro
Cor Sólido	Marrom	Marrom/Negro	Negro

Fonte: (CHEN; PENG; BI, 2015; TUMULURU et al., 2011a)

Deng e colaboradores (2009) relatam que quanto maior a temperatura e o tempo de duração da torrefação, menor é o rendimento sólido e maior a quantidade de voláteis produzidos, tanto de condensáveis, como de não condensáveis. Os teores de inorgânicos (cinzas), teor de umidade, quantidade e arranjo estruturadas dos polímeros da biomassa também são influenciadores no grau de severidade da torrefação (CHEW; DOSHI, 2011). O grau de torrefação também pode ser mensurado pela mudança da coloração da biomassa, trocando da tonalidade marrom (temperaturas mais baixas) para negra (mais próxima a 300°C). Isso é atribuído as mudanças composicionais da biomassa (TUMULURU et al., 2011a).

Para Bergman et al. (2005), a biomassa quando passa por processo de torrefação, Figura 10, atravessa 5 estágios:

1º) Aquecimento Inicial: etapa de aquecimento da biomassa até início de evaporação da água;

2º) Pré-secagem: a umidade livre da biomassa é evaporada a uma taxa constante até que taxa de evaporação da água comece a diminuir;

3º) Pós-secagem e aquecimento intermediário: nessa etapa a biomassa chega a temperaturas de 200°C. A água fisicamente ligada é liberada e a resistência térmica para aquecimento é interno a biomassa. Nessa etapa a biomassa está praticamente livre de umidade. Durante esta fase, pode-se esperar alguma perda de massa, pois composto orgânicos leves podem evaporar;

4º) Torrefação: há a elevação da temperatura acima de 200°C e o retorno a essa temperatura. Nessa etapa está compreendido o aquecimento da biomassa, a temperatura de constância (temperatura de pico) e de resfriamento da biomassa; a desvolatilização (perda de massa) começa durante o período de aquecimento, continua durante o período de temperatura constante e para durante o resfriamento;

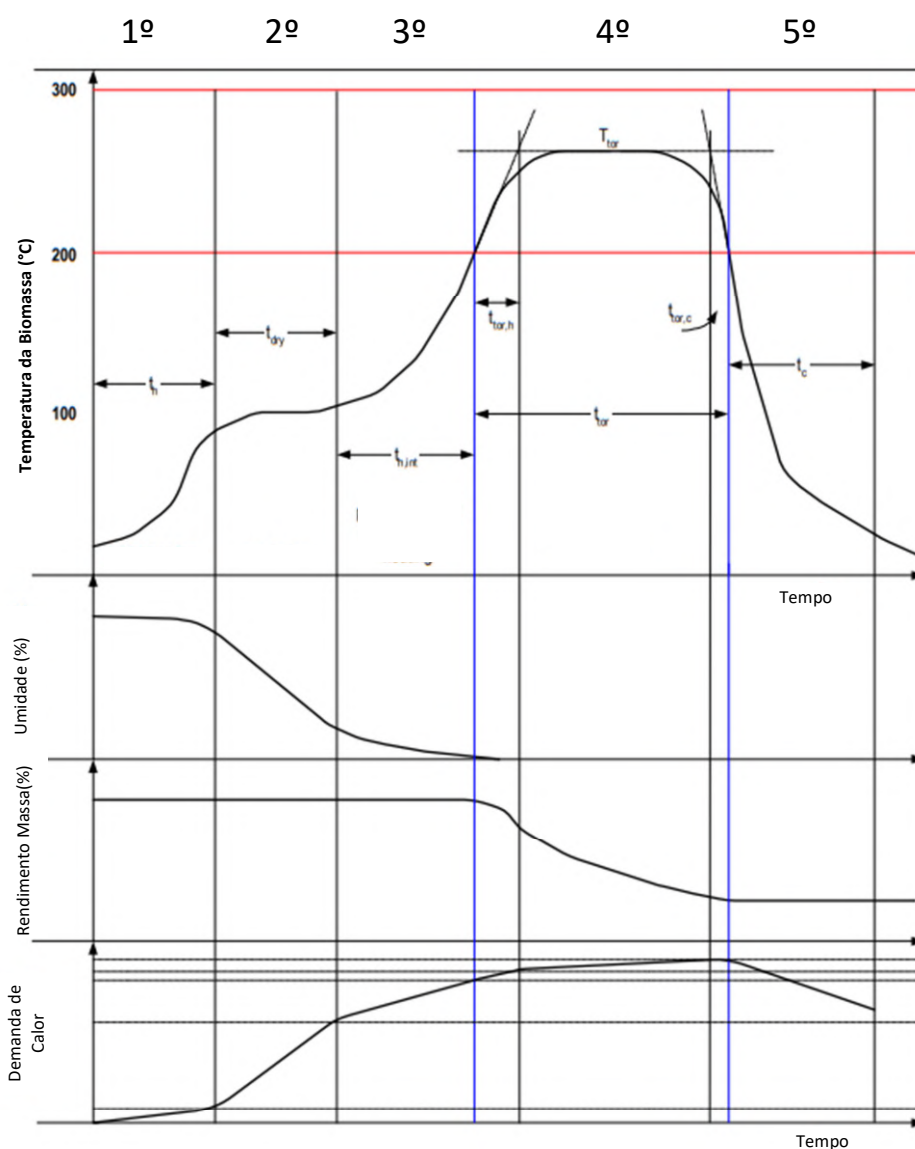
5º) Resfriamento de Sólidos: retorno a uma determinada temperatura.

As etapas de maior demanda energética para o processo de torrefação estão na etapa de Pré-secagem – 2º - (variando conforme a umidade da biomassa, sendo caracterizado pela energia de vaporização) e Pós-secagem – 3º - (retirada de umidade residual). A torrefação em si, não demanda de grandes quantidades de energia. (BERGMAN et al., 2005).

Além da temperatura de processamento da torrefação, o tempo de reação também influencia o desempenho e severidade do processo. A torrefação é normalmente conduzida de vários minutos até várias horas. Durante o processamento há o aumento do teor de carbono no sólido, desta forma quanto maior o tempo de reação, maior é o poder calorífico da biomassa. Além disso, a termodegradação da biomassa via torrefação apresenta maior redução da massa inicial na primeira hora de processamento e mais lenta a partir de uma hora. Conseqüentemente, a duração da torrefação é normalmente controlada dentro da primeira hora. Diferentes combinações de temperatura e tempo de residência podem ser usadas para atingir um determinado grau de torrefação, expresso pelo perda de massa

(CHEN et al., 2021). Os tempos de torrefação documentados variam: de 10 a 60 minutos (SARKER et al., 2021), de 30 a 120 minutos (ONG et al., 2021; NORDIN et al., 2013), < 60 minutos (BACH; SKREIBERG, 2016), minutos até horas (DAI, L. et al., 2019a), de 20 a 40 minutos (TUMULURU et al., 2021), de 30 a 60 minutos (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014), 15 e 60 minutos (BATES; GHONIEM, 2012).

Figura 10 - Etapas da Torrefação



Fonte: adaptado de BERGMAN et al. (2005)

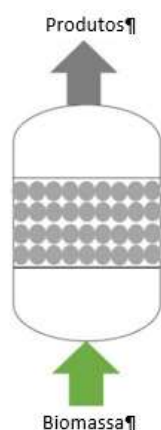
2.2.4 Tipos de Reatores para Torrefação

O design de reatores utilizados para secagem, pirólise ou gaseificação foram, de certo modo, adaptados para realizar torrefação, já que todos passam por algum tipo de aquecimento. Ou seja, passaram por algum tipo de modificação e adaptação em seu design. A classificação do reator é motivada segundo o tipo de movimento/condução da biomassa

em seu interior, modo de aquecimento e transferência de calor e os meios assistidos. Dentre os principais tipos de reatores para condução de termoprocessamento de torrefação (Figura 11, Figura 12 e Figura 13), destacam-se: 1) reator de leito fixo; 2) reator de tambor/cilindro rotativo; 3) reator *auger/screw/rosca/parafuso*; 4) reator de micro-ondas; 5) reator de leito móvel; e 6) outros (reator de leito fluidizado, reator torbed/torção, reator de correia, reator de fornos múltiplos, reator elevador elétrico vibratório, reator de leito rotativo, reator de leito em jorro). Em essência, não há uma convenção de reator ideal, mas a especificação do reator dependerá da tipologia da matérias-primas ou método de condução eleito (CHEN et al, 2021; TUMULURU et al., 2021).

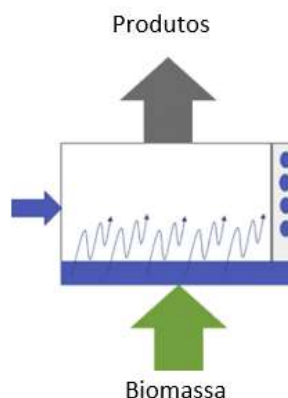
Há vantagens e desvantagens em qualquer tipo de reator; embora, o foco seja sempre obter uma biomassa torrefada homogênea e regular. Para se alcançar essas características, o reator deve possuir design que possibilite uma uniforme transferência de massa e calor (TUMULURU et al., 2021).

Figura 11 - Reator de Leito Fixo



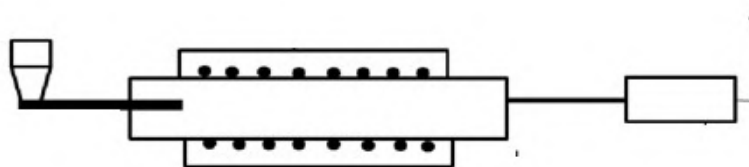
Fonte: adaptado de Tumuluru e colaboradores (2021)

Figura 12 - Reator de Micro-ondas



Fonte: adaptado de Tumuluru e colaboradores (2021)

Figura 13 - Reator Rotativo



Fonte: adaptado de Mei e colaboradores (2015)

2.3 Reator Auger

Roscas transportadoras primeiramente foram utilizadas na indústria do carvão no século 20. Até hoje, elas vêm passando por transformações e adaptações para uso como

secadores, transportadores, termoprocessamentos e extrusões (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016). Foram utilizadas para produção de coque de carvão por pirólise lenta; problemas, no entanto, foram detectados, como o depósito de alcatrão nas hélices. Melhorias e adaptação ao longo do tempo foram realizadas, tal como eixo oco aquecido. Desde então, inúmeros usos e estudos foram realizados para sua utilização como reator de termoprocessamento de biomassa, inclusive em escala comercial (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016; ULLAL, 2017). O Reator Auger é composto por uma hélice helicoidal (parafuso), um eixo de acionamento conectado a um dispositivo (motor elétrico), contendo um invólucro calha em forma de ‘U’ ou um tubo ‘O’ (VERCLYTE; PIETERS; RONSSE, 2013), Figura 14.

Figura 14 - Demonstrativo Reator Auger



Fonte: adaptado de Trimech (2023)

Além da torrefação, muitos estudos vem desmonstrando a versatilidade de condução de diferentes tipo de termoprocessamento em reator tipo rosca, incluindo a pirólise lenta, a intermediária e a rápida uma vez que produzem quantidades de produtos muito próximas as quantidade observadas em seus respectivos método tradicionais (FUNKE et al., 2017; MORGANO, 2019). No caso de pirólise rápida, a taxa de transferência de calor é inferior a observada em leito fluidizado e se apresenta como um desafio (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019; CHANG et al., 2012). Apesar de tudo, o reator *auger* possui um design relativamente simples, supera alguns dos problemas de transmissão de calor de outros

reatores e não exige grandes especificações de tamanho de biomassa (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019)

O reator *auger* vem ganhando importância nos últimos tempos em questões de métodos de condução de termoprocessamento – principalmente em pequenas e médias indústrias - diante de sua versatilidade em diversos parâmetros operacionais, como a fácil separação de sólidos e voláteis (VERMA et al., 2012; ULLAL, 2017). Além disso, vem ganhando notoriedade pela robustez e estabilidade, assim como pela excelente reprodutibilidade dos resultados (MORGANO et al., 2018).

Neste tipo de reator é possível o uso de carreadores de calor (introduzidos conjuntamente com a biomassa), ou seja, materiais que auxiliam no transporte de calor necessário para o termoprocessamento ou que esse calor seja mais rapidamente transferido para a biomassa (diretamente). Para isso, é utilizado tradicionalmente areia e/ou esferas de aço ou de cerâmica; sendo essa metodologia mais comumente utilizada para proceder pirólise rápida (GARCIA-NUNEZ et al., 2017; BROWN, 2009; FUNKE et al., 2017; QI; WRIGHT, 2020).

Trata-se de um reator tubular e contínuo em que a biomassa lignocelulósica é introduzida em seu interior e conduzida por uma rosca transportadora que gira em torno do seu eixo, enquanto o calor necessário para o processo termoquímico é transferido para biomassa ao longo da parede tubular aquecida do reator. As duas funções principais da rosca transportadora são:

- 1^a) transporte, mistura e agitação da biomassa ao longo do reator; e
- 2^a) controle do tempo de residência da biomassa em ambiente reacional (DHYANI; BHASKAR, 2018).

Uma vantagem do uso do reator tipo *auger* é a possibilidade de alimentação de biomassas heterogêneas, com granulometria variável ou de difícil manuseio (BRIDGWATER, 2012, 2018). Os reatores *auger* requerem pouco ou nenhum gás de arraste, mas aumenta o tempo de residência dos voláteis no reator (ULLAL, 2017; BROWN, 2009).

É importante destacar a versatilidade que o reator *auger* proporciona por ser extremamente compacto, o qual muitas vezes são produzidos com a possibilidade de transportá-lo a outras localidades (portáteis), onde a biomassa é abundante (JALALIFAR et al., 2020). Unidade modulares e portáteis já foram demonstradas, como é o caso da *Renewable Oil International (LLC-ROI)* e *PyroformerTM* (EBRI - Aston University) (DHYANI; BHASKAR, 2018).

Uma vantagem desses reatores é que o tempo de residência da biomassa na zona aquecida pode ser controlado facilmente variando a velocidade de rotação da rosca ou o passo da rosca (BRASSARD, 2017).

Em reatores de torrefação do tipo *auger*, além dos rosca simples (*single*) os duplos também vem ganhando atenção (*twin*). Os reatores *twin* apresentam algumas vantagens em comparação aos *single*, como melhor agitação e mistura, troca térmica e ganho de capacidade para o termoprocessamento de biomassas. Ademais, os de rosca simples possuem maior propensão a acúmulos e obstruções, já os de rosca dupla têm menos possibilidade de formar acúmulos, pois os parafusos são totalmente engrenados e entrelaçados, bem como auxilia na mistura e transferência de calor internamente ao reator (FAKULT; ERLANGUNG, [s. d.]; BRASSARD, 2017; ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016).

2.3.1 Condições e Observações Operacionais

Na Tabela 5 e Tabela 6 que seguem, está demonstrado as diferentes tipologias de pirólise e torrefação, bem como parâmetros operacionais e principais produtos. Percebe-se a versatilidade dos reatores *auger*, uma vez que se encaixam em todos esses termoprocessamentos.

Tabela 5 - Tipos de termoprocessamento e parâmetros de processo

Tipo de Pirólise	Condições de Pirólise				Principal Produto
	Tempo residências em ambiente reacional				
	Voláteis	Sólidos	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temp. (°C)	
Rápida	Abaixo 2 segundos	Curto	Alta	400-600	Líquido
Intermediária	Entre 10 e 30 segundos	Segundos a minutos	Média	400-600	Sólido, líquido e gás
Lenta	Longos	De minutos a dias	Muito Baixa	300-500	Sólido
Torrefação	De minutos a horas	De minutos a horas	Baixa	250-350	Sólido

Fonte: adaptado de Campuzano; Brown; Martínez (2019)

Tabela 6 - Tipos de reatores mais comuns

Tipo de Pirólise	Reatores mais utilizados
Rápida	Auger, BFB, CFB
Intermediária	Auger, rotativo, leito fixo
Lenta	Auger, rotativo, leito fixo
Torrefação	Auger, rotativo, leito fixo

Fonte: adaptado de Campuzano; Brown; Martínez (2019)

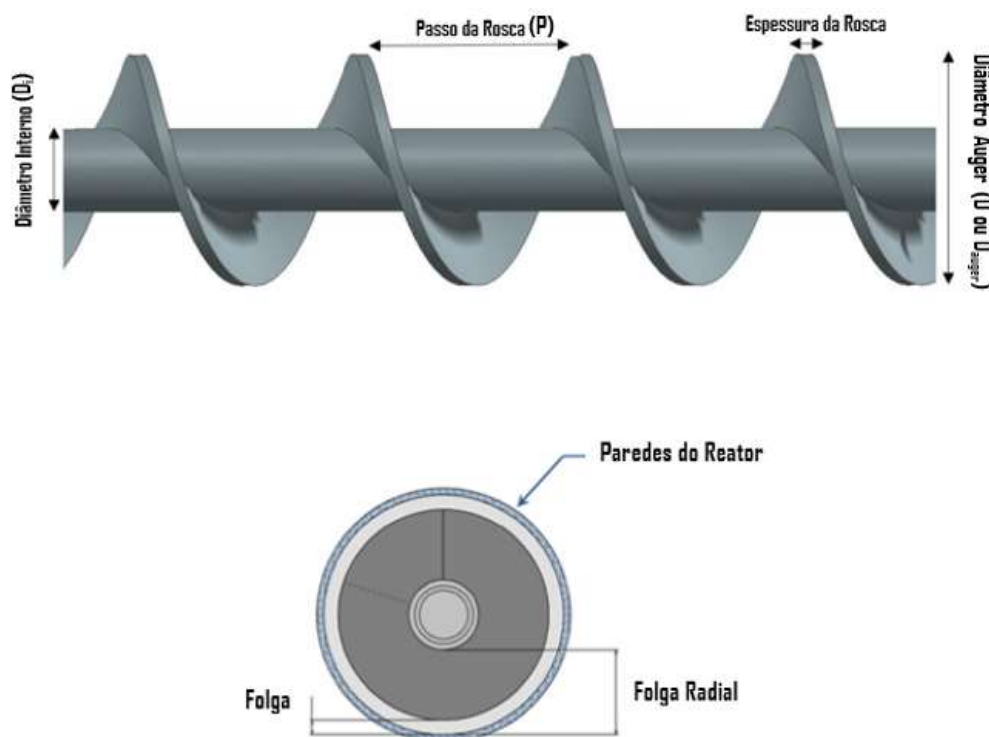
Os reatores de rosca/*auger* (Figura 16) a alimentação é contínua, ou seja, o material lignocelulósico é constantemente introduzida e retirada do reator pela helicóide. A biomassa é conduzida pela(s) rosca(s) transportadora(s) na medida que conjuntamente é realizada a mistura da biomassa e a troca térmica entre sólido, gás e parede do reator; o grau de mistura provocado pela rotação da rosca é essencial para a troca térmica entre a biomassa e as paredes

do reator (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016). A biomassa é aquecida até a temperatura eleita para a torrefação e mantida em ambiente reacional por um determinado tempo (de minutos a horas), tudo isso controlado pela rotação da rosca. A rosca transportadora conduz a biomassa torrefada até a saída do reator, os voláteis são conduzidos para um sistema condutor de gases onde podem ser resfriados para geração de produtos líquidos, bem como simplesmente queimados para o aquecimento do próprio processo (ARAMIDEH et al., 2015; CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019). O uso de ciclones para separação de gases e sólidos também é habitual. No caso de uso de rosca alimentadora, ela não deve fornecer excesso de biomassa à rosca do reator, uma vez que pode sofrer bloqueios (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016; RONSSE, 2013).

As principais características físicas de uma rosca transportadora (Figura 15):

- i) o diâmetro externo/*auger* (D ou D_{auger}) e interno (eixo) (D_i);
- ii) o passo (P) (distância entre lances adjacentes);
- iii) a folga e folga radial; e
- iv) o comprimento (L).

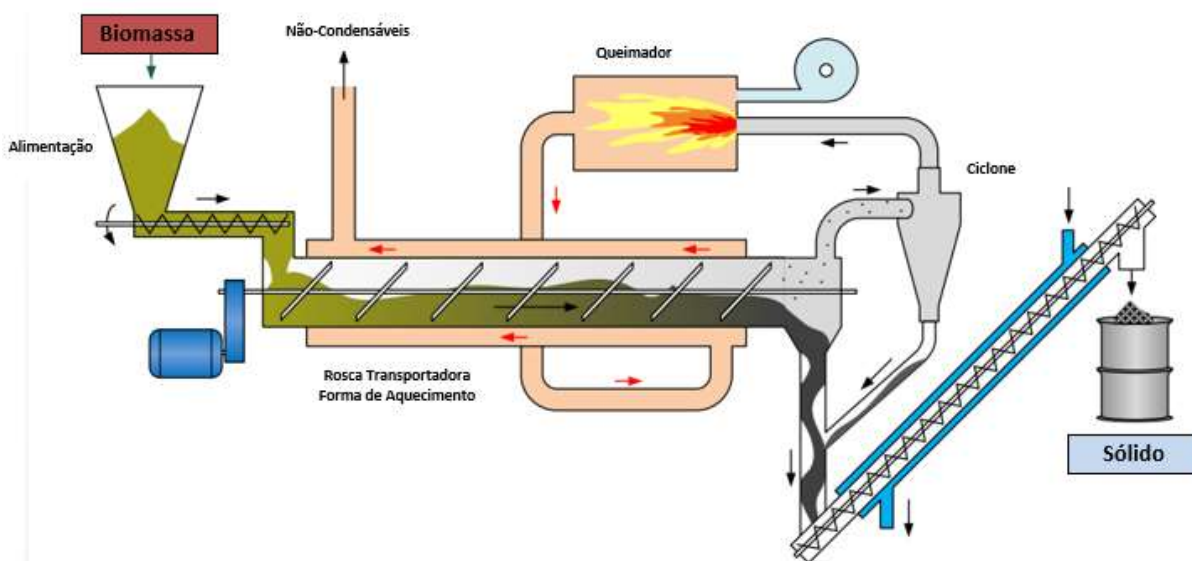
Figura 15 - Definições da Rosca Transportadora



Fonte: Adaptado de Dunning (2019).

Em reatores *auger*, Figura 16, majoritariamente é utilizado o aquecimento indireto da biomassa, ou seja, do aquecimento externo e em seguida do contato entre a parede do reator aquecida para a biomassa, Figura 17 (BROWN, 2009; CHEN, W. H. et al., 2021); normalmente isso dificulta a escalabilidade (BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2017). Devido a rosca transportadora, é observado um efeito centrífugo das partículas da biomassa que frequentemente colidem com a parede aquecida do reator, melhorando a troca térmica e aquecimento da biomassa (ARAMIDEH et al., 2015).

Figura 16 - Desenho Esquemático Reator Tipo Auger



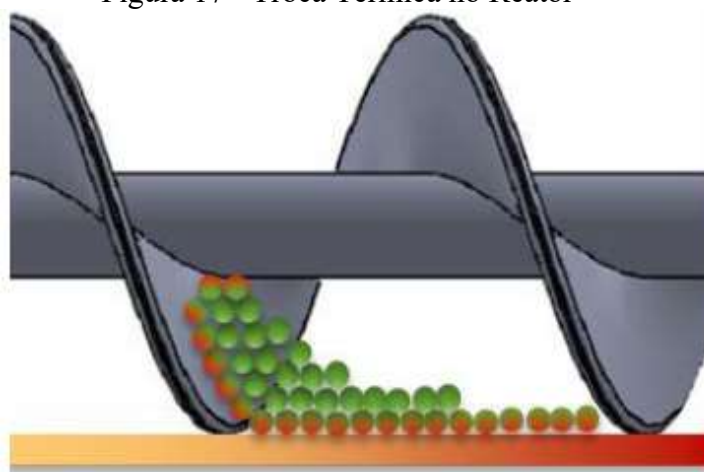
Fonte: adaptado de Ronsse (2013)

O passo (P) e a relação do passo com o diâmetro auger (D_{auger}), ou seja (P/D_{auger}), são parâmetros muito importantes na determinação da velocidade de transporte da biomassa e mistura da biomassa (definições apresentadas na Figura 17). Uma baixa relação P/D leva a uma taxa de fluxo uniforme, o que pode aumentar a taxa de transferência de calor (mais voltas para percorrer um determinado caminho). Por outro lado, um passo maior da rosca leva a uma melhor mistura e melhora a distribuição de calor. Além disso, o grau de preenchimento da rosca também influencia na mistura interna da biomassa, baixos graus de preenchimento causam uma boa mistura e mantem um fluxo baixo; já um grau elevado de preenchimento da rosca por biomassa leva a uma baixa mistura e maior taxa de fluxo, observa-se também uma redução na distribuição radial de calor, devido à baixa condutividade térmica da biomassa (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019; FUNKE et al., 2018; ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016; VERCLYTE; PIETERS; RONSSE, 2013). O tempo de residência da biomassa no reator auger é controlado pela velocidade rotação da rosca, comprimento do reator e do passo. Dependendo dos tamanhos das roscas, suportes podem ser adicionados, bem como deve haver uma folga entre os componentes do reator,

pois há dilatação do material no processo de aquecimento e isso deve ser previsto em projeto (BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2017).

Alguns fabricantes de roscas transportadores afirmam que diâmetros *auger* (D_{auger}) grandes transportam melhor que pequenos. Além disso, pequenos passos (P) tendem a transportar menores volume de materiais e grandes passos tende a revolucionar o material em vez de transporta-lo (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019; BORTOLAMASI; FOTTNER, 2001; VERCLYTE; PIETERS; RONSSE, 2013).

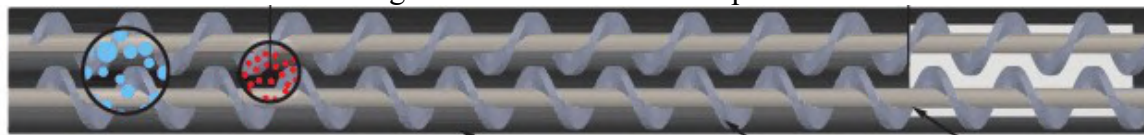
Figura 17 - Troca Térmica no Reator



Fonte: Adaptado de Roegiers; Pieters; Ronsse (2016)

O grau de mistura pode ser controlado pela homogeneidade dos produtos (coloração), dado uma boa troca de calor entre o sistema. Materiais heterogêneos (diferentes formas, densidade e tamanhos) favorecem a segregação, comportamento oposto a mistura. Em reatores rosca esse processo deve ser evitado ao máximo, frente a má qualidade dos produtos (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019). Além do reator simples (*single*), o reator duplo (*twin*) é um design de reator que possibilita alguns ganhos, Figura 18. O reator *auger* duplo (entrelaçado) promove uma constante ondulação/agitação na biomassa quando comparados ao simples. Isso se deve ao fato de que uma hélice transporta biomassa para a outra e vice-versa, assim uma interfere no movimento da outra, promovendo uma melhor agitação e transferência de calor das paredes para a biomassa. Além disso, esse movimento retira material que poderia estagnar ao longo do percurso, comprometendo o funcionamento do reator. É também reduzido o custo de processamento (diante do aumento da capacidade volumétrica), bem como possibilita uma desvolatilização mais completa do material (carreadores de calor também podem ser utilizados nessa configuração) (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

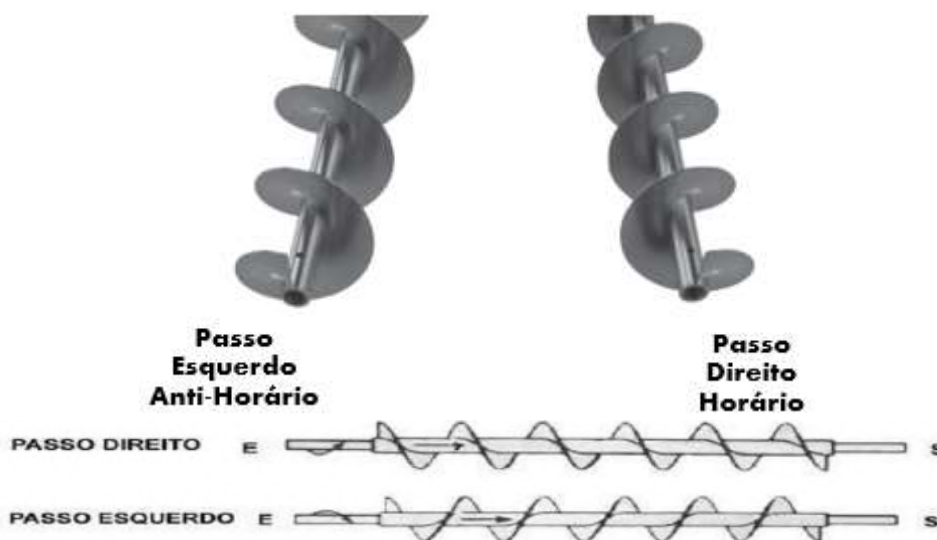
Figura 18 - Reator Rosca Dupla



Fonte: adaptado de Qi; Wright (2020)

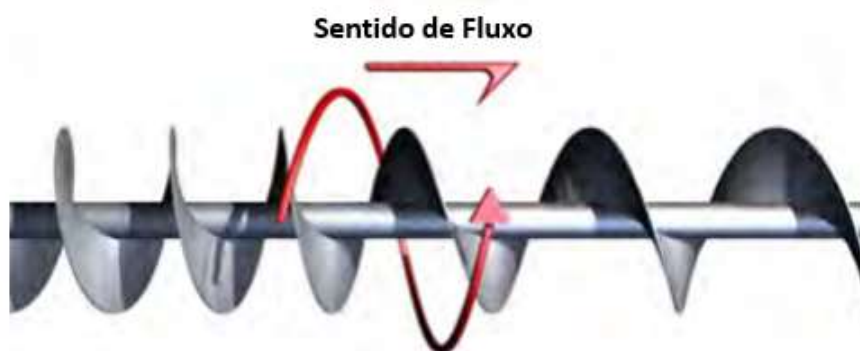
A direção da rosca também é um importante fator, pois dá a direção do fluxo da biomassa: rosca esquerda a hélice está enrolada no eixo no sentido anti-horário; rosca direita, a hélice está enrolada no eixo no sentido horário (Figura 19 e Figura 20). Além da hélice regular, existem outras conformações que podem melhorar a mistura por exemplo (uso de aletas, chicanas, perfurações, vazios). Diante das características da biomassa, a regular acaba sendo a mais utilizada (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

Figura 19 - Sentido das Roscas



Fonte: adaptado de (SANTOS *et al.*, 2018) (KWS, 2015)

Figura 20 - Sentido de Fluxo da Biomassa

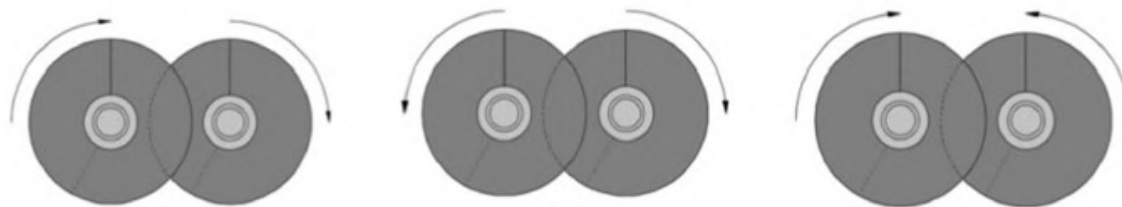


Fonte: adaptado de (KWS, 2015)

Em reatores *twin* (duplo) entrelaçados, pode-se configurar 3 diferentes tipos de rotação, ambos com rotação mesmo sentido, ambos rotacionado no sentido para fora do reator e ambos rotacionando para dentro do reator, conforme Figura 21. Este último é que

apresenta os melhores resultados de mistura, agitação e homogeneidade nos produtos (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

Figura 21 - Conformações de Rotação das Roscas Duplas
Sentido de Rotação das Roscas – Reator Duplo



Fonte: adaptado de Campuzano; Brown; Martínez (2019)

A vazão de matéria-prima depende de vários fatores interligados, como: i) geometria da rosca, ii) velocidade de rotação, iii) grau de preenchimento, iv) inclinação, v) geometria da rosca e da alimentação, e vi) fluidez da matéria-prima, entre outros. O risco de refluxo aumenta com a inclinação, quando a inclinação é de 15° ou superiores, há redução na eficiência de transporte (BORTOLAMASI; FOTTNER, 2001)

Apesar do design do reator de rosca parecer extremamente simples, a física envolvida no transporte de sólidos é extremamente complexa e demanda ainda de muitos estudos. De modo geral, os projetos de roscas transportadoras demanda da confiança em dados empíricos, diante das inúmeras características dos materiais granulares, com diferentes características de fluidez, forças coesivas, abrasivos (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

2.3.2 *Prevenção de Problemas de Alimentação em Reatores Auger*

Dai e colaboradores (2012) apontam que o ponto crítico para transportadores *auger* em processos termoquímicos é que não haja interrupções ao longo de um processo de alimentação de biomassa; do contrário, os sólidos podem ficar bloqueados, resultando em falhas no fluxo contínuo e uniforme. As biomassas (lenhosas, agrícolas) variam muito em tamanho, forma, densidade, teor de umidade, compressibilidade, coesão e adesividade. Os sistemas de alimentação devem, idealmente, ser adequados para uma ampla gama de biomassas.

Serragem, palha, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, capim tendem a ser compressíveis e flexíveis. Alguns materiais são facilmente quebradiços/fraturados (pellets de madeira, cascas de amendoim, cascas de nozes, cascas quebradiças), enquanto outros (grama, palha, feno, talos de algodão, palha de milho, lascas de madeira e aparas de madeira)

podem ser fibrosos e resistentes. São essas propriedades da biomassa que causam uma série de problemas em processos de transporte em roscas. O tamanho do material, formato (biomassa possuem baixa esfericidade e são irregulares, o que causam efeito de fricção), umidade (maior teor de umidade provoca maior coesão no material e tendência de bloqueios e corrosão dos sistemas), densidade volumétrica e de partícula (empacotamento e fluxo), compressibilidade e razão de compactação (sólidos muito compressível tende a resistir ao movimento, enquanto sólidos mais duros tendem a fluir) e outros (rugosidade, dureza). Essas propriedades são mutáveis, ou seja, podem mudar ao longo do tempo (clima, biodegradação) (DAI; CUI; GRACE, 2012). .

Problemas como bloqueio, formação de pontes/arqueamento em roscas podem ocorrer devido ao alto teor de umidade da biomassa, formato irregular do material e design inadequado entre o invólucro/calha e o parafuso que levam a um fluxo instável. Partículas com superfícies rugosas, formato mais irregular, distribuição de tamanho mais ampla e densidades maiores tendem a aumentar o bloqueio, o que leva a um torque maior para o giro da rosca. Compressibilidade do material também altera o fluxo (MINGLANI et al., 2020). (BORTOLAMASI; FOTTNER, 2001). Força de coesão, fricção interna e fricção na parede são essenciais para medir a fluidez das biomassas (SCHULZE, 2010; PACHÓN-MORALES et al., 2017; DAI; CUI; GRACE, 2012). Há uma escala de fluidez dos materiais (Tabela 7) essencial para dimensionamentos de roscas transportadoras de biomassas, os quais são levados em consideração por muitos fornecedores de roscas transportadoras (JANIKE, 1964; DAI; CUI; GRACE, 2012).

Tabela 7 - Classificação de Fluidez de Materiais

Janike classificação de fluidez pelo índice de fluxo

Fluidez	Difícil	Muito Coesivo	Coesivo	Fluxo fácil	Fluxo livre
Índice de Fluxo	<1	<2	<4	<10	>10

Fonte: adaptado de Jenike (1964)

Problemas em roscas transportadoras normalmente são (DAI; CUI; GRACE, 2012):

- a falta de fluxo (buracos e vazios);
- bloqueio (sobre carga, partículas grandes, densas, alta resistência ou partículas coesivas);
- flutuações na taxa de alimentação;
- defeitos de fabricação da rosca (maior consumo de energia e compactação da biomassa).

Para a prevenção de trancamento e obstruções é recomendado uma folga entre a hélice da rosca e o invólucro de pelo menos 2 vezes a maior que dimensão da biomassa,

principalmente para biomassa de alta resistência (lascas de madeira). É recomendado que o maior tamanho de partícula de biomassa não exceda 2/3 do passo mínimo da rosca. Cuidados com biomassas coesivas ou adesivos (por exemplo, partículas de diâmetro <100 mm ou teor de umidade >50%) devem ser tomados para evitar bloqueios e acúmulos no processo. Geralmente as hélices da rosca cisalham o material compactado, porém isso não é regra. As biomassas muito fibrosas, como lascas de madeira, são propensas a compactação e entupimentos, especialmente as de grandes dimensões (CHONGCHITPAISAN; SUDSAWAT, 2022). O atrito e o desgaste mecânico geram finos de biomassa, os quais também geram bloqueios. A inversão do sentido de giro da rosca transportadora pode resolver bloqueios, ao mesmo tempo a potência do motor que aciona o giro deve ser suficientemente alta para romper o entupimento. Para biomassa muito coesivas o uso de roscas duplas é indicado (DAI; CUI; GRACE, 2012).

2.3.3 Operações Típicas e Materiais

Rotações baixas (1-40 RPM) são preferíveis para gerar um bom fluxo e tornar o material entregue mais uniformes (CARSON; PETRO, 2005). Uso de rotação um pouco mais elevado (>30 RPM) reduzem obstruções quando comparado a baixas rotações (<5 RPM). Em altas velocidades o movimento é superior, evitando intertrancamentos de partículas, além da elevada agitação e vibração provocadas. A maioria dos alimentadores helicoidais disponíveis comercialmente possuem diâmetro *auger* (D_{auger}) menor que um metro, tipicamente < 0,6 metros e o ensaio prévio com biomassa é extremamente recomendado (DAI; CUI; GRACE, 2012).

Rolamentos intermediários são necessários se o alimentador de parafuso for muito longo. O comprimento máximo de roscas transportadoras é 3,65 metros, mais que isso são demandados suportes. A temperatura máxima projetada para alimentadores de parafuso é geralmente de cerca de 550°C (CARSON; PETRO, 2005). O aço inoxidável (por exemplo, SS 310 ou 316) é comumente preferido para operações com biomassa (DAI; CUI; GRACE, 2012).

As superfícies do invólucro/calha podem ser revestidas com revestimento (por exemplo, epóxi ou cerâmica) para evitar desgaste abrasivos, combater a corrosão e/ou resistir a altas temperaturas. O acabamento liso e rugoso do invólucro e da hélice podem também ser utilizados. (DAI; CUI; GRACE, 2012).

Capítulo 3 – Metodologia

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias de avaliação de rendimentos de processos de torrefação de diversas biomassas, bem com as metodologias de cálculos para dimensionamento de uma rosca transportadora de reatores tipo *auger* para torrefação.

3.1 Torrefação

A avaliação dos processos de torrefação, segundo os rendimentos de produtos sólidos, é imprescindível para avaliação de viabilidade econômica do processo. Por isso, a verificação de rentabilidade de diferentes biomassas é essencial.

3.1.1 *Rendimento da Torrefação de Biomassas*

Tipicamente em um processo de torrefação de biomassa, 70% da massa inicial é mantida no sólido com aproximadamente 90% da energia inicial, enquanto 30% da massa é transformada em gases com aproximadamente 10% da energia inicial (o qual pode ser queimado no próprio processo ou condensado), conforme esquema da Figura 5. O poder calorífico do sólido pode aumentar entre 15 e 25-30% (de 1-58% (NORDIN et al., 2013)), enquanto a umidade se mantém inferior a 3%. As biomassas originais apresentam material volátil de 80 a 88%, já a biomassa torrefada os valores reduzem em até 35% dos iniciais (TUMULURU et al., 2011a; BERGMAN et al., 2005; VAN DER STELT et al., 2011; IEA, 2015).

Joshi, Di Marcello e De Jong (2015) e Chen e Kuo (2011b) por sua vez, relatam que a torrefação resulta em rendimentos de energia variando de 75 a 90% e rendimentos de massa em torno de 50 a 70%, conforme severidade da torrefação e natureza da biomassa.

Outras literaturas ainda apresentam valores mais variados nos rendimento da torrefação: a produção de biomassa torrefada (produto sólidos) representa entre 24 e 95% da massa e entre 29 e 98% da energia inicial da matéria-prima, esses valores mudam conforme a quantidades de biopolímetos e temperatura de processo (CHEW; DOSHI, 2011).

Os valores de adensamento energético (aumento do poder calorífico para uma mesma quantidade de sólido) alcançam números próximos a 30% superiores (DHYANI; BHASKAR, 2018). Entretanto, tipicamente, os valores adotados de rendimento mássico são entre 60-90% e de manutenção de energia no sólidos de 70 a 95% (NORDIN et al., 2013).

3.1.2 Concentração e Temperaturas de Decomposição dos Polímeros

De modo geral, as quantidades em peso de polímeros naturais das biomassas seguem um lógica (geralmente, celulose > hemiceluloses > lignina) (CHEN et al., 2021). As concentrações típicas desses polímeros, cinzas e extrativos nas biomassas (coníferas, decíduas e herbáceas), bem como as temperaturas típicas, apresentados pela literatura, de decomposição são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Concentrações Típicas de Biomassas

Polímero	Decíduas	Coníferas	Agrícola/herbácea/energética	Decomposição
Hemicelulose	15-36% (CHEN, W. H. et al., 2021)	11-27% (CHEN, W. H. et al., 2021)	22-35%(CHEN, W. H. et al., 2021)	220 e 315°C (YANG, H. et al., 2007)(JALALIFAR et al., 2020)
	15-35% (PRINS, 2005)	20-32% (PRINS, 2005)	35-50% (DHYANI; BHASKAR, 2018)	225-325°C (PRINS, 2005) 100–290 °C (SARKER et al., 2021) 220–280°C (TUMULURU et al., 2011a) 200-260°C (DESIDERI; FANTOZZI 2013) 150-300°C (PAULUS, 2011)
Celulose	39-54% (CHEN, W. H. et al., 2021)	41-50% (CHEN, W. H. et al., 2021)	24-50% (CHEN, W. H. et al., 2021)	260 e 400°C (CHEN, W. H. et al., 2021)
	40-50% (PRINS, 2005)	35-50% (PRINS, 2005)	25-40% (DHYANI; BHASKAR, 2018)	305-375°C (PRINS, 2005) 200–400 °C (SARKER et al., 2021) 240–350°C (TUMULURU et al., 2011a)(DESIDERI; FANTOZZI 2013) 200-400°C (PAULUS, 2011) 315–400 °C (JALALIFAR et al., 2020)
Lignina	17-29% (CHEN, W. H. et al., 2021)	27-30% (CHEN, W. H. et al., 2021)	7-29% (CHEN, W. H. et al., 2021)	160 e 900°C (YANG, H. et al., 2007)(CHEN, W. H. et al., 2021)
	18-25 % (PRINS, 2005)	25-35 % (PRINS, 2005)	10-30% (DHYANI; BHASKAR, 2018)	250-500°C (PRINS, 2005) > 400 °C (SARKER et al., 2021) 280–500°C (TUMULURU et al., 2011a) DESIDERI; FANTOZZI 2013) 150-600°C (PAULUS, 2011) 220-900°C (JALALIFAR et al., 2020)
Extrativos Orgânicos	5% (CHEN, W. H.; PENG, BI, 2015)	3% (CHEN, W. H.; PENG, BI, 2015)	Até 20% (WANG, 2017)(PAULUS, 2011)	--
Cinzas	<1% (WANG et. al, 2017)	<1% (WANG et. al, 2017)	72% (HUBER; IBORRA; CORMA, 2006)	--

Realizados experimentos de torrefação dos polímeros da biomassa individualizados e misturados, Chen e Kuo (2011) sugerem que não há um efeito sinérgico quando os polímeros se encontram conjuntamente, pois o comportamento é muito semelhante a eles individualizados.

3.1.3 Estudo da Torrefação dos Polímeros Individualizados

Chen e Kuo (2011a) buscaram entender o comportamento de decomposição da biomassa a partir de seus polímeros individualizados. Realizaram uma série de processos de torrefação em diferentes temperaturas (200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C) e tempos de aproximadamente 70 minutos para entender como se dava o comportamento térmico dos polímeros. A partir da análise gráfica dos comportamentos de decomposição, Figura 22, pode-se observar os seguintes comportamentos (rendimentos dispostos em base seca):

1º) em torrefação à 200°C e tempos de reação de aproximadamente 70 minutos:

- lignina: apresenta uma pequena decomposição (aproximadamente 5%);
- celulose: decomposição ínfima;
- hemicelulose: decomposição ínfima;

2º) em torrefação à 225°C e tempos de reação de aproximadamente 70 minutos:

- lignina: apresenta uma pequena decomposição mais rápida (aproximadamente 7%);
- celulose: decomposição quase ínfima;
- hemicelulose: decomposição quase ínfima;

3º) em torrefação à 250°C e tempos de reação de aproximadamente 70 minutos:

- lignina: apresenta uma pequena decomposição mais rápida e acentuada (aproximadamente 8%) e permanece constante no restante do tempo;
- celulose: decomposição quase ínfima;
- hemicelulose: apresenta mudança de comportamento térmico, há uma decomposição que aumenta com o tempo, no final do processo quase 30% da hemicelulose foi termodecomposta;

4º) em torrefação à 275°C e tempos de reação de aproximadamente 70 minutos:

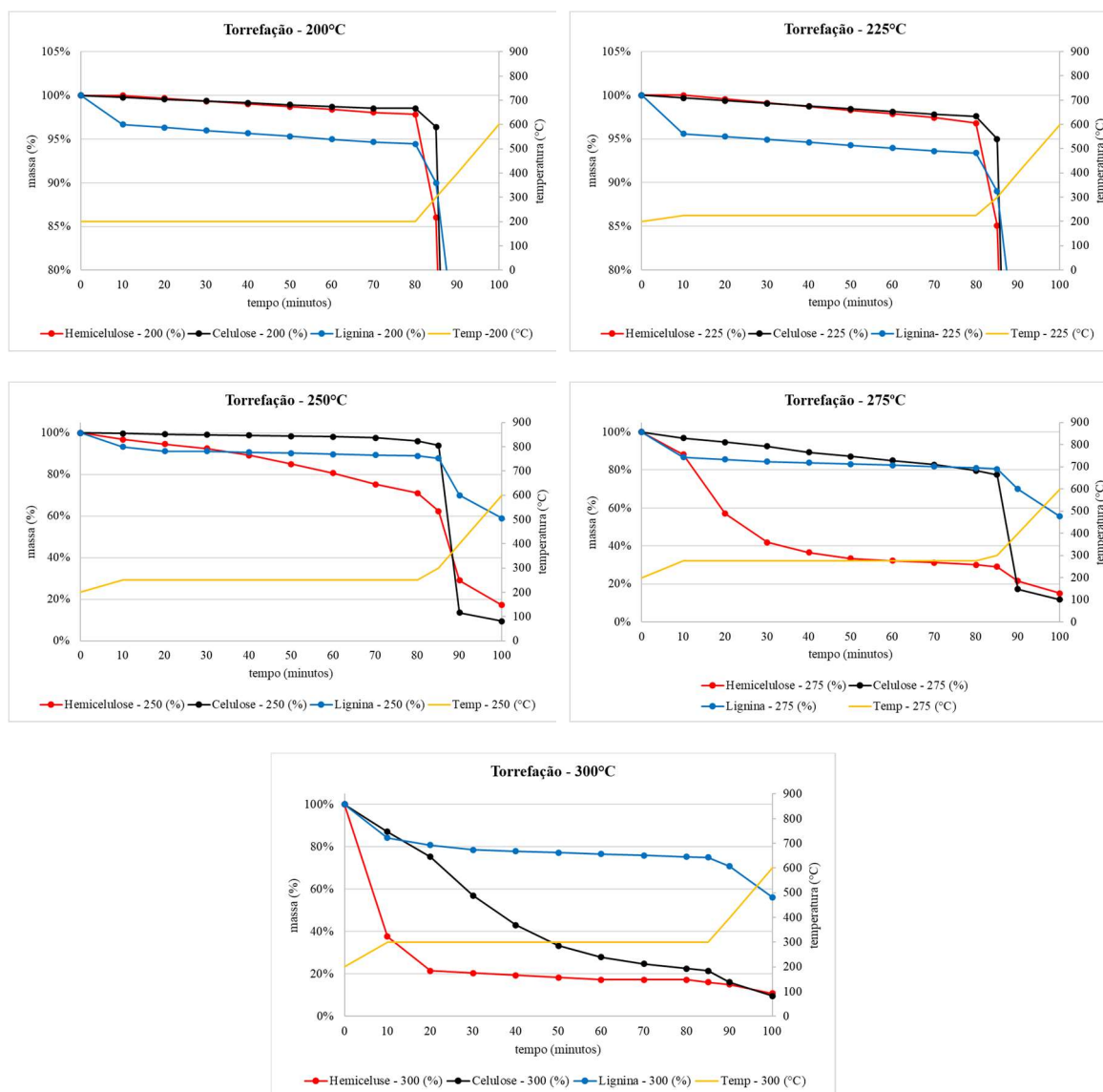
- lignina: apresenta uma decomposição mais rápida, acentuada e em maior quantidade, aproximadamente 20% se decompõem no final do processo;
- celulose: decomposição apresenta mudança de comportamento para pouco acentuada, apresentando decomposição um pouco superior a 20% no final do processo;
- hemicelulose: apresenta mudança brusca de comportamento térmico, há uma decomposição rápida inicialmente (principalmente nos 20 primeiros minutos),

ao final do processo aproximadamente 70% da hemicelulose foi termodecomposta;

5º) em torrefação à 300°C e tempos de reação de aproximadamente 70 minutos:

- lignina: apresenta uma decomposição mais rápida, acentuada e em maior quantidade, aproximadamente 22% se decompõem no final do processo, no entanto muito semelhante ao processo (4º);
- celulose: decomposição apresenta mudança de comportamento para muito acentuada, apresentando decomposição rápida nos primeiros 30-40 minutos (>60%), no final do processo quase 80% da celulose foi decomposta;
- hemicelulose: apresenta drástico decaimento já nos primeiros minutos, ao final do processo aproximadamente 85% da hemicelulose foi termodecomposta;

Figura 22 - Estudo da Torrefação dos Polímeros Naturais Individualizados



Fonte: Adaptado de Chen e Kuo, (2011a) – dados em base seca

3.1.4 Equações de Rendimento

Existem algumas variações de rendimento quando falamos em torrefação de biomassas, uma vez que as biomassas se apresentam com um teor de umidade e possuem uma certa quantidade de cinzas. Por isso, existem algumas equações que ditam os rendimentos. Basu (2013) descreve, então, a metodologia de cálculos que segue.

Primeiramente existe o rendimento livre de cinzas e umidade (MY_{daf}), ou seja, somente é contabilizado o material orgânico da biomassa (isento de cinzas e água).

$$MY_{daf} = \frac{\text{Massa de Biomassa torref (base daf)}}{\text{Massa de Biomassa orig (base daf)}} = \frac{MY_{db} - ash_{db}}{1 - ash_{db}} \quad \text{Eq(1)}$$

$$ash_{db} = \frac{ash}{1 - M} \quad \text{Eq(2)}$$

Onde:

MY_{daf} = rendimento mássico sem contabilizar umidade e cinzas;

daf (*dry ash free*) = base de cálculo com massa de biomassa isenta de cinzas e umidade (somente material orgânico);

MY_{db} = rendimento mássico sem contabilizar a umidade;

ash_{db} = relação das cinzas com a biomassa isenta das umidades;

ash = fração de cinzas;

M = fração de umidade.

O rendimento no processo de torrefação em base seca é importantíssimo e o mais utilizado, uma vez que dá o entendimento de quanto da biomassa inicial se converte em biomassa torrefada, quando contabilizados somente os produtos sólidos (conjuntamente com cinzas). O restante, como já descrito, converte-se em voláteis condensáveis e não-condensáveis. Segue equação desse rendimento MY_{db}

$$MY_{db} = \frac{\text{Massa de Biomassa torref (base seca)}}{\text{Massa de Biomassa orig (base seca)}} = MY_{daf}(1 - ash_{db}) + ash_{db} \quad \text{Eq(3)}$$

Onde:

MY_{db} = rendimento mássico sem contabilizar a umidade;

db (*dry base*) = base de cálculo com massa de biomassa isenta umidade (com cinzas);

MY_{daf} = rendimento mássico sem contabilizar umidade e cinzas;

ash_{db} = relação das cinzas com a biomassa isenta das umidades.

Além desses rendimentos, há também o rendimento integral, ou seja, aquele que não é retirado dos cálculos qualquer material. A biomassa é contabilizada com as cinzas e com a umidade

$$MY_{ar} = \frac{\text{Massa de Biomassa torref (umida e cinzas)}}{\text{Massa de Biomassa orig (umida e cinzas)}} = (1 - M) MY_{db} \quad \text{Eq(4)}$$

Onde:

MY_{ar} = rendimento mássico integral;

ar (*as-received*) = base de cálculo com massa integral (com umidade e cinzas);

M = fração de umidade;

MY_{db} = rendimento mássico sem contabilizar a umidade.

A torrefação se apresenta com algumas vantagens energéticas para inúmeras aplicações no nosso cotidiano, como o uso de fonte de calor. Esse processo de termoprocessamento, no entanto, custa uma certa parcela de energia da biomassa original. Por isso seguem equações de rendimento energético:

$$\text{Produção de Energia (EY)} = \frac{\text{Energia na biomassa torrefada (MJ/kg)}}{\text{Energia na biomassa original (MJ/kg)}}$$

Eq(5)

Onde:

EY = fração de rendimento energético (normalmente em base seca).

Porém é mais conveniente que seja descrito na forma mássica (quilogramas) e seus respectivos poderes caloríficos em (MJ/kg).

Produção de Energia (EY)

$$= \frac{\text{massa torrefada (kg)} \cdot \text{poder calorífico torrefada (MJ/kg)}}{\text{massa biomassa original (kg)} \cdot \text{poder calorífico biomassa original (MJ/kg)}}$$

Eq(6)

Outra maneira de avaliar o desempenho do processo é tomar como base certa quantidade de biomassa, neste caso a avaliação é por 100 kilogramas da biomassa original. Essa equação possibilita calcular quanto da biomassa original (base seca) é convertida em biomassa torrefada e quanto ainda há de remanescente energético no produto sólido.

$$MJ_{total} = HHV_{biomassa\ torrefada} (MJ/kg) \cdot MY \cdot \text{massa biomassa inicial} (100kg)$$

Eq(7)

Onde:

MJ_{total} = energia remanescente na biomassa torrefada por 100 kg de biomassa original em base seca;

MY = rendimento mássico;

HHV = poder calorífico superior (MJ/kg);

Base de cálculo massa de biomassa inicial = 100 kg.

3.2 Reator Auger – Considerações Relevantes

3.2.1 Considerações da Roscas para Torrefação

Em processos de torrefação, os atributos de partícula e o comportamento da massa transportada mudam ao longo de um processo de transporte por roscas, uma vez que há transformação do material ao longo do processo, diante das temperaturas utilizadas (200 - 300°C). Além do mais, a maioria das roscas transportadoras não são dimensionadas para grandes variações/gradientes de temperatura, o que pode ser um desafio.

Dentre os problemas encontrados em alimentações por roscas transportadores de biomassa para torrefação destacam-se: tamanho médio de partícula, tamanho máximo de partícula, fator de forma, densidade aparente, compressibilidade, abrasão, fluidez e teor de umidade. A biomassa possui comportamento isolante, por isso o aquecimento da biomassa

com as superfícies (metálicas) é muito mais eficiente que com a própria biomassa (Figura 17) (DUNNING, 2019).

3.2.2 Considerações Sobre a Rosca Transportadora

Para o dimensionamento de roscas transportadoras deve-se considerar as funções principais que ela desempenha no processo de torrefação, bem como seus parâmetros físicos essenciais. Para isso, seguem as principais considerações sobre as funções das roscas transportadoras no processo de dimensionamento de reatores, bem como faixas e medidas físicas preponderantes em projetos (cabe ressaltar que esta lista representa parâmetros norteadores, ou seja, que servem como referência):

1^a) provoca mistura e agitação da biomassa no reator (DHYANI; BHASKAR, 2018);

2^a) define o tempo residência da biomassa (DHYANI; BHASKAR, 2018);

3^a) dá o transporte contínuo do volume (BROWN, 2009);

4^a) melhora a troca térmica entre biomassas e parede do reator (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016); isso se deve ao movimento centrífugo das partículas, colisão, parede aquecida do reator (ARAMIDEH et al., 2015);

5^a) possibilita a redução de obstruções e de formação de arcos (biomassas de elevada umidade) (DAI; GRACE, 2008; DAI; CUI; GRACE, 2012);

6^a) alimentação excessiva de biomassa pode causar bloqueios (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016; RONSSE, 2013);

7^a) o volume transportado depende da rotação, diâmetro interno, grau de preenchimento, passo da rosca e da eficiência volumétrica do transporte da rosca (KOCHER; JONES, 1995; ROBERTS, 1999);

8^a) baixa relação P/D (razão do passo com o diâmetro *auger*) leva a uma taxa de fluxo uniforme (aumento a taxa de transferência de calor);

9^a) maior relação P/D leva a uma melhor mistura e distribuição de calor;

10^a) o grau de preenchimento também influencia na mistura e no tempo de residência da biomassa: baixos graus de preenchimento causam uma boa mistura e mantem um fluxo reduzido; e elevado grau de preenchimento da rosca por biomassa leva uma baixa mistura e maior taxa de fluxo;

11^a) um elevado grau de preenchimento reduz a distribuição radial de calor, devido à baixa condutividade térmica da biomassa;

12^a) preenchimentos próximos a 50% demonstram-se ideais, uma vez que provocam boa mistura (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019; FUNKE et al., 2018; ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016; VERCLYTE; PIETERS; RONSSE, 2013);

13^a) em roscas transportadoras com diâmetros *auger* maiores, aparentemente, transportam melhor frente a menores;

14^a) pequenos passos tendem a transportar menor quantidade de material e grandes passos tende a revolucionar o material em vez de transportá-lo;

15^a) não é recomendado passos menores que a metade do diâmetro *auger* ($P < D/2$), sendo que $P = D/4$ deve ser sempre evitado; bem com também deve ser evitado que o passo seja superiores a 50% do diâmetro *auger* ($P = 1,5D_{auger}$) (DAI; CUI; GRACE, 2012); razão passo/diâmetro (P/D) normalmente está dentro de 0,25 a 1,00 (DUNNING, 2019);.

16^a) para práticas habituais na indústria é recomendado o passo igual ao diâmetro ($D = P$) (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019; BORTOLAMASI; FOTTNER, 2001; VERCLYTE; PIETERS; RONSSE, 2013);

17^a) materiais abrasivos desgastam as hélices (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

18^a) hélice regular (helicóide contínua, isenta de chicanas e vazios) acaba sendo a mais utilizada para transporte de biomassas (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

19^a) roscas maiores que 3,65 metros demandam de suportes auxiliares (CARSON; PETRO, 2005);

20^a) rotação (RPM), passo (P), diâmetro *auger* (D_{auger}) e comprimento da rosca (L) controlam o tempo de residência da biomassa em ambiente reacional (BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2017);

21^a) o fluxo da biomassa deve ser contínuo e uniforme (DAI; CUI; GRACE, 2012)

22^a) é recomendado que a folga entre a hélice da rosca e o invólucro (parede do reator) seja de pelo menos 2 vezes superior a maior dimensão da biomassa (DAI; CUI; GRACE, 2012); biomassa deve possuir 1/10 da altura da hélice (DUNNING, 2019);

23^a) a folga entre a rosca e invólucro (parede do reator) padrão para a maioria dos materiais é de 12,7 mm (meia polegada), mas 1-25 mm é uma faixa aceitável; folgas muito grandes tendem a comprometer a eficiência de transporte, enquanto muito pequenas levam a obstruções e desgaste (DAI; CUI; GRACE, 2012);

24^a) o maior tamanho de partícula de biomassa não deve exceder 2/3 do passo mínimo da rosca (DAI; CUI; GRACE, 2012);

25^a) a temperatura máxima é geralmente de cerca de 550°C (CARSON; PETRO, 2005). O aço inoxidável (por exemplo, SS 310 ou 316) é comumente preferido para operações com biomassa (DAI; CUI; GRACE, 2012);

26^a) rotações baixas (1-40 rpm) são preferíveis (CARSON; PETRO, 2005); para torrefação as rotações recomendadas são inferiores a 80 RPM (DUNNING, 2019);

3.2.3 Considerações para Dimensionamento de um Reator Auger

Para o dimensionamento de um reator de torrefação (ou pirólise) tipo *auger*, deve-se levar uma série de considerações referente a tipologia da biomassa a ser transportada pela rosca, bem como suas respectivas dimensões que influenciarão na condução do processo. Por isso, segue um série de consideração de devem ser avaliadas para o dimensionamento de um reator tipo auger para torrefação de biomassas:

1^a) possibilitam vários tipos de termoprocessamento: torrefação, pirólise lenta, intermediária e rápida. A torrefação lança mão de temperaturas mais brandas (200 - 300°C), enquanto a pirólise exige temperaturas mais elevadas (em torno de 500°C) (HORNUNG, 2013; BRIDGWATER, 2012; WIGLEY, 2015; TUMULURU et al., 2021; VAN DER STELT et al., 2011);

2^a) para o fornecimento de energia do termoprocessamento desejado, as paredes do reator são aquecidas à temperaturas um pouco superiores as desejadas (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

3^a) a biomassa é aquecida até a temperatura de torrefação e mantida em ambiente reacional por um determinado tempo (de minutos a horas) (ARAMIDEH et al., 2015);

4^a) a capacidade volumétrica é proporcional à velocidade de rotação da rosca (DAI; CUI; GRACE, 2012);

5^a) para torrefação o reator pode ser simples, uma vez que partículas de diferentes tamanhos podem ser introduzidas, assim como os tempos de residência dos voláteis em ambiente reacional não é crucial (WIGLEY, 2015; TUMULURU et al., 2021; VAN DER STELT et al., 2011);

6^a) a rosca transportadora deve conduzir a biomassa da entrada até a saída do reator (ARAMIDEH et al., 2015);

7^a) os voláteis produzidos devem ser conduzidos para um sistema condutor de gases onde podem ser resfriados para geração de produtos líquidos, bem como queimados para o aquecimento do próprio processo (ARAMIDEH et al., 2015; CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

8^a) ciclones para separação de gases e sólidos também é habitual, já que estes podem contaminar o produto líquido (ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016) (RONSSE, 2013);

9^a) o aquecimento em reatores *auger* é normalmente realizado indiretamente (combustão ou resistências elétricas), enquanto a transferência de calor é dependente da mistura interna do reator (paredes-biomassa), proporcionado pela rosca transportadora, o que normalmente dificulta a escalabilidade (BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2017; BROWN, 2009; CHEN et al., 2021);

10^a) flexibilidade, fibras, coesão, fluidez, adesividade, abrasividade, irregularidades das biomassas devem ser levadas em consideração (DAI; CUI; GRACE, 2012);

11^a) compressibilidade e razão de compactação (sólidos compressíveis tendem a resistir ao movimento, já sólidos mais rígidos tendem a fluir) (DAI; CUI; GRACE, 2012).

12^a) teor de umidade (teor de umidade elevado aumenta a coesão entre o material, logo há maior tendência de formação de bloqueios e arcos) (DAI; CUI; GRACE, 2012).

13^a) O movimento da rosca transportadora provoca um efeito centrífugo das partículas da biomassa, que frequentemente colidem com a parede aquecida do reator, melhorando a troca térmica e aquecimento da biomassa (ARAMIDEH et al., 2015).

14^a) o grau de preenchimento do reator, temperatura (T), frequência de rotação (RPM), comprimento (L) e tempo de residência da biomassa em ambiente reacional (τ) são fatores determinantes nos objetivos buscados no procedimento da torrefação (BROWN, 2009; CHEN et al., 2021).

15^a) a eficiência do processo de transporte diminui se a folga entre a rosca e o involucro for excessivamente grande (DAI; CUI; GRACE, 2012).

16^a) carreadores de calor (areia, esferas de aço ou de cerâmica) podem ser utilizados, sendo a metodologia mais comumente utilizada para pirólise rápida; no entanto, reduzem a capacidade de processamento, uma vez que ocupam espaço (GARCIA-NUNEZ et al., 2017; BROWN, 2009; FUNKE et al., 2017; QI; WRIGHT, 2020);

17^a) o tempo de residência da biomassa no reator *auger* é controlado pela velocidade de rotação da rosca (RPM), seu comprimento (L) e seu passo (P) (BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2017);

18^a) possibilidade de alimentação de biomassas heterogêneas, com granulometria variável ou de difícil manuseio (BRIDGWATER, 2012, 2018);

19^a) compacto, o qual muitas vezes são produzidos com a possibilidade de transportá-lo a outras localidades (portáteis), onde a biomassa é abundante, principalmente quando utilizado para pirólise (JALALIFAR et al., 2020);

20^a) pouco ou nenhum gás de arraste (inerte como nitrogênio N₂) são demandados, o que reduz o custo operacional (ULLAL, 2017; BROWN, 2009); quando utilizado, o fluxo do gás de arraste é utilizado para retirada de voláteis (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

21^a) quanto maior o tempo de residência dos voláteis em ambiente reacional, maior é a tendência de reações secundárias acontecerem (redução de produção de bio-óleo e aumento de biochar), por isso o objetivo do termoprocessamento deve ser levado em consideração (BRASSARD, 2017);

22^a) graus de preenchimento entre 15% e 45% (do volume transportado) são utilizados para proteger o sistema de altas tensões por torção, bem como desgastes; cargas elevadas aumentam o consumo de energia (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

23^a) materiais coesivos causam problemas, uma vez que apresentam menor fluidez e tendência emperrar/obstruir o sistema (DAI; GRACE, 2011); materiais pegajosos e fibrosos tendem a não fluir e emperrar; e materiais abrasivos colocam o material de fabricação sujeitos a desgaste, tanto das hélices com o invólucro (paredes do reator)(CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019); as hélices da rosca cisalham o material compactado (DAI; CUI; GRACE, 2012); para biomassa com essas características desfavoráveis o uso de roscas duplas é indicadas (giro em sentidos opostos) (DAI; CUI; GRACE, 2012);

24^a) materiais heterogêneo (diferentes formas, densidade e tamanhos) favorecem a segregação, comportamento oposto à mistura; esse processo deve ser evitado ao máximo, frente a má qualidade dos produtos do termoprocessamento (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019)

25^a) na etapa de projeto deve ser previsto a dilatação do material devido ao aquecimento (rosca e invólucro/paredes).

26^a) isolamento externo e instrumentação de controle são essenciais para o sucesso do processo;

27^a) o atrito e o desgaste mecânico geram finos de biomassa, os quais também geram bloqueios;

28^a) em casos imprevistos, a inversão do sentido de giro da rosca transportadora pode resolver bloqueios (DAI; CUI; GRACE, 2012).;

3.2.4 Comparativo Simples (*single*) ou Duplo (*twin*).

Algumas vantagens em termos de termoprocessamento são encontradas quando é proposto um reator duplo, ao invés do simples. Trata-se de duas roscas girando paralelamente em um mesmo reator. Por isso, seguem considerações relevantes dos reatores dupla rosca para um projeto:

1^a) o volume do reator duplo (*twin*) aumenta a capacidade de processamento em aproximadamente 50% para um mesmo diâmetro *auger* (BROWN, 2009). Esse ganho é em um único reator, essas duas roscas poderiam ser independentes e o ganho de capacidade de seria de 100%, no entanto, se tornariam 2 reatores, com 2 motores, 2 aquecimentos.

2^a) a utilização de roscas duplas melhora a agitação e mistura; bem como melhora transferência térmica entre as paredes do reator e a biomassa, diante do movimento interno da biomassa;

3^a) reduz custos operacionais e proporcionam menos obstruções e acúmulos ao longo de um processo termoquímico (FAKULT; ERLANGUNG, [s. d.]; BROWN, 2009; BRASSARD, 2017; ROEGIERS; PIETERS; RONSSE, 2016).

4^a) o giro das duas rosca transportadoras, concomitantemente operadas, proporciona uma melhor ondulação/agitação na biomassa, quando comparados a de rosca simples (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

5^a) o movimento da dupla hélice transporta biomassa de uma rosca para a outra (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

6^a) o movimento entrelaçado das duas roscas retira material que poderia estagnar ao longo do percurso, comprometendo o bom funcionamento do reator (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

7^a) possibilita um termoprocessamento mais completo do material, diante da melhoria de troca térmica (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019);

8^a) carregadores de calor também podem ser utilizados nessa configuração (areia, esferas de metal e cerâmica) para facilitar o fornecimento de energia de modo direto à biomassa (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

9^a) 3 diferentes tipos de configuração de rotação: com rotação no mesmo sentido, ambos rotacionado no sentido para fora do reator e ambos rotacionado para dentro do reator. Este último é que apresenta os melhores resultados de mistura, agitação e homogeneidade nos produtos (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019).

10^a) para biomassas muito coesivas o uso de roscas duplas é indicadas, uma vez que essa configuração pode evitar trancamentos, além de auxiliar na limpeza entre ambas roscas (DAI; CUI; GRACE, 2012).

3.3 Equações para Dimensionamento de Reatores Tipo Auger

Nesta seção será proposto uma metodologia para dimensionamento de uma rosca transportadora, a qual contabiliza uma ampla gama de informações e instrumentos disponibilizados por fabricantes de roscas transportadoras. Além disso, será apresentado as equações propostas para o dimensionamento, bem como o procedimento de cálculo.

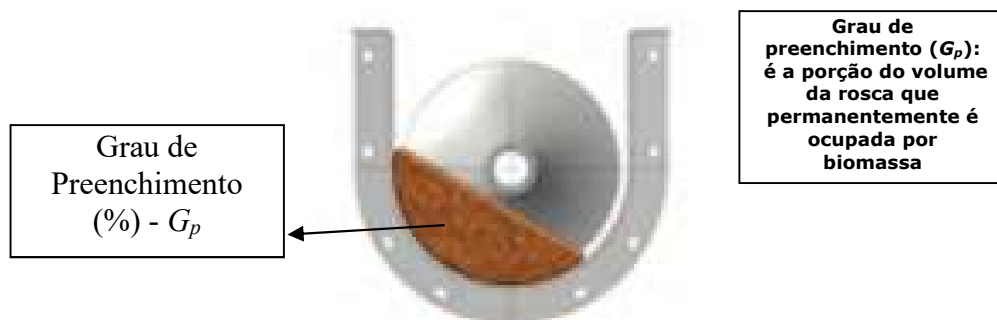
3.3.1 Parâmetros Essenciais para Transporte de Biomassas

A capacidade de transporte de biomassa por roscas é imprescindível no cálculo de dimensionamento de reatores, já que pré-determinam a carga. Por isso, a identificação das principais variáveis de projeto é imprescindível. Conforme Figura 23 e Figura 24.

Diversos fornecedores de roscas transportadoras dispõem de métodos semelhantes entre si para a dimensionamento de cargas, onde correlaciona o material sólido a ser transportado com o tipo da rosca ideal. Essas variáveis são: dimensões espaciais do material a ser transportado, densidade volumétrica, abrasividade, fluidez, corrosividade, biodegradabilidade, roscas resistentes a variações de temperaturas (frio e quente), materiais resistente a abrasão, demanda de mistura de materiais, materiais higroscópicos, inflamáveis, explosivos, materiais tóxicos, materiais viscosos e adesivos, presença de óleos, grau de preenchimento da rosca recomendado (ANSI/CEMA, 2019; KWS, 2015).

Ou seja, a partir dessas variáveis de características do material a ser transportado, pode-se tomar a decisão da rosca ideal. A classificação é dada na forma de tabelas dispostas pelo fornecedor, para que, com elas, possa-se eleger a rosca mais adequada. Os materiais sólidos que são comumente encontrados nessas tabelas são: sais minerais, grãos, sementes, cereais, polímeros, pellets, areias, biomassas, fármacos, minérios, aglomerados (ANSI/CEMA, 2019; KWS, 2015).

Figura 23 - Grau de Preenchimento



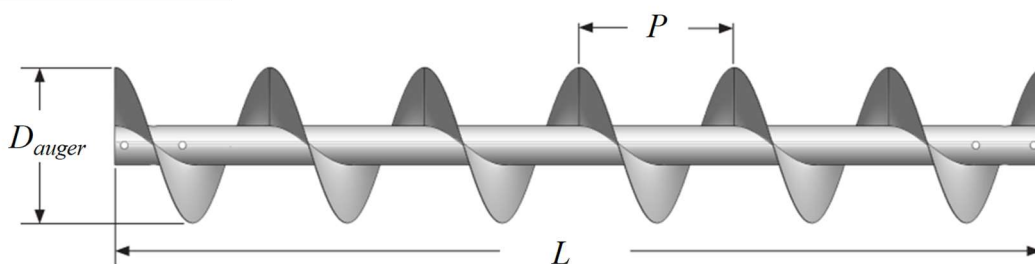
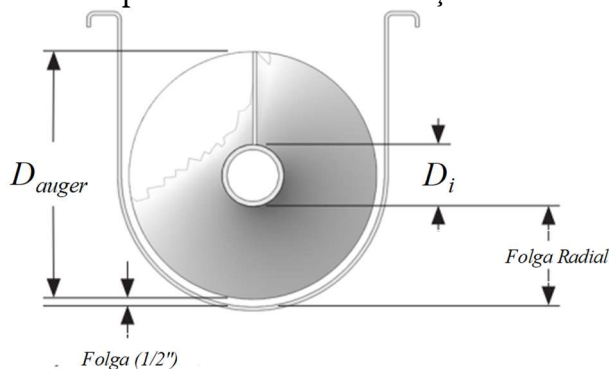
Fonte: adaptado de ANSI/CEMA (2019)

Segundo o fornecedor KWS (2015), as eficiências de transporte de materiais por roscas transportadoras horizontais são extremamente elevadas, próximas a 100%; de 0 a 10° de inclinação a perda de eficiência é mínima e ela pode ser compensada pelo aumento da rotação da rosca, redução do passo, aumento do diâmetro. Mas para que se atinja a eficiência desejada, deve-se primeiramente avaliar as características do material a ser transportado.

Figura 24 - Variáveis de Roscas Transportadoras e suas Definições

Metrologia

Variáveis de Projeto:
D_{auger} = Diâmetro Auger
D_i = Diâmetro Interno
P = Passo da Rosca
L = Comprimento da Rosca



Fonte: Adaptado de Conveyor Eng. & Mfg. Co (2012)]

Normalmente, as roscas transportadoras devem ser dimensionadas para 45%, 30% e 15% de grau de preenchimento (G_p) dependendo das características do material. De modo geral, o grau de preenchimento de 45% (grãos, particulados finos, alfafa, bicarbonato de sódio e arroz descascado) é usado para materiais leves (densidade volumétrica entre 80-640kg/m³), de fluxo livre e não abrasivos. Graus de preenchimento de 30%A, são normalmente usadas para materiais de baixa abrasão e de livre fluidez (densidade volumétrica entre 240-960 kg/m³) - negro de fumo, farinhas e resíduos de cerveja; graus de preenchimento de 30%B, normalmente usadas para materiais a granel mais densos (densidade volumétrica entre 480-1280 kg/m³), média fluidez e muito abrasivos (bauxita, clínquer de cimento ou cinzas de combustão); a diferença entre 'A' e 'B' está no método construtivo da rosca. Já os materiais que possuem elevada densidade (800 a 1900 kg/m³), elevadíssima abrasão e baixa fluidez (cacos de vidro e alumina) somente podem ser carregados com 15% da carga máxima volumétrica da rosca.

Há também uma classificação dos tamanhos característicos do material, conforme a maior dimensão e homogeneidade do material a ser transportado em classes (1, 2 e 3), bem como a espessura e material da helicóide para aumento da resistência da rosca, e do tipo de material da calha e demais componentes frente a abrasividade e densidade do material transportado em séries (A, B, C e D) (SCHEIBEL, 2018; KWS, 2015; ANSI/CEMA, 2019). Adição de revestimento também é uma realidade para preservar o material (SANTOS et al., 2018; BARRIOS, 2021). Para este trabalho, essas variáveis não foram contabilizadas.

Os materiais então são classificados em códigos conforme características (tamanho, fluidez, abrasividade e propriedades) e logo em seguida a indicação do melhor tipo de rosca transportadora, bem como o grau de preenchimento. Em todos os catálogos há um banco de dados de vários materiais (biomassas, inclusivamente) com respectivos códigos e indicação de materiais adequados para fabricação e manufatura da rosca.

3.3.2 Equações para Dimensionamento - Reator Simples e Duplo

Para um adequado dimensionamento, são consideradas as variáveis demonstrado na Figura 23 e Figura 24, parâmetros essenciais de uma rosca transportadora, como D_{auger} (diâmetro auger) D_i (diâmetro interno), P (passo), Comprimento (L) e Grau de Preenchimento (G_p).

A equação da Capacidade Volumétrica (C_v) de transporte por uma rosca em centímetro cúbico por minuto (cm^3/min) fornecida pela ANSI/CEMA (2019) segue:

$$C_v = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{auger}^2 - D_i^2) \cdot P \cdot G_p \cdot \omega \quad \text{Eq(8)}$$

Onde:

C_v = capacidade volumétrica rosca simples (cm^3/min);

ω = rotações por minuto da rosca (RPM – rot/min);

D_{auger} = diâmetro do parafuso ou auger, (cm);

D_i = diâmetro interno (cm);

P = passo da rosca (cm);

G_p = grau de preenchimento ou porcentagem de carregamento de calha (%).

No caso de um reator de rosca dupla (*twin*), além da melhor agitação e mistura da biomassa no ambiente reacional, também é incrementado a troca térmica entre paredes do reator e o material transportado. Ademais, a Capacidade Volumétrica *Twin* ($C_{v,twin}$) aumenta 50% da Capacidade Volumétrica de um reator simples (C_v) (BROWN, 2009). A Equação 13 demonstra o cálculo da Capacidade Volumétrica *Twin* ($C_{v,twin}$).

$$C_{v,twin} = C_v \cdot 1,5 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{auger}^2 - D_i^2) \cdot P \cdot G_p \cdot \omega \cdot 1,5 \quad \text{Eq(9)}$$

Onde:

$C_{v,twin}$ = capacidade volumétrica rosca dupla, (cm³/min);

C_v = capacidade volumétrica, (cm³/min);

ω = rotações por minuto da rosca (RPM – rot/min);

D_{auger} = diâmetro do parafuso ou auger (cm);

D_i = diâmetro interno (cm);

P = passo da rosca (cm);

G_p = grau de preenchimento ou porcentagem de carregamento de calha (%), Figura

23.

Para o cálculo da Carga Transportada (C_t) - (massa/tempo), basta multiplicar a Densidade Volumétrica da Biomassa (ρ) (massa/volume) pela Capacidade Volumétrica (C_v) (BROWN, 2009).

$$C_t = C_v \cdot \rho \quad \text{Eq(10)}$$

Onde:

C_t = carga transportada (g/min);

C_v = capacidade volumétrica, (cm³/min);

ρ = densidade volumétrica da biomassa (g/cm³)

Além disso, pode-se calcular a Velocidade da Biomassa no Reator (Vel) sendo transportada pela rosca transportadora, basta multiplicar o Passo (P) pelo RPM (ω) de operação (BROWN, 2009).

$$Vel = P \cdot \omega \quad \text{Eq(11)}$$

Onde:

Vel = velocidade da biomassa no reator (cm/min)

ω = rotações por minuto da rosca (RPM – rot/min)

P = passo da rosca (cm).

O medida do comprimento do reator de torrefação é essencial, pois ele deve variar conforme o RPM (ω) de processo, além do tempo de torrefação (τ) eleito. No caso deste projeto, foi determinado que o tempo de torrefação (τ) é de 30 minutos, logo o comprimento do reator obedece a Equação 16:

$$L = Vel \cdot \tau = P \cdot \omega \cdot 30 \quad \text{Eq(12)}$$

Onde:

L = comprimento do reator/rosca (cm);

Vel = velocidade da biomassa no reator (cm/min);

τ = tempo de torrefação (min);

ω = rotações por minuto da rosca (RPM – rot/min);

P = passo da rosca (cm).

Para este trabalho de dimensionamento, a eleição do tempo de torrefação (τ) de 30 minutos foi pré-determinado pelo fato de que a bibliográfica, normalmente, elege este tempo de processamento por torrefação. No entanto, é de suma importância que se realize contínuos estudos para que o tempo ideal de processamento seja determinado, além disso, esse tempo pode variar conforme a tipologia de biomassa utilizada.

Capítulo 4 – Resultados

Neste capítulo, será apresentado de forma sistemática os rendimentos de torrefação em massa e em energia de diversas biomassas obtidas a partir de uma rigorosa consulta bibliográfica (ANEXO I); isso possibilitará um mapeamento sistêmico de diversas biomassas com suas respectivas características quando submetidas à torrefação.

É importante destacar que quando pensamos em aproveitamento energético dos produtos sólidos das biomassas, logo pensamos em elevados rendimentos. Cabe ressaltar que há grandes diferenças entre biomassas do tipo lenhosas (decíduas/coníferas-*wood*) e não-lenhosas (agrícolas/ energéticas/ herbáceas – *non-wood*) uma vez que apresentam variações de constituição de polímeros (celulose, hemicelulose e lignina), bem como de cinzas e extrativos. Por isso, o entendimento da variação de rendimento entre esses tipos de biomassas é imprescindível para a escolha ideal de um projeto de torrefação em grandes escalas, uma vez que podem viabilizar ou não um determinado projeto.

Além dos rendimentos de diversas biomassas tratadas por torrefação, serão apresentados os resultados de cálculo de dimensionamento de uma rosca transportadora de cavacos de madeira para torrefação em diversas escalas (laboratorial, piloto, demonstrativa e comercial). Ou seja, serão apresentados cálculos e gráficos demonstrativos do comprimento do reator (L) demandado para torrefação dessa biomassa por 30 minutos (τ), além da seleção do diâmetro *auger* (D_{auger}) e da rotação de processo (RPM). Concomitantemente, será apresentada uma avaliação comparativa (entre diâmetros *auger* e seu comprimento de rosca demandado) de um reator do tipo simples (*single*) ou duplo (*twin*) para torrefação em 30 minutos.

4.1 Torrefação

Para uma análise sobre os rendimentos e comportamento das biomassas em processo de torrefação, foram consultadas mais de 50 bibliografias, de várias partes do mundo, onde o tema é pesquisado. Dentre essas referências, há diversas biomassas utilizadas no processo, entre lenhosas e não-lenhosa. Essas biomassas e suas respectivas bibliografias são apresentadas no **ANEXO I**, divididas pelas unidades, com respectivos dados disponibilizadas em artigos publicados em revista ou dissertações e teses. Os dados disponibilizados normalmente são os seguintes, variando conforme a bibliografia: rendimentos mássicos e energéticos conforme tempo e temperatura de processo; teor elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio das biomassas originais e torrefadas; teor de umidade, material volátil, cinzas; razão de O/C e H/C. Esses dados foram coletados e analisados de tal forma que possibilitam as formulações gráficas que serão apresentadas nessas seções.

4.1.1 Avaliação da Torrefação dos Polímeros Individualizados

Como apresentado na Capítulo 3, na seção 3.2, Chen e Kuo (2011a) buscaram entender o comportamento de decomposição por torrefação dos polímeros naturais das biomassas separadamente (celulose, hemicelulose e lignina). A partir do comportamento térmico, representados na Figura 22, pode-se chegar a algumas observações (esquematisado na Tabela 9):

1º) a lignina é o polímero que se mantém mais intacto em temperaturas mais elevadas, sendo que em temperaturas inferiores a 250°C a decomposição é inferior a 10% e em temperaturas superiores a 275°C a decomposição é pouco superior a 20%;

2º) a celulose é o polímero que aparentemente apresenta maior estabilidade térmica até 250°C; em temperatura de 275°C e longos períodos de exposição (>60 minutos) em ambiente reacional sua decomposição supera 20%, em temperatura de 300°C a decomposição é brusca em períodos menores (30-40 minutos apresenta decomposição >60%);

3º) a hemicelulose, por sua vez, apresenta grande decomposição térmica já em temperatura de 250°C e grandes períodos de exposição, em temperaturas de 275°C e superiores a decomposição é mais rápida e mais drástica em curtos períodos de torrefação.

Ao observar esses comportamentos, é perceptível que entre 250°C e 300°C há uma mudança de comportamento térmico principalmente da celulose e da hemicelulose. Em 250°C e longos períodos de exposição (70 minutos) a hemicelulose se degrada

aproximadamente 30%; já em 275°C e curtos períodos (20 minutos) de exposição a hemicelulose se decompõem aproximadamente 60%. Por outro lado, em 250°C e longos períodos de exposição (70 minutos) a celulose se mantém quase intacta; em 275°C e longos períodos de exposição (70 minutos) a celulose se decompõem em parte, um pouco superior a 20%. De outra forma, em temperaturas de 300°C a hemicelulose é decomposta rapidamente e a celulose em 30-40 minutos é decomposta mais que 60%. Essas observações estão esquematizadas na Tabela 9.

Pode-se observar também que a decomposição da lignina não depende expressivamente do tempo de exposição, mas aparentemente é mais dependente da temperatura do processo de torrefação, pois ela apresenta decomposição já nos primeiros momentos da torrefação e mantém-se praticamente constante ao longo do restante do processo (Figura 22).

Tabela 9 - Comportamento de Decomposição dos polímeros individualizados

Decomposição		250°C	275°C	300°C
Lignina	Tempo Total (rápida no início e constante depois)	<10%	~20%	~22%
	<hr/>			
Celulose	Tempos Curtos (30-40 minutos)	~0	~10%	~60%
	Tempos Longos (70 minutos)	~0	~20%	~80%
<hr/>				
Hemicelulose	Tempos Curtos (30-40 minutos)	<20%	~60%	~80%
	Tempos Longos (70 minutos)	~30%	~70%	~85%

Fonte: adaptado de Chen; Kuo (2011a)

4.1.2 Avaliação da Torrefação de Diversas Biomassas

Diante do apresentado por Chen; Kuo (2011a), foi realizado uma busca bibliográfica de termoprocessamento por torrefação de diversas biomassas (Lenhosas e Não-Lenhosas – ANEXO I), com a finalidade de verificar a correspondência dos dados apresentados entre biomassa natural (polímeros unidos) e polímeros individualizados.

A divisão das biomassas foi realizada da seguinte forma

- **Lenhosas (wood):** Coníferas ou Gimnospermas (*softwood*) e Decíduos ou Folhosas ou Angiospermas (*hardwood*);

- **Não-Lenhosas (non-wood):** arbustivas, agrícolas e energéticas.

As grandes diferenças de constituição das biomassas lenhosas e não-lenhosas está na concentração variável de polímeros naturais (celulose, hemicelulose e lignina), bem como na concentração de cinzas (composto nutritivos inorgânicos). Além disso, há uma infinidade de variedades de biomassas (com diferentes formas – processadas ou naturais) disponíveis

em diversas regiões do mundo. Alguns desses aspectos são apresentadas na Figura 25 (pellets, palhas, cascas, serragem).

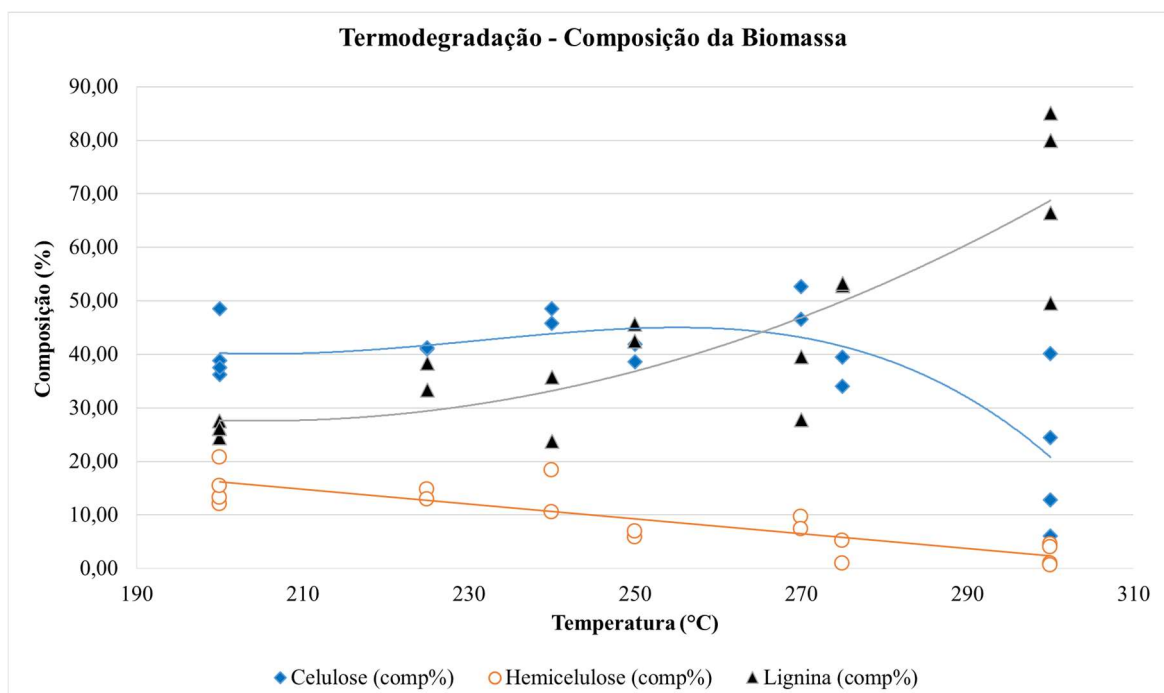
Figura 25 - Variedade de Biomassas



Fonte: Adaptado de Dunning (2019).

A variação da composição total ao longo do termoprocessamento da biomassa em diferentes temperaturas e tempos de torrefação de 30 minutos é representado na Figura 26. As biomassas neste caso foram todas lenhosas: madeira de cânfora (Celulose: 38,9%, Hemicelulose: 20,8%, Lignina: 24,4%) (Cao et al., 2015), madeira de cedro (Celulose: 36,2%, Hemicelulose: 12,1% e Lignina: 27,6%) (CAO et al., 2015), resíduos de lenha (Celulose: 37,5%, Hemicelulose: 13,3% e Lignina: 26,2%) e madeira de pinho (Celulose: 48,5%, Hemicelulose: 15,4% e Lignina: 26,2%) (PHANPHANICH; MANI, 2011)

Figura 26 - Concentração Dos Polímeros Da Biomassa Ao Longo De Uma Torrefação

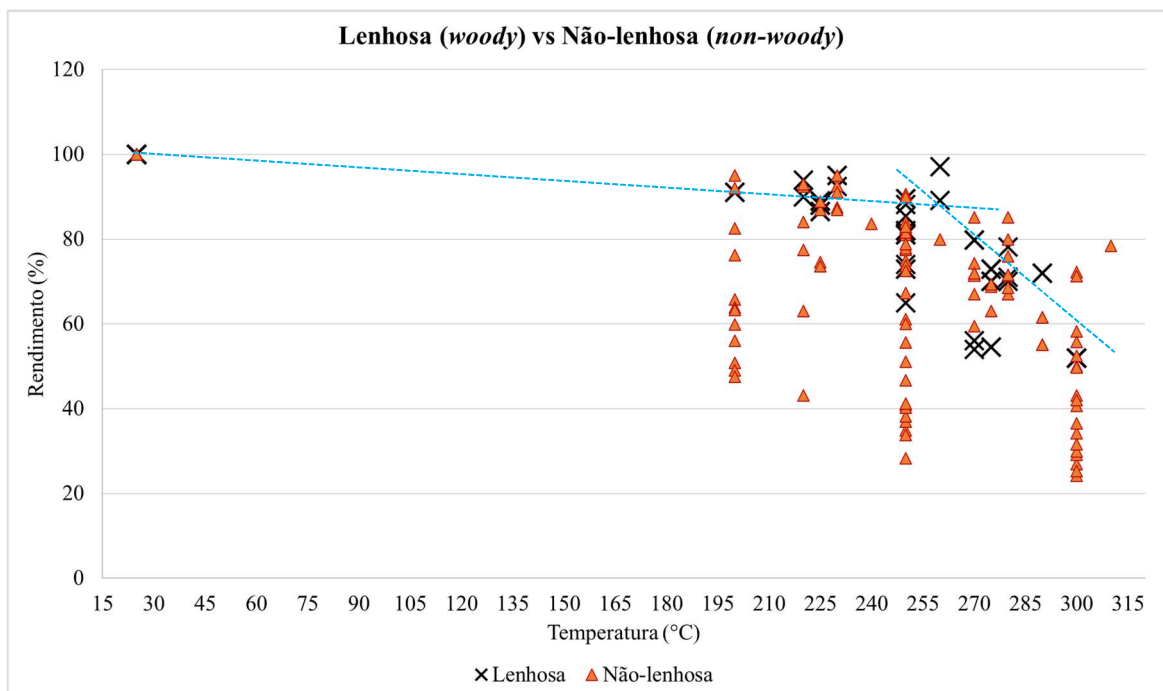


A concentração de hemicelulose diminui gradativamente conforme se aumenta a temperatura de processo; a celulose, por sua vez, aumenta sua concentração até 270°C (ponto de inflexão) e logo a partir dessa temperatura quem predomina na biomassa torrefada é a lignina. Esses fatos podem ser correlacionados aos obtidos por Chen; Kuo (2011a) onde em temperaturas mais elevadas (> 270°C) (Tabela 9) há uma gradual decomposição da celulose, principalmente numa torrefação severa (275-300°C) (CHEN; PENG; BI, 2015).

Através de buscas bibliográficas (ANEXO I) e a fim de compreender os rendimentos de diferentes biomassas, foi realizado uma avaliação de rendimentos para biomassas lenhosa (*wood*) e não-lenhosas (*non-wood*). Este estudo é imprescindível quando se busca o melhoramento das propriedades da biomassa e o quanto é produzido em massa pelo processo de torrefação para fins energéticos.

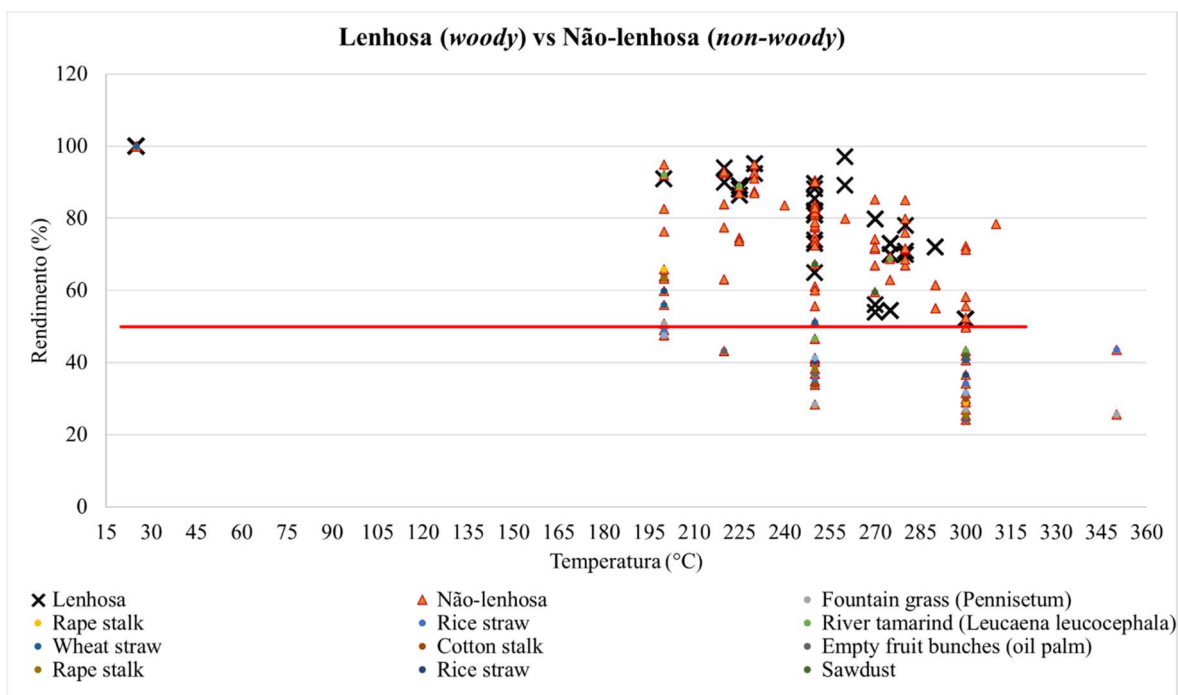
Como se verifica na Figura 27, as biomassas não lenhosas (*non-wood*) tendem a se decompor mais facilmente em temperatura menores (<270°C), diminuindo seu rendimento em produto sólido, podendo atingir rendimento inferiores a 50% em temperatura de torrefação de 250°C (Figura 28). Já as biomassas lenhosas (*wood*), tentem a manter um rendimento superior quando comparadas as não-lenhosas em temperatura até 270°C. Em temperaturas superiores a 270°C, o rendimento de biomassa torrefada decai consideravelmente em ambos os casos, fazendo com que os rendimentos de biomassas lenhosas se aproximem muito das não-lenhosas. Neste estudo, foram utilizados somente os rendimentos em base seca, ou seja, os dados coletados das bibliografias são apresentados em base isenta de umidade (Equação 3). Somente é contabilizado o material sólido (matéria orgânica mais cinzas).

Figura 27 - Rendimento Mássico de Biomassas Lenhosas e Não-lenhosas



Na Figura 28, demonstra-se as biomassas que apresentaram rendimentos inferiores a 50% em processo de torrefação à 300°C (este ponto representa o menor rendimento para biomassa lenhasas). Em todos os casos, as biomassas que apresentaram esse rendimento inferior são não-lenhosas (*non-woody*).

Figura 28 - Rendimento de Biomassas Abaixo de 50%



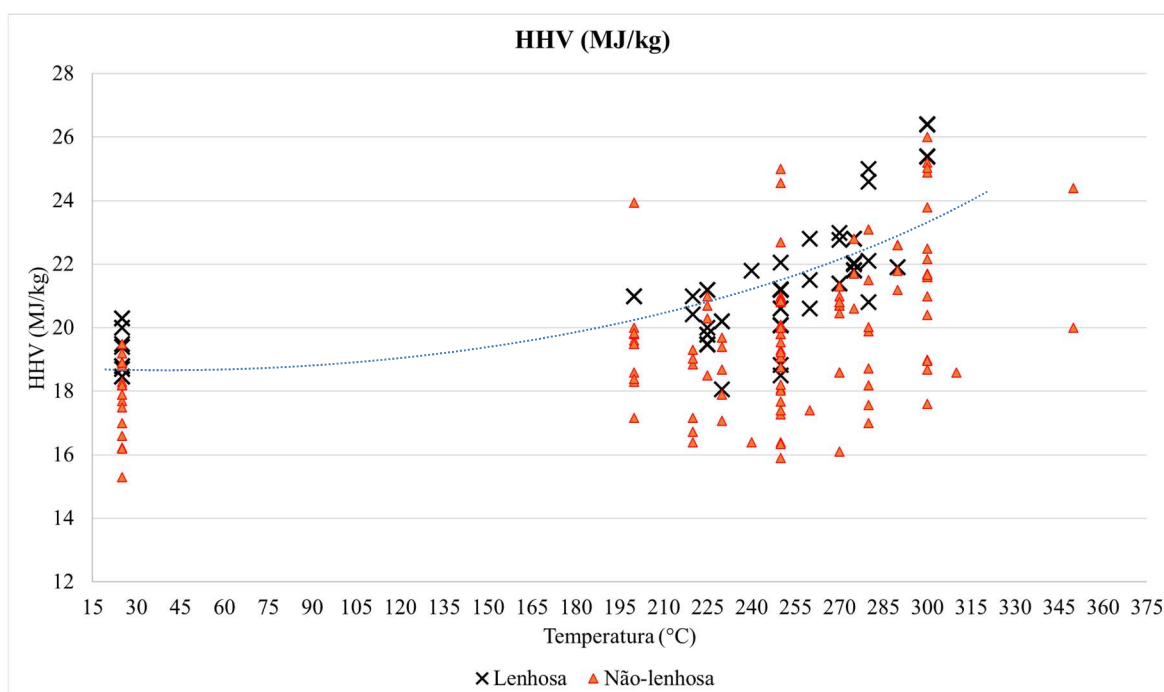
Uma outra medida muito importante é o rendimento energético. Neste caso, à medida que a torrefação decorre em temperaturas mais elevadas, a biomassa vai melhorando suas propriedades energéticas; de contrapartida há uma redução no rendimento mássico.

O poder calorífico (MJ/kg) da biomassa aumenta conforme é aumentada a temperatura de torrefação, como pode-se verificar na Figura 29. Nesta situação, conforme é procedida a torrefação em variedades de biomassas e temperaturas de processamento, há um adensamento energético, ou seja, há um aumento no poder calorífico da biomassa. Inicialmente as biomassas possuem um poder calorífico em torno de 18 MJ/kg e conforme se aumenta a temperatura de processamento, também é verificado um aumento desse valor, acima de 20 MJ/kg.

Observando a Figura 29, diante de dados disponibilizados pela literatura (ANEXO I), percebe-se que as biomassas lenhosas (*wood*) possuem um comportamento de adensamento mais regular, aumentando o poder calorífico gradualmente conforme aumenta-se a temperatura de processo; já as biomassas não-lenhosas, o comportamento é mais desordenado e menos concentrado.

Cabe ressaltar, no entanto, que quanto maior é a temperatura de torrefação, menor é o rendimento mássico Figura 27. Por isso ambos sempre devem ser correlacionados.

Figura 29 - Poder Calorífico Final das Biomassas Torrefadas

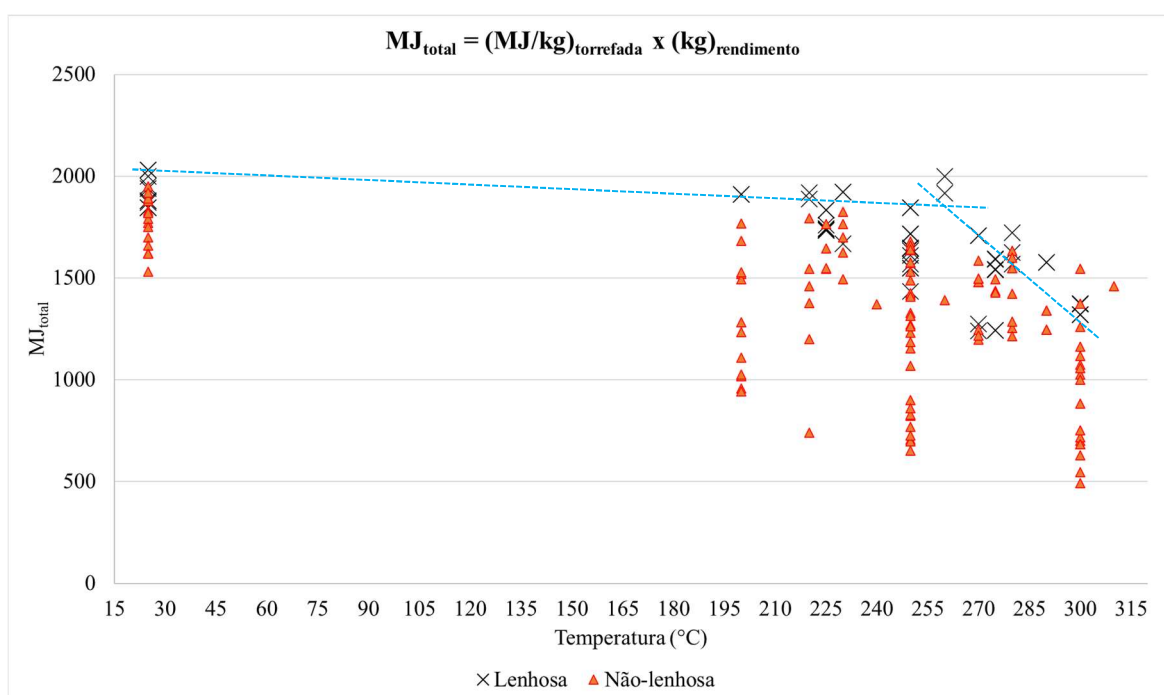


Em vista dos resultados apresentados anteriormente, elaborou-se uma avaliação com diversas biomassas em diversas temperaturas de processamento para verificar o quando de energia estava disponível em um processamento hipotético usando 100 kg de biomassa inicialmente (ANEXO I), Equação 7.

Primeiramente, os cálculos foram procedidos a partir dados iniciais das biomassas (original), com seu respectivo poder calorífico superior (HHV em MJ/kg) multiplicado por 100 kg de biomassa original ($EY = 1$, Equação 7). Posteriormente, foi utilizado os dados das biomassas torrefadas em diferentes temperaturas com seus respectivos poderes caloríficos superiores (HHV em MJ/kg) e multiplicados pelo produto da massa inicial da biomassa com o rendimento mássico da torrefação em diferentes temperaturas ($MY \neq 1$, Equação 7).

Como pode-se verificar na Figura 30, a energia disponível (MJ_{total}) a partir dos 100 kg iniciais da biomassa, variam conforme processamento. As biomassas não-lenhosas (*non-wood*), tendem a diminuir mais a energia disponível depois da torrefação frente as biomassas lenhosas (*wood*), principalmente para situações em que a temperatura é inferior a 270°C (torrefação branda e média). As biomassas lenhosas (*wood*) tendem a manter um patamar elevado de energia disponível, no entanto, quando a torrefação supera os 270°C (torrefação severa), a energia disponível pós-tratamento decai consideravelmente, chegando-se a valores próximos às não-lenhosas (*non-wood*).

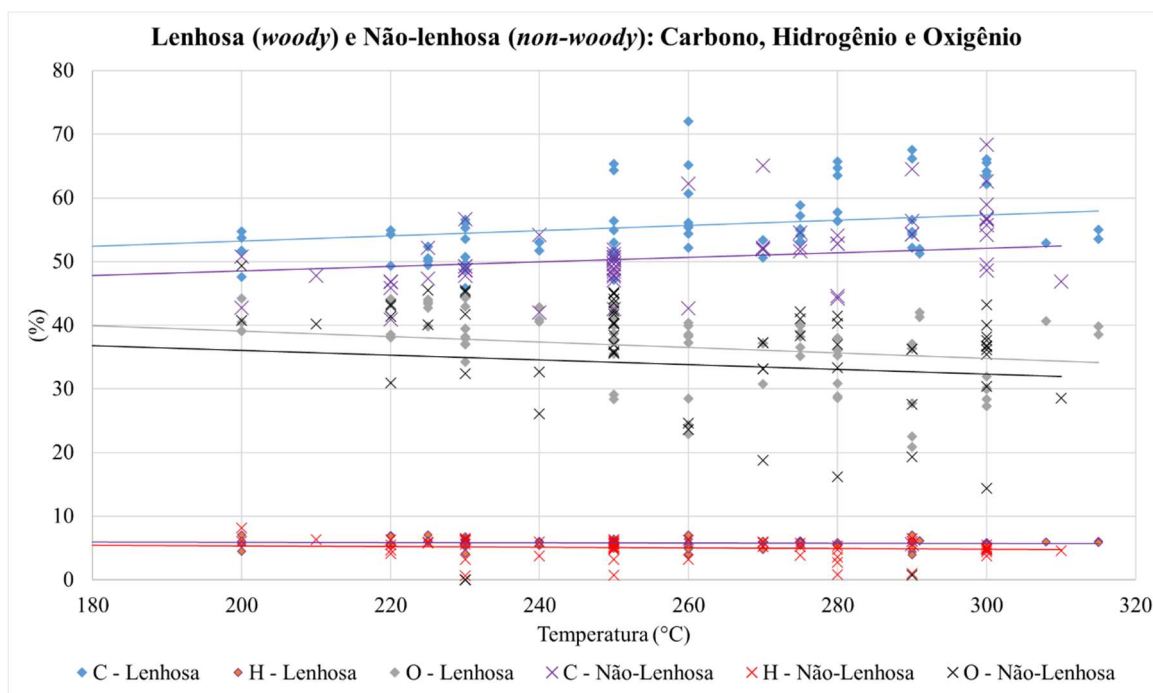
Figura 30 - Poder Calorífico Total por 100 kg de Biomassa Inicial



Foi também realizado um estudo do comportamento da concentração dos elementos fundamentais dos polímeros da biomassa, Carbono (C), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O). A concentração atômica desses elementos em variedades de biomassas torrefadas em diferentes temperaturas, estão apresentadas no (ANEXO I). Verifica-se na Figura 31, a concentração de Oxigênio e Hidrogênio diminui, enquanto a de Carbono aumenta. Ou seja,

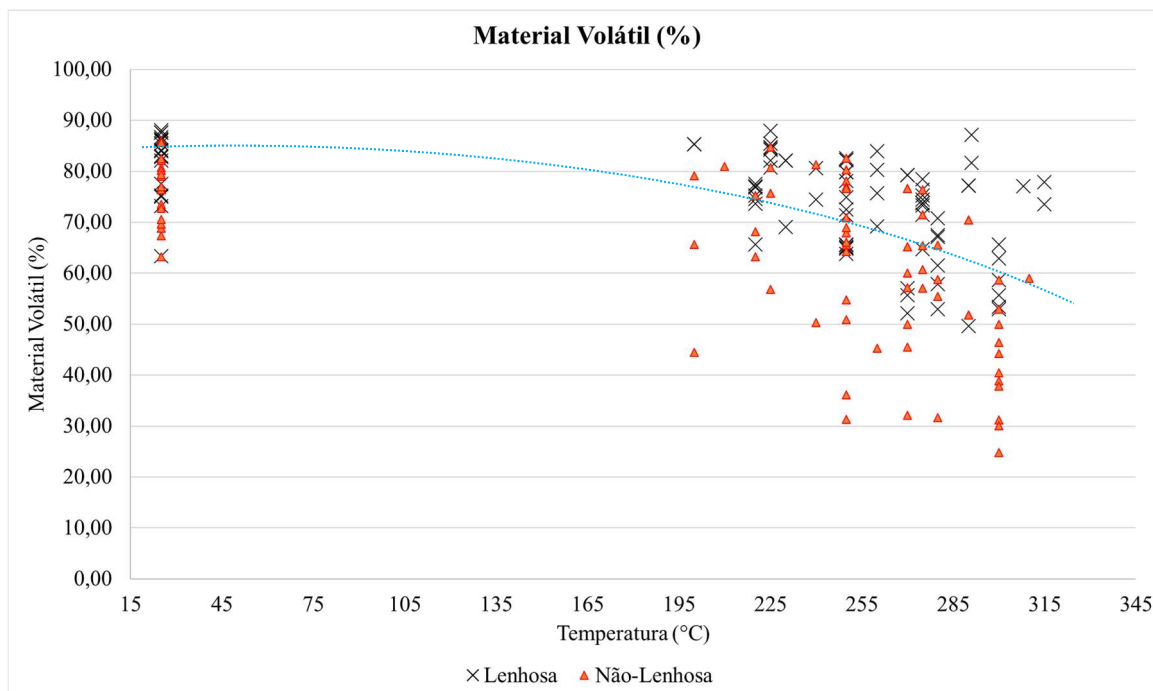
a torrefação serve como termoprocessamento para retirada de oxigênio e hidrogênio da matriz estrutural dos materiais lignocelulósicos. Diante disso, pode-se correlacionar com os produtos voláteis da torrefação, que são constituídos basicamente de composto oxigenados e o teor de carbono aumenta à medida que a torrefação é procedida em temperaturas mais elevadas (TUMULURU et al., 2021; VAN DER STELT et al., 2011). Não foi detectado uma grande variação entre lenhosas (*wood*) e não-lenhosas (*non-wood*).

Figura 31 - Concentração de Carbono, Hidrogênio e Oxigênio



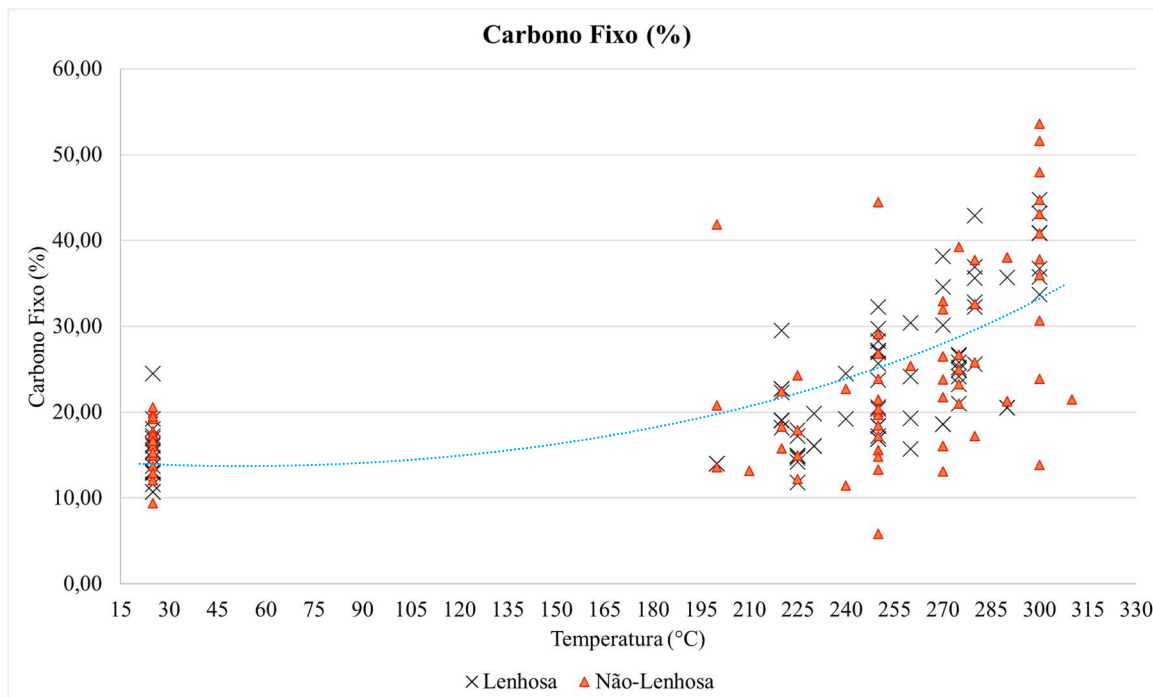
O material volátil da biomassa torrefada é reduzido em processos de torrefação, Figura 32. Quanto maior é a temperatura de termoprocessamento, menor a quantidade de material volátil na biomassa residual. As biomassas não-lenhosas (*non-wood*) reduzem mais a quantidade de material volátil frente as lenhosas (*wood*).

Figura 32 - Redução de Material Volátil



O carbono fixo, por sua vez, tanto para biomassa lenhosa (*wood*) e não-lenhosa (*non-wood*) aumenta de concentração, conforme se verifica na Figura 33. Cabe ressaltar que não há grandes variações para os diferentes tipos de biomassa e que quanto maior é a temperatura de torrefação, maior é o teor de carbono fixo na biomassa torrefada.

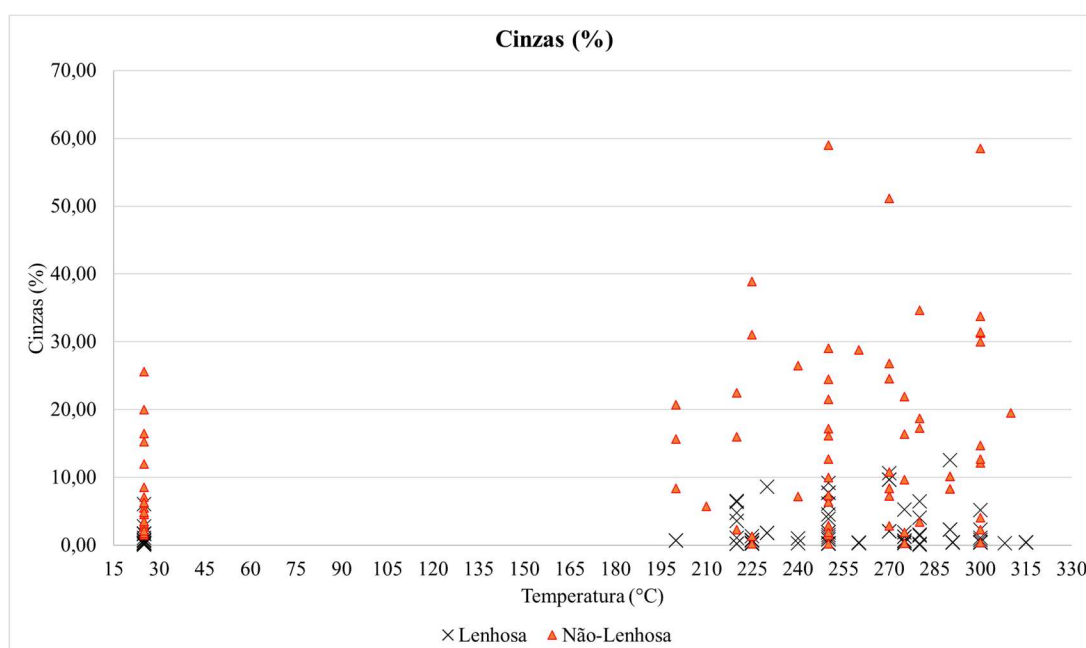
Figura 33 - Aumento Carbono fixo a Torrefação



As cinzas são constituídas de material inorgânico (nutrientes essenciais para o crescimento vegetal). É imprescindível a análise da quantidade de cinzas que as biomassas possuem diante das possíveis propriedades catalíticas sobre os materiais lignocelulósicos. (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; BRIDGWATER, 2012).

É muito discutido o papel das cinzas nos processos termoquímicos, geralmente elas facilitam a quebra de moléculas da biomassa. As biomassas não-lenhosas (*non-wood*), conforme se observa em literatura (Tabela 8), possuem um teor de cinza mais elevado quando comparadas as lenhosas (*wood*). Enquanto as não-lenhosas apresentam um teor de cinzas que podem chegar a 30% na constituição original da biomassa, as lenhosas não possuem teores superiores a 10% (ANEXO I). Essa quantidade de cinza encontrada na biomassa original aumenta sua concentração conforme se aumenta a temperatura de torrefação. Na bibliografia consultada neste trabalho, as cinzas atingiram quase 60% em concentração nas biomassas não-lenhosas; já as biomassas lenhosas, as concentrações de cinzas na biomassa torrefada não ultrapassam 15%, conforme Figura 34.

Figura 34 - Aumento da Concentração de Cinzas na Biomassa



Vem muito se discutindo a possibilidade da troca de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis diante do aquecimento global (HORNUNG, 2013). A substituição de carvão mineral por biomassa é uma possibilidade real, em específico a substituição por biomassa torrefada, diante das melhorias observadas no material e proximidade adquirida comparada ao carvão mineral (IEA, 2015), conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades de Materiais Combustíveis

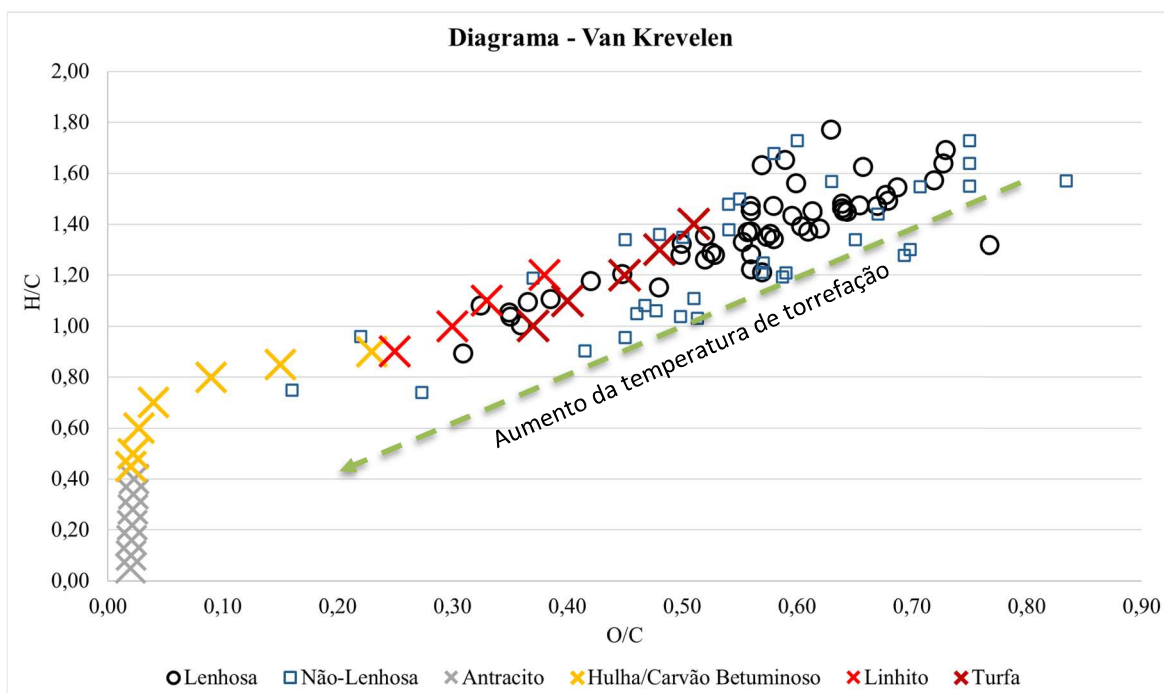
Parâmetro	Madeira	Pellets Madeira	Pellets de Torrefação	Carvão Vegetal	Carvão Mineral
Umidade (%)	30-45	7-10	1-5	1-5	10 -15
(MJ/kg)	9-12	15 -18	20 - 24	30 -32	23 -28
Material Volátil (%)	70 -75	70 - 75	55 -65	10 -12	15 -30
Carbono Fixo (%)	20 -25	20 - 25	28 -35	85 -87	50 -55
Densidade (kg/l)	0.2 - 0.25	0.55 - 0.75	0.75 - 0.85	~ 0.20	0.8-0.85
Densidade Energética (GJ/m ³)	2.0 -3.0	1.5 -10.4	15.0 - 18.7	6 -6.4	18.4 - 23.8
Poeira	Média	Limitada	Limitada	Alta	Limitada
Água	Hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Hidrofóbico	Hidrofóbico
Degradação Biológica	Sim	Sim	Não	Não	Não
Redução de Tamanho	Difícil	Difícil	Boa	Boa	Boa
Manuseio	Especial	Especial	Boa	Boa	Boa
Variabilidade de Qualidade	Alta	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada

O Diagrama de Van Krevelen ajuda a entender o processo de melhorias. Esse diagrama lança mão da relação atômica de O/C e H/C para classificar os diferentes tipos de carvão mineral. Diante disso, pode-se comparar a biomassa original e torrefada em diferentes temperaturas.

Foram buscadas inúmeras referências bibliográficas de biomassa originais e torrefadas com suas relações de O/C e H/C (ANEXO I). A biomassa original, encontra-se localizada na porção superior extrema direita da Figura 35, isso se deve a elevadas relações de O/C e H/C. Os carvões minerais, por sua vez, apresentam relações inferiores em ambas as razões, posicionando-se graficamente na porção inferior esquerda.

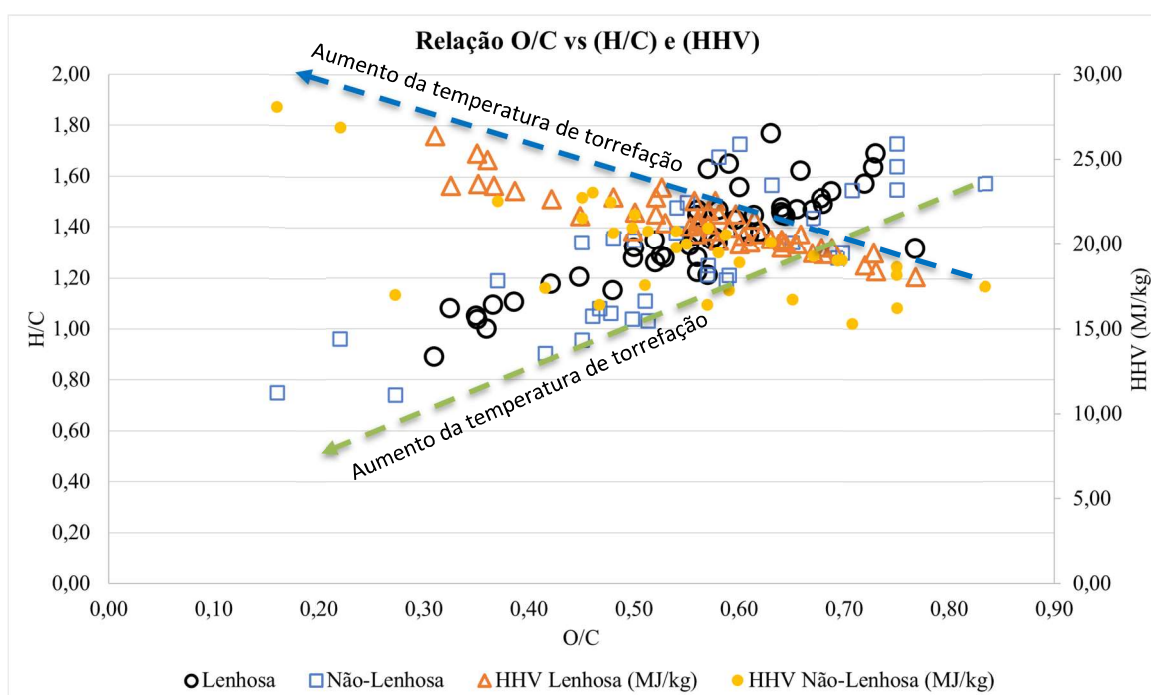
À medida que se aumenta a temperatura de torrefação, a relação de O/C e H/C diminui em comparação a biomassa natural, Figura 35. Isso faz com que a relação de O/C e H/C diminua e vá em direção as características do carvão mineral (hulha). Como pode-se verificar, a biomassa torrefada em elevadas temperaturas adquirem relações de O/C e H/C que se aproximam do carvão mineral. Não há uma grande diferença observada entre as biomassas lenhosas (*wood*) e não-lenhosas (*non-wood*).

Figura 35 - Diagrama de Van Krevelen – Biomassas Torrefada e Carvão Mineral



Outra análise realizada foi a da relação entre O/C com H/C e de O/C com HHV (poder calorífico superior – MJ/kg). Como pode-se observar, quanto menor é a relação de O/C e H/C maior é o poder calorífico (HHV), Figura 36. Em ambas as classificações de tipo de biomassa isso foi observado.

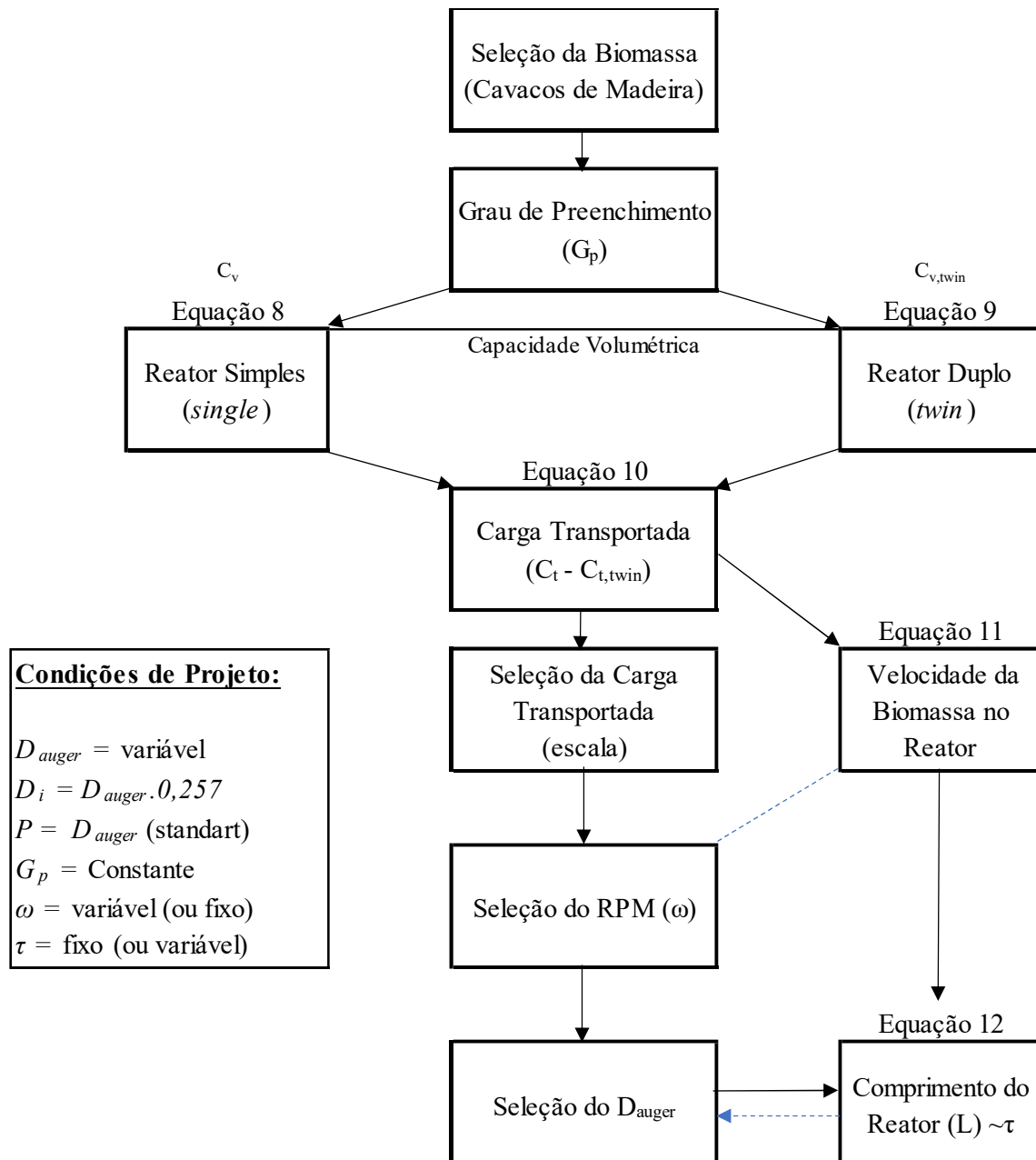
Figura 36 - Relação O/C com H/C e Dependência da Temperatura



4.2 Reator Auger – Rosca Transportadora– Cavacos de Madeira

Nesta seção de resultados será apresentado o processo de dimensionamento de uma rosca transportadora para reatores de torrefação tipo auger. O procedimento de dimensionamento segue o fluxograma da Figura 37.

Figura 37 - Fluxograma de Dimensionamento da Rosca Transportadora



4.2.1 Dimensionamento - Reator Simples (Single)

A ANSI/CEMA, (2019) fornece dados da Capacidade Volumétrica (C_v) em pé cúbico por hora (ft^3/h), operando a 1 RPM e com três diferentes Grau de Preenchimento (G_p) (15%,

30% e 45%) em situação padrão, ou seja, quando o Passo da Rosca é igual ao Diâmetro Auger ($P = D_{auger}$). Esse sistema de medida, no entanto, é não convencional (inapropriado) para uma hipotética situação brasileira. Por isso, foi utilizado a unidade de volume em centímetros (Equação 12).

Para o projeto, é proposto uma verificação da relação de Diâmetro interno (D_i) e Diâmetro Auger (D_{auger}). A ANSI/CEMA (2019) padroniza as roscas transportadoras, com diferentes Diâmetros Auger e Diâmetros Interno, sendo que um determinado Diâmetro Auger pode possuir diferentes Diâmetros Internos, pois este pode variar conforme o tipo de material a ser transportado. A fim de entender isso, foi realizado um estudo dessas relações. Os Diâmetros Auger (D_{auger}) são padronizados em polegadas: 6, 9, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30 e 36. A razão de D_i/D_{auger} transmite como varia esta proporção para diferentes valores dessas variáveis, Tabela 11.

Foi verificado, no entanto, que se utilizada a média ($D_i/D_{auger} = \text{médio}$) desses valores para o cálculo dos volumes transportados, o Erro Relativo do Volume Transportado entre o fornecido pela (ANSI/CEMA, 2019) e o calculado pela média, não ultrapassava 5,1% (com exceção do menor diâmetro), conforme Tabela 11. A média encontrada da relação D_i/D_{auger} é de 0,257.

Tabela 11 - Relação de Diâmetro Interno e Diâmetro Auger

ANSI/CEMA		Novo ($G_p = 15\%, 30\% \text{ e } 45\%$)				
D_{auger} (pol)	D_i (pol)	D_{auger} (cm)	D_i (cm)	D_i/D_{auger}	$D_i/D_{auger} = \text{médio}$	Erro Relativo do Volume Transportado
6	2,38	15,24	6,03	0,40		10,7%
9	2,38	22,86	6,03	0,26		0,4%
9	2,88	22,86	7,30	0,32		4,0%
12	2,88	30,48	7,30	0,24		-0,9%
12	3,50	30,48	8,89	0,29		2,1%
12	4,00	30,48	10,16	0,33		5,1%
14	3,50	35,56	8,89	0,25		-0,4%
14	4,00	35,56	10,16	0,29		1,7%
16	4,00	40,64	10,16	0,25	0,257	-0,4%
16	4,50	40,64	11,43	0,28		1,4%
18	4,00	45,72	10,16	0,22		-1,8%
18	4,50	45,72	11,43	0,25		-0,4%
20	4,00	50,80	10,16	0,20		-2,7%
20	4,50	50,80	11,43	0,23		-1,6%
24	4,50	60,96	11,43	0,19		-3,2%
30	5,56	76,20	14,13	0,19		-3,3%
36	6,63	91,44	16,83	0,18		-3,3%

O sistema padronizado da ANSI/CEMA (2019) fornece dados engessados (rígidos) de dimensões de Diâmetros Auger. O cálculo, portanto, da média das relações dos diâmetros ($D_i/D_{auger} = 0,257$) possibilita uma liberdade para trabalhar com uma ampla gama de Diâmetros Auger, os quais não são fornecidos. Esta relação será sempre adotada de aqui em diante.

Foram então calculados, para uma situação hipotética, o transporte para torrefação de Cavacos de Madeira (*Wood, Chips, Screened*). A classificação da (ANSI/CEMA, 2019) para esse material é o seguinte (Tabela 12).

Tabela 12 - Classificação Cavacos de Madeira

Descrição do Material	Densidade Volumétrica (kg/m ³)	Código CEMA
Cavacos de Madeira	160 - 480	20D ₃ 45VY

O Código CEMA (20D₃45VY) fornece dados para classificação: o número 20 é relativo à média da densidade (lb/ft³), o D₃ é relativo ao tamanho (granular abaixo de 3 polegadas ou 7,62 centímetros), o número 4 representa baixa fluidez (lento/lerdo), o número 5 é relativo a baixa abrasividade, V relativo a intertravamentos, tapetes ou aglomerados e Y como sendo muito leve e fofo. Toma-se agora a primeira letra (D) e os últimos dois números (45) onde é classificado como D45. Essa classificação, segundo (ANSI/CEMA, 2019), propõem um Grau de Preenchimento (G_p) máximo de 30% da rosca transportadora.

Outros dados são fornecidos, como tipo de material construtivo ideal para a rosca e componentes, bem como distribuição e classificação granulométrica do material (empírico), no entanto, para este estudo, esses dados não foram contabilizados.

Depois de devida classificação do material e eleito o Grau de Preenchimento ($G_p = 30\%$) adequado para o transporte de Cavacos de Madeira para torrefação, pode-se então proceder os cálculos de Capacidade Volumétrica (C_v) para diferentes Diâmetros Auger (D_{auger}) e diferentes RPMs (ω) de operação para torrefação.

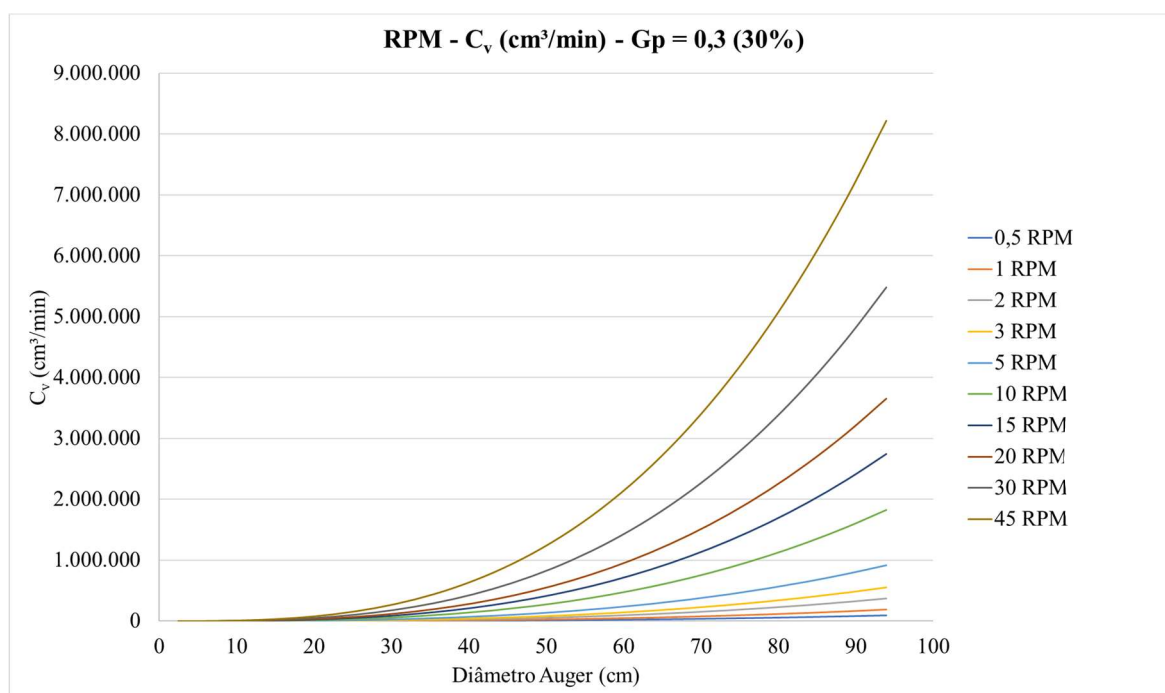
É importante destacar que para um processo de torrefação, a biomassa deve permanecer em ambiente reacional de minutos a horas. O qual pode ser controlado pela rotação da rosca transportadora. Por isso, é imprescindível destacar que quanto maior é a rotação da rosca transportadora (grandes RPMs) maior deverá ser o comprimento (L) do reator. Caso contrário, a biomassa será transportada e atravessará o reator sem um devido tempo de residência (poucos minutos), comprometendo a eficiência e objetivo do processo.

O estudo de dimensionamento eleito foi a da situação padrão (*standart*, $P = D_{auger}$ - Passo igual ao Diâmetro Auger). Os Diâmetros Auger (D_{auger}) eleitos, os RPMs, bem como a relação de $D_i/D_{auger} = 0,257$ para cálculo do Diâmetro interno (D_i) seguem na Tabela 13.

Tabela 13 - Diâmetros, Passo e RPM da Rosca Transportadora

Padrão (Dauger = Passo)			$D_i/D_{auger} = 0,257$	$G_p = 30\%$
D_{auger} (pol)	D_{auger} (cm)	P (cm)	D_i (cm)	RPM
1	2,54	2,54	0,65	
3	7,62	7,62	1,96	
5	12,7	12,7	3,26	
7	17,78	17,78	4,57	
9	22,86	22,86	5,88	0,5
11	27,94	27,94	7,18	1
13	33,02	33,02	8,49	2
15	38,1	38,1	9,79	3
17	43,18	43,18	11,10	5
19	48,26	48,26	12,40	10
21	53,34	53,34	13,71	15
23	58,42	58,42	15,01	20
25	63,5	63,5	16,32	30
27	68,58	68,58	17,63	45
29	73,66	73,66	18,93	
31	78,74	78,74	20,24	
33	83,82	83,82	21,54	
35	88,9	88,9	22,85	
37	93,98	93,98	24,15	

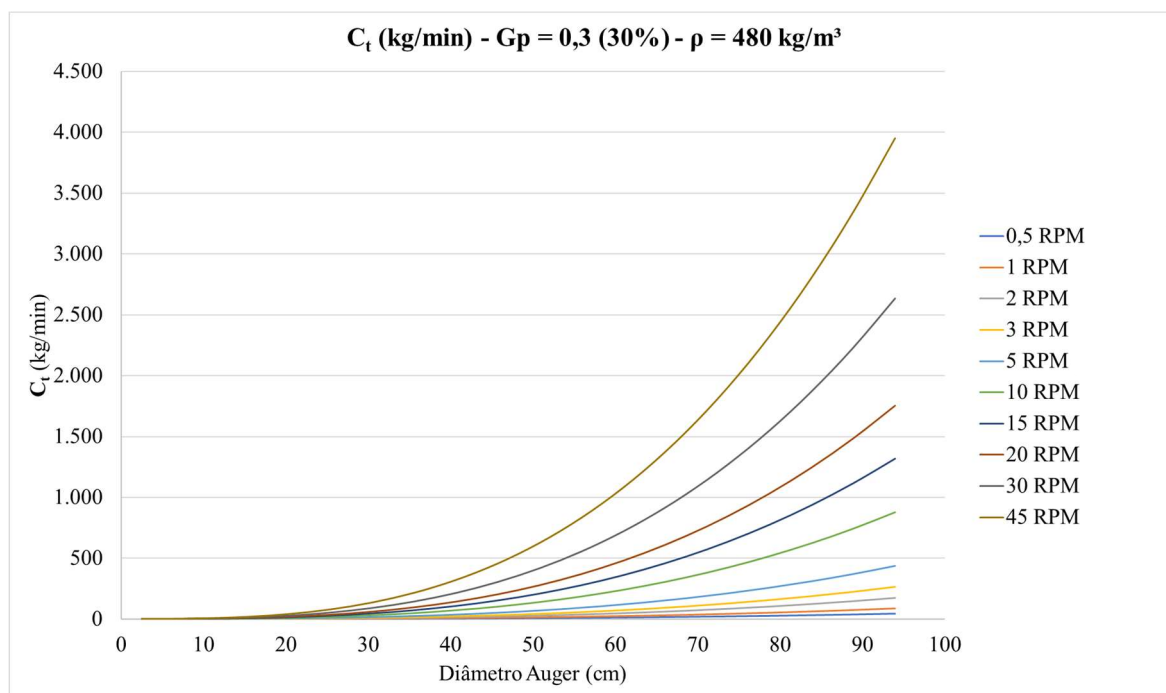
Utilizando a Equação 8, para um reator de rosca simples, pode-se então construir as curvas de Capacidade Volumétrica (C_v) para diferente Diâmetros Auger (D_{auger}) e diferentes RPMs de rotação da rosca, os resultados seguem na Figura 38. Conclui-se que conforme se aumenta D_{auger} , para uma mesma rotação RPM, maior é o volume transportado pela rosca.

Figura 38 - Resultado da Capacidade Volumétrica (C_v) da Rosca Transportadora Simples

Construídas as curvas de Capacidade Volumétrica (C_v), Equação 8, pode-se calcular a Carga Transportada (C_t), Equação 14. Basta multiplicar a Capacidade Volumétrica (C_v) pela Densidade da Biomassa (ρ) dos Cavacos de Madeira. A densidade volumétrica utilizada

foi de $0,480 \text{ g/cm}^3$ (ou 480 kg/m^3) para cavacos de madeira em base úmida (GRUDULS, 2013). Como ideia de projeto, a secagem dos cavacos de madeira deverá ser procedida conjuntamente ao processo de torrefação, sendo caracterizada pela etapa de aquecimento da biomassa até temperaturas um pouco superiores a 100°C . Os resultados seguem na Figura 39. Novamente, conforme se aumenta o Diâmetro *Auger* e os RPMs de operação, maior é carga transportada em kg/min.

Figura 39 – Carga Transportada (C_t) da Biomassa (kg/min) para diferentes RPM em rosca simples



Em uma avaliação realizada pela IES (2015), é constatada uma certa maturidade tecnológica em reatores tipo *Auger* para torrefação de biomassa, com inúmeras plantas espalhadas pelo mundo. A classificação proposta para os reatores é dada pela capacidade processamento em toneladas por hora, segundo a mesma bibliografia:

- *Laboratorial*: < 0,05 tonelada/hora;
- *Piloto*: entre 0,05 e 0,5 tonelada/hora;
- *Demonstrativa*: entre 0,5 e 2 toneladas/hora;
- *Comercial*: > 2 toneladas/hora.

O reator de escala comercial tipo *auger* de maior expressão é da cooperação entre as empresas *Salvoy* (França) e *New Biomass Energy* (Estados Unidos), operante na cidade de *Quitman* (Estados Unidos). Os outros reatores em escalas menores, também se apresentam operantes por outras empresas, bem como em universidades (IES, 2015).

O dimensionamento então foi realizado em situação dessas escalas de processamento, segundo a Capacidade Transportada (C_t) (toneladas/hora), que ao mesmo tempo será a Carga Processada de biomassa na torrefação. Como parâmetro de projeto inicial, foi eleito que a biomassa deverá ser mantida por 30 minutos (τ) em ambiente reacional, para então determinação do Comprimento (L) obrigatório do reator correlacionando com a Velocidade da Biomassa (Vel) transportada no reator, Equação 11 e Equação 12.

Os resultados seguem nas Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44. As linhas contínuas representam a curva de Carga Transportada (C_t) enquanto a linha descontínua representa a curva de Comprimento (L).

Figura 40 – (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Geral

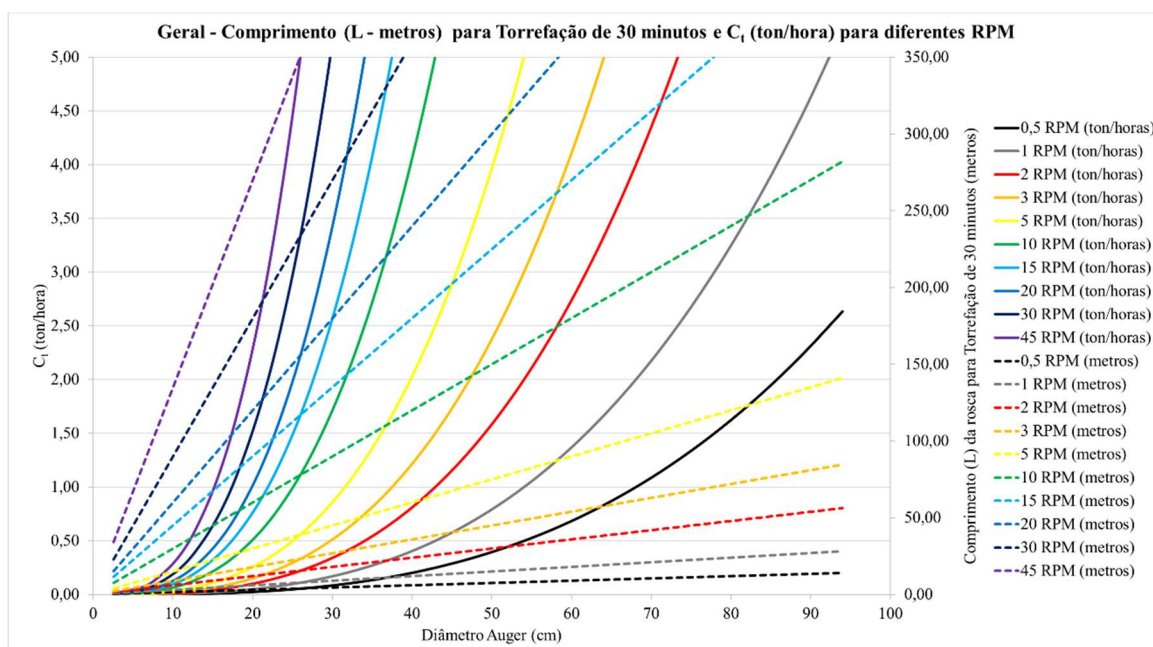


Figura 41 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Comercial (>2 ton/h)

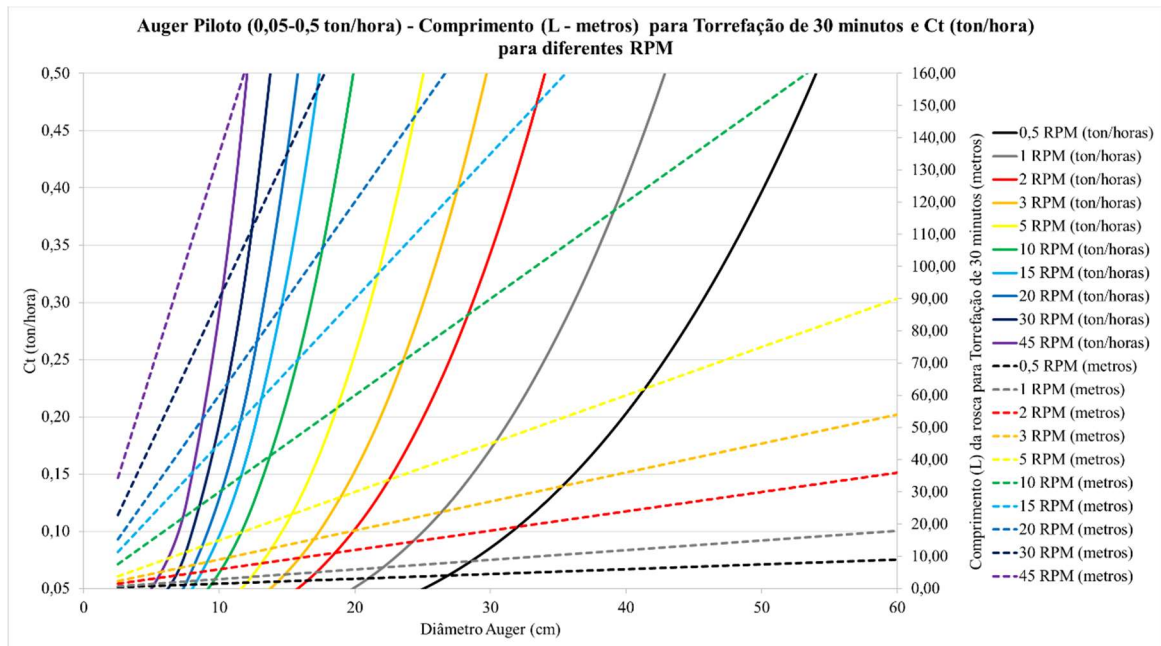


Figura 42 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Demonstrativo (0,5-2 ton/h)

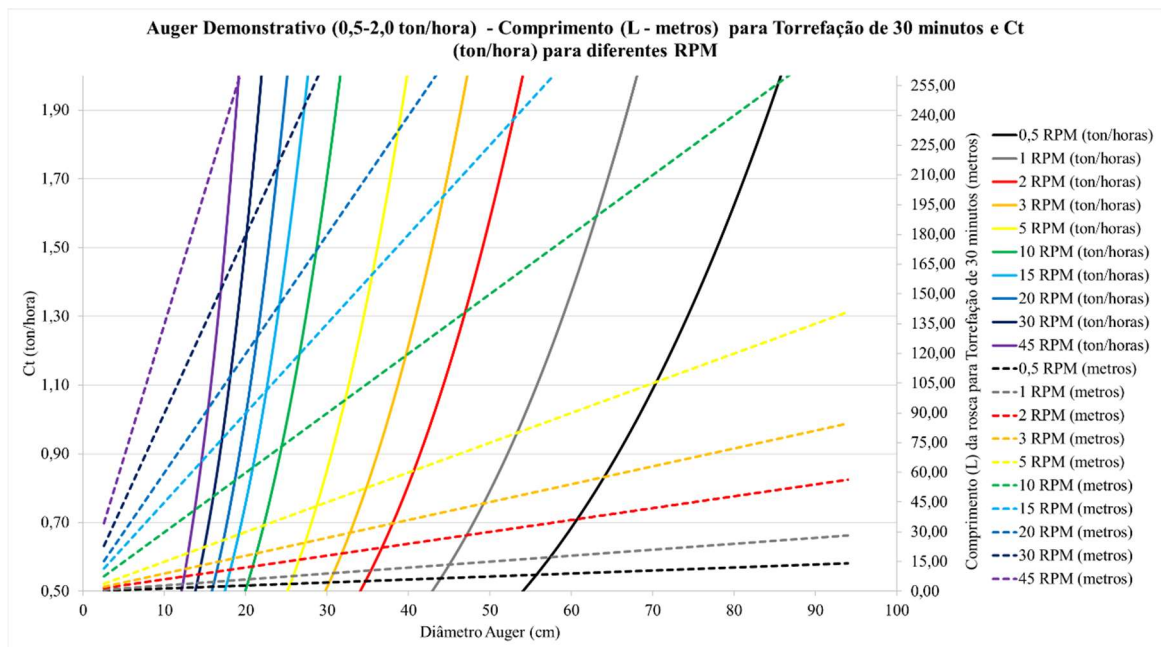


Figura 43 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Piloto (0,05-0,5 ton/h)

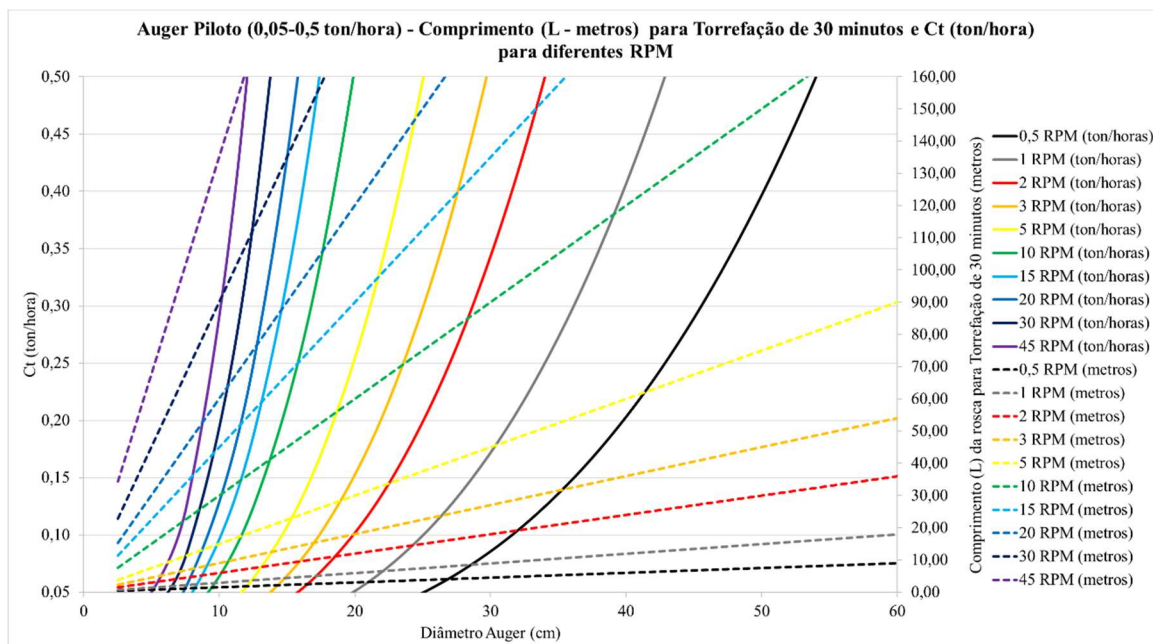
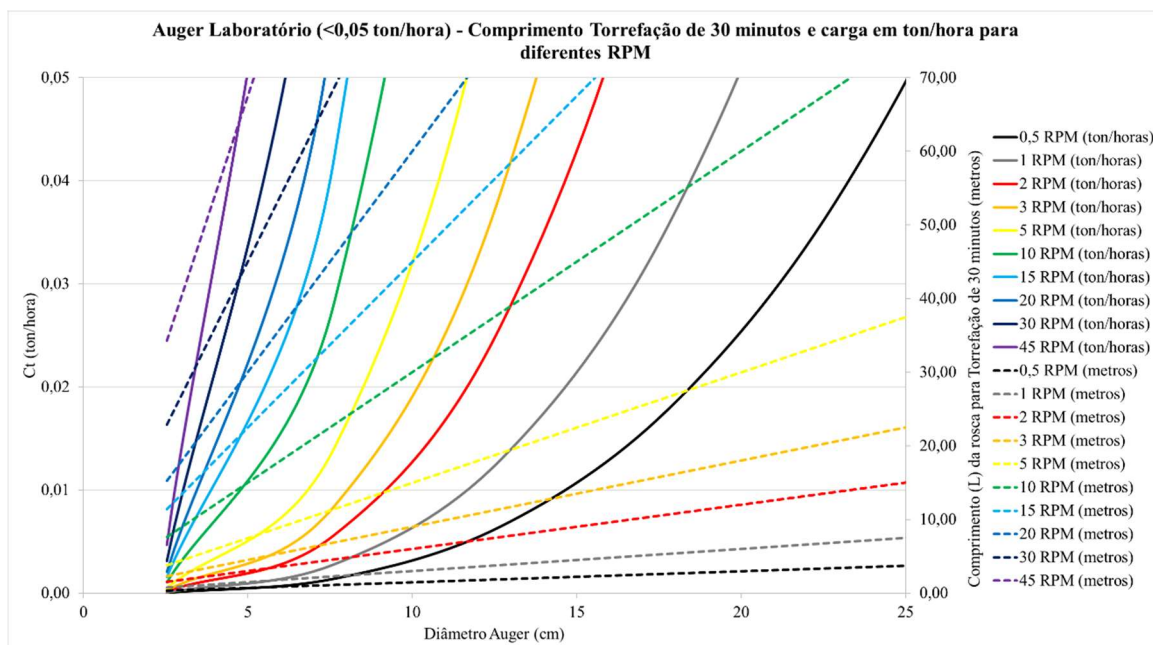


Figura 44 - (SIMPLES) Comprimento (L) e Carga Transportada (C_t) – Laboratório (<0,05 ton/h)



Como conclusão, quanto maior é o RPM, maior deverá ser o Comprimento (L) do reator para processamento em 30 minutos e quanto menor o RPM, menor será o reator.

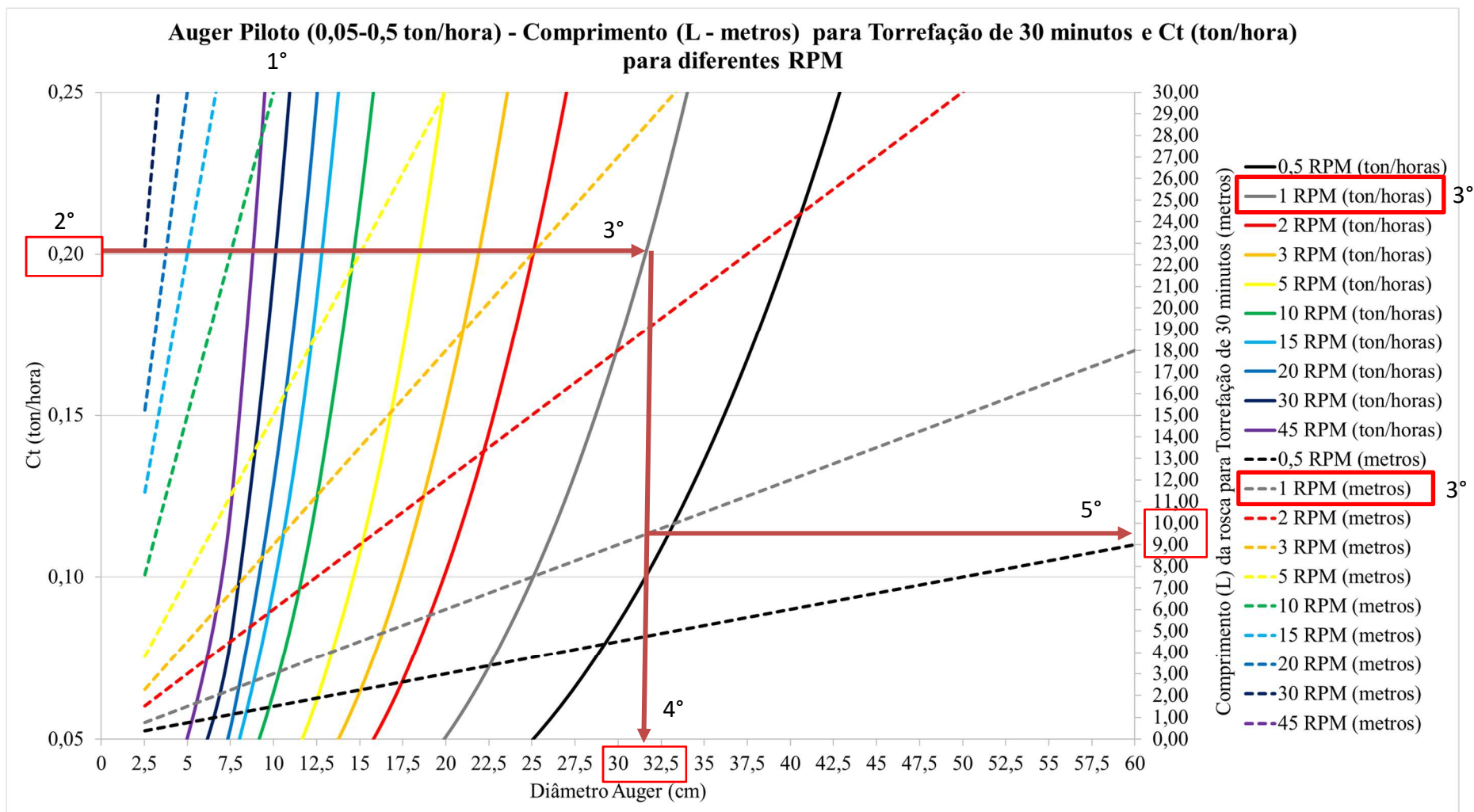
Como demonstrativo de como se realizar a leituras desses Gráficos, segue passo a passo, resultando na Figura 45:

- 1º) Deve-se eleger a Escala (Laboratorial, Demonstrativa, **Piloto** ou Comercial);
- 2º) Elege-se a Carga Transportada ou Processada (**0,2** ton/hora);
- 3º) Transfere-se a carga para as possíveis rotações de processo (**1** RPM);
- 4º) Define-se o RPM e por consequência o Diâmetro Auger (**31,75** cm) adequado;
- 5º) Busca-se o comprimento (**9,5** metros) para o Diâmetro Auger adequado para 30 minutos de torrefação.

Para este projeto, a eleição do tempo de torrefação (τ) de 30 minutos foi pré-determinado pelo fato de que a bibliográfica, normalmente, eleger este tempo de processamento por torrefação. No entanto, é de suma importância que se realize contínuos estudos para que o tempo ideal de processamento seja determinado, além disso, esse tempo pode variar conforme a tipologia de biomassa utilizada.

Como mencionado anteriormente, na seção 3.2.2, 19ª consideração, roscas com comprimento superior a 3,65 metros demandam de suportes, rolamentos e mancais, por isso, nesse reator dimensionado, estes suportes deverão ser previstos.

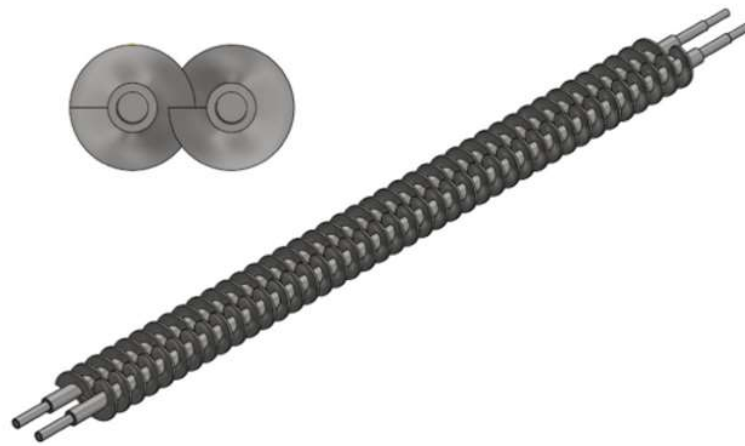
Figura 45 - (SIMPLES) Demonstrativo eleição do Diâmetro Auger, RPM e Comprimento da Rosca



4.2.2 Dimensionamento - Reator Duplo (Twin)

Para o dimensionamento de um reator de torrefação do tipo *auger* de rosca dupla (*twin*), Figura 46, o processo sistemático de cálculo é o mesmo ao de rosca simples. A única diferença é relativo a Equação 9, onde a Capacidade Volumétrica Twin/Duplo ($C_{v,twin}$) é 50% superior a de Capacidade Volumétrica Simples (C_v). Para os demais parâmetros de cálculo deve-se então substituir o C_v por $C_{v,twin}$ (Equações 10, 11 e 12)

Figura 46 - Rosca Transportadora Dupla



Fonte: adaptado de (CAMPUZANO; BROWN; MARTÍNEZ, 2019)

Após a realização de devidos cálculos, os resultados seguem nas Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50 e Figura 51. As linhas contínuas representam a curva de Carga Transportada ($C_{t,twin}$) enquanto a linha descontínua representa a curva de Comprimento (L).

Figura 47- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Geral

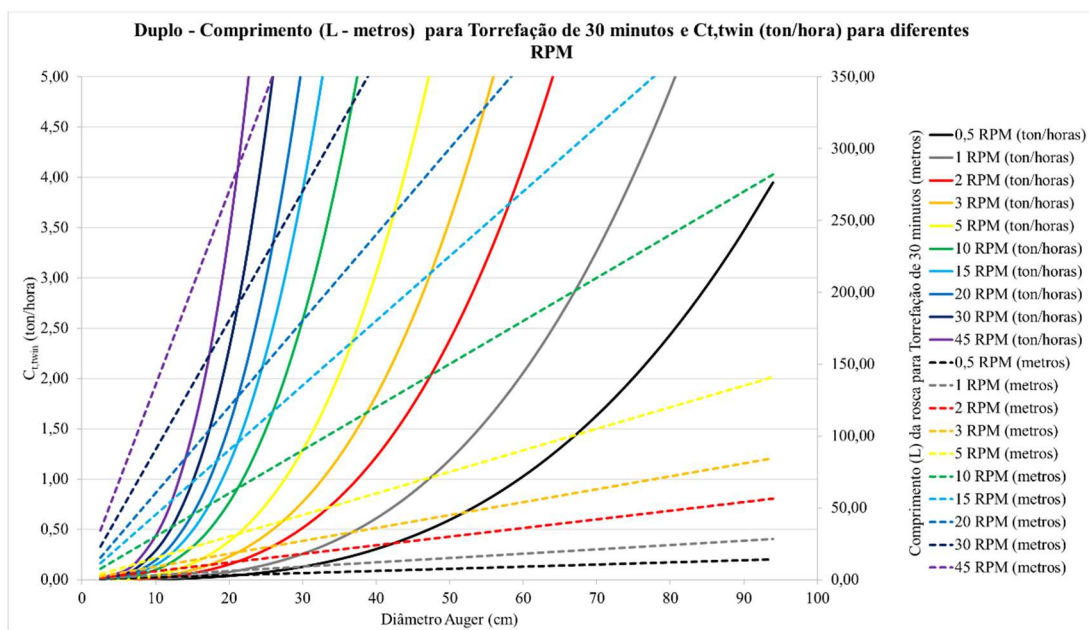


Figura 48- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Comercial (>2 ton/h)

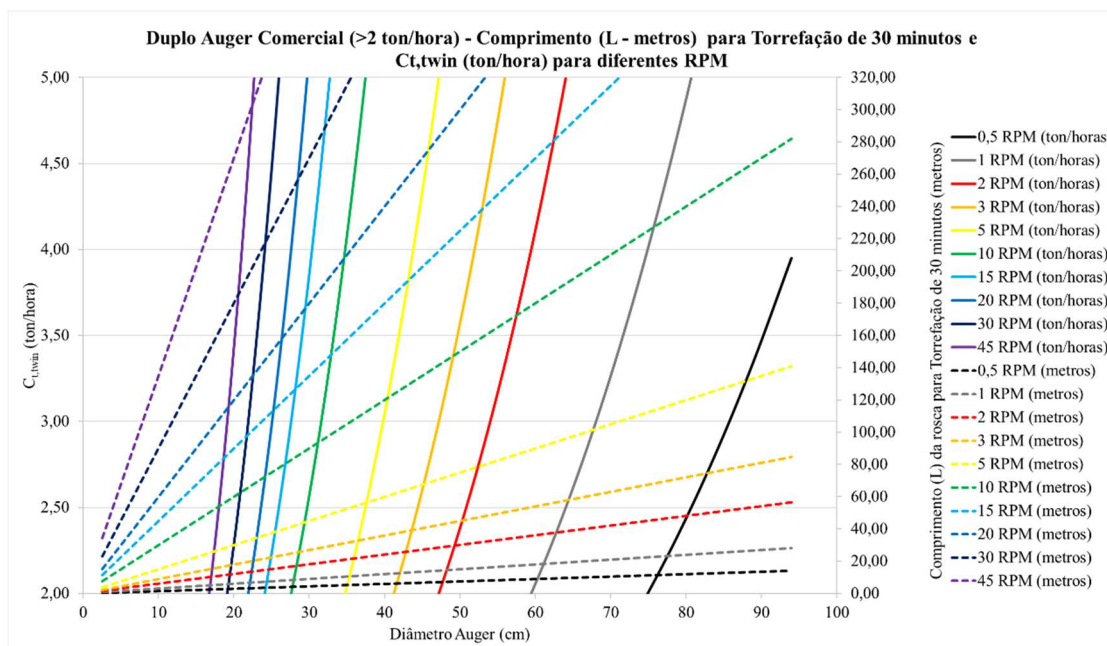


Figura 49- (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Demonstrativo (0,5-2 ton/h)

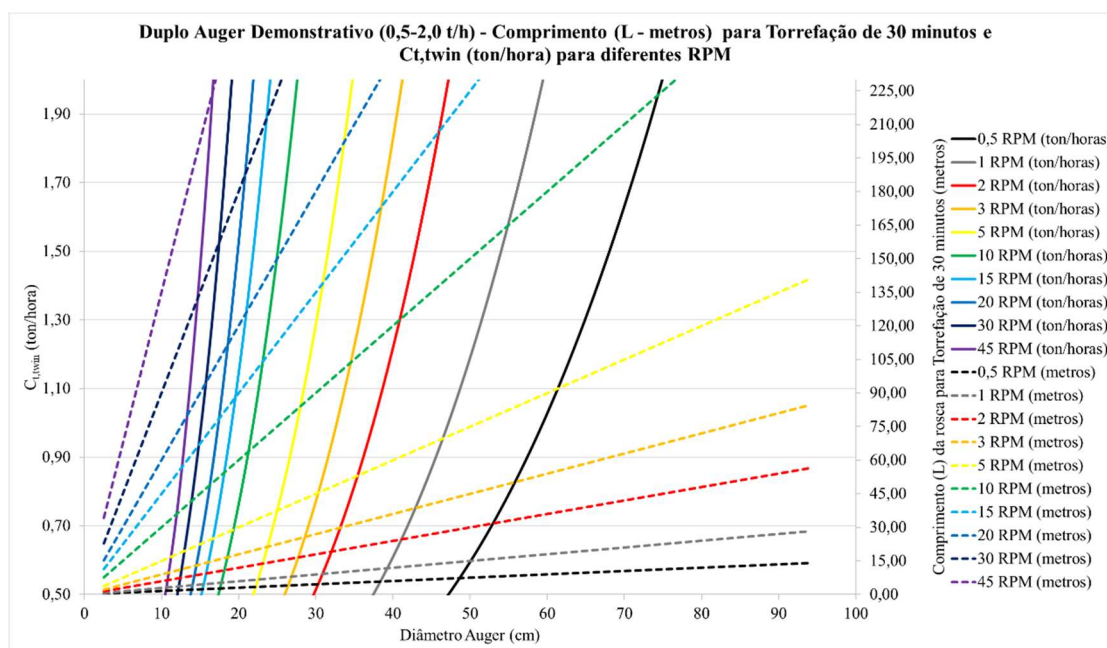


Figura 50 - (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Piloto (0,05-0,5 ton/h)

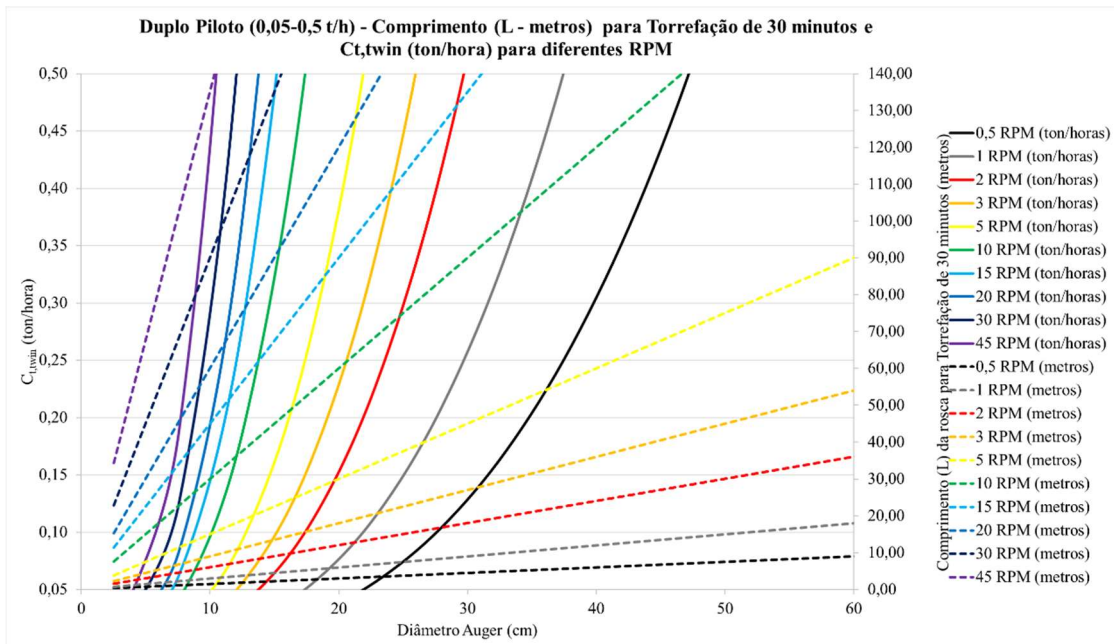
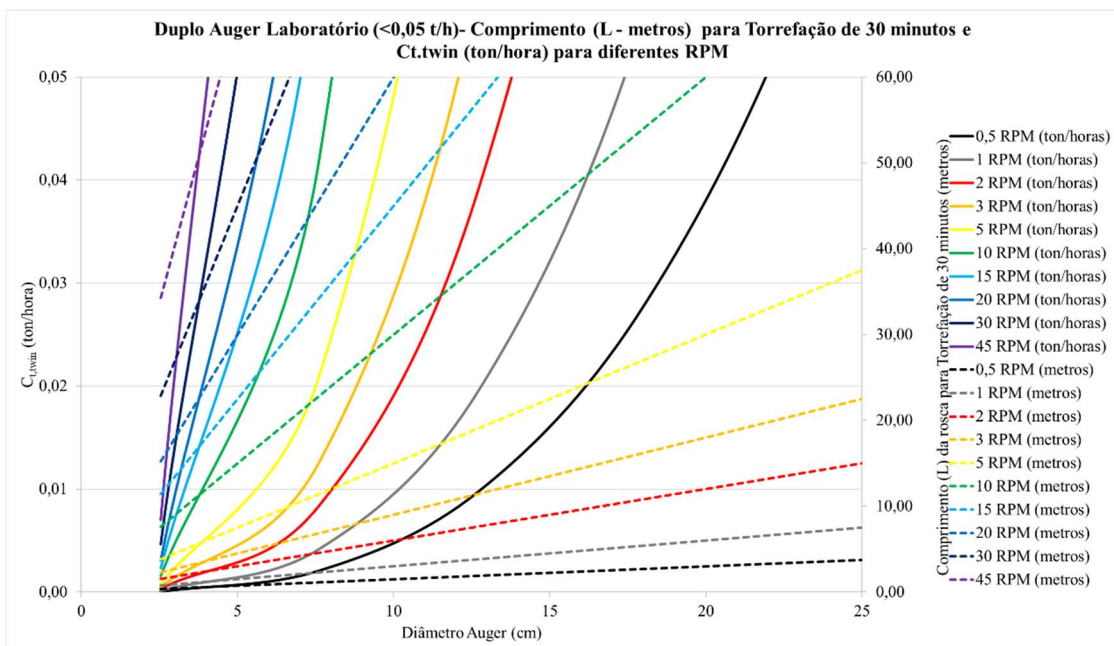


Figura 51 - (DUPLO) Comprimento (L) e Carga Transportada ($C_{t,twin}$) - Laboratório (<0,05 ton/h)



As mesmas conclusões do reator simples podem ser aplicadas ao reator tipo duplo. Além dos benefícios da utilização de um reator tipo duplo para torrefação (melhor mistura, agitação e troca térmica), pode-se observar que o reator duplo é mais compacto, ou seja,

menor comprimento (L) de reator, quando comparado ao simples, para uma mesma capacidade de processamento.

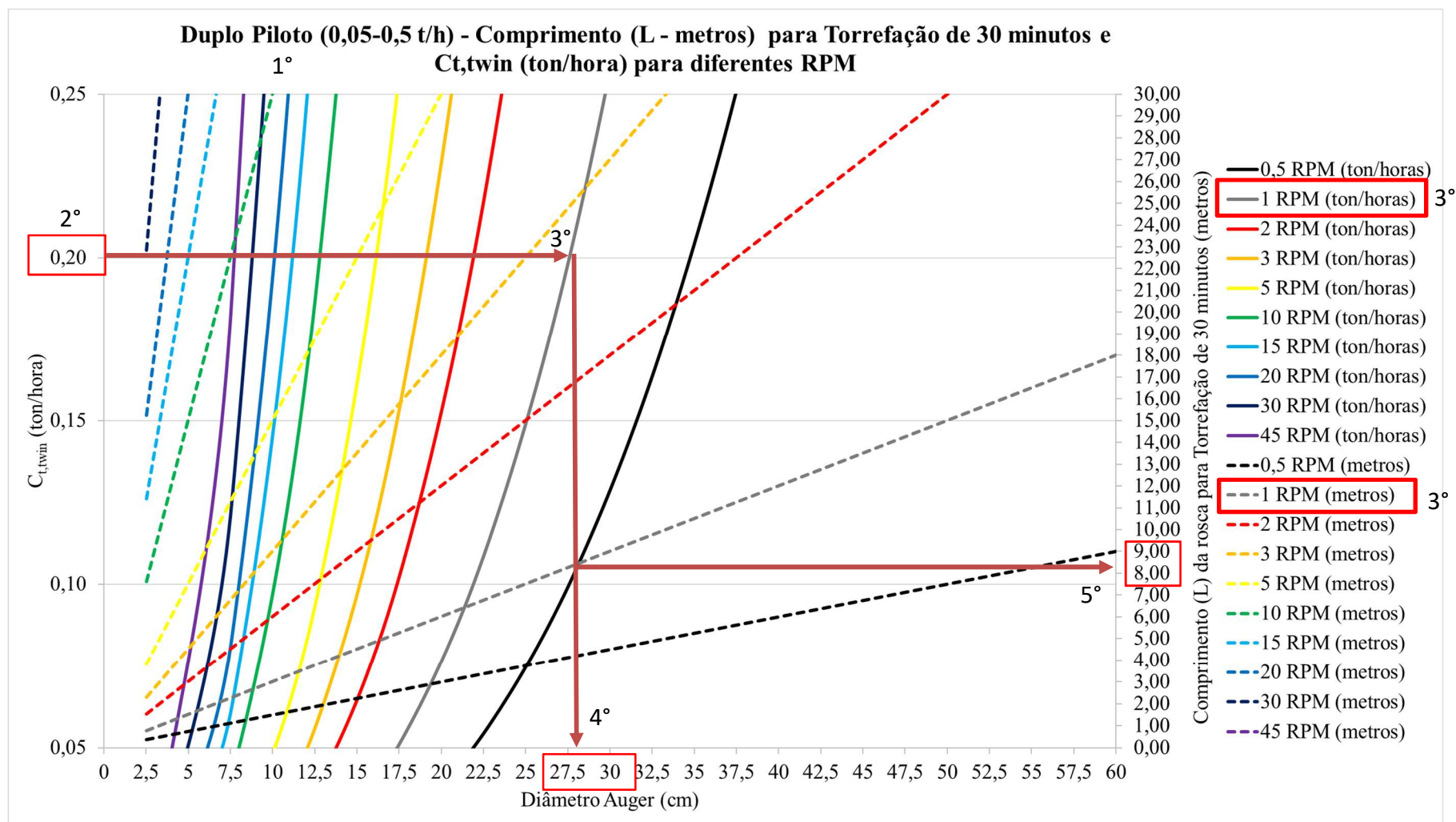
Como demonstrativo de como se realizar a leituras desses gráficos de reator duplo, segue passo a passo, conforme apresentado na Figura 52:

- 1º) Deve-se eleger a Escala (Laboratorial, Demonstrativa, **Piloto** ou Comercial);
- 2º) Elege-se a Carga Transportada ou Processada (**0,2** ton/hora);
- 3º) Transfere-se a carga para as possíveis rotações de processo (**1** RPM);
- 4º) Define-se o RPM e por consequência o Diâmetro Auger (**27,75** cm) adequado;
- 5º) Busca-se o comprimento (**8,35** metros) para o Diâmetro Auger adequado para 30 minutos de torrefação.

Para este projeto, a eleição do tempo de torrefação (τ) de 30 minutos foi pré-determinado pelo fato de que a bibliográfica, normalmente, eleger este tempo de processamento por torrefação. No entanto, é de suma importância que se realize contínuos estudos para que o tempo ideal de processamento seja determinado, além disso, esse tempo pode variar conforme a tipologia de biomassa utilizada.

Como mencionado anteriormente, na seção 3.2.2, 19ª consideração, roscas com comprimento superior a 3,65 metros demandam de suportes, rolamentos e mancais, por isso, nesse reator dimensionado, estes suportes deverão ser previstos.

Figura 52 - (DUPLO) Demonstrativo eleição do Diâmetro Auger, RPM e Comprimento da Rosca



4.2.3 Comparativo de Carga entre Reator Simples e Duplo

Uma vez demonstrado como é realizado o processo de dimensionamento das roscas transportadores para um reator de torrefação simples ou duplo, com seus respectivos Comprimentos (L), Diâmetro Auger (D_{auger}), Diâmetro Interno (D_i), Velocidade de Transporte (Vel), RPM (ω), pode-se agora realizar um procedimento de investigação comparativo entre ambos os reatores.

Como descrito anteriormente, a partir da seleção da Carga Transportada (C_t e $C_{t,twin}$) (massa/tempo) da rosca transportadora, pode-se eleger o RPM desejado para o processo. No caso de selecionar a mesma Carga Transportada (C_t) de ambos os tipos de reator simples e duplo ($C_t = C_{t,twin}$) para a mesma rotação RPM e mesmo tempo de torrefação (τ) em ambos, algumas conclusões podem ser tiradas. Tendo os dados da Figura 46 e Figura 52 (ambos selecionados para a mesma carga transportada) pode-se construir a Tabela 14. Como pode-se analisar, o Volume Útil, (volume onde a biomassa sempre estará presente e será transportada com Grau de Preenchimento de 30%) é idêntico em ambos os casos. Há um erro de precisão devido a seleção visual do gráfico para seleção dos Diâmetros Auger e Comprimento do reator.

Tabela 14 - Comparativo Simples E Duplo (Variáveis)

Parâmetro	Variáveis	Reator	
		Simple/Singel	Duplo/Twin
Diâmetro Auger = Passo	$D_{auger} = P$ (cm)	31,75	27,75
Diâmetro Interno	D_i	8,16	7,13
Comprimento	L (m)	9,50	8,35
Carga Transportada	$C_t = C_{t,twin}$ (kg/hora)	200	200
Grau de Preenchimento	G_p	30%	30%
Fator de Volume Simples e Duplo		100%	150%
RPM de projeto	ω	1	1
Densidade Volumétrica	ρ (kg/m ³)	480	480
	Volume útil (cm ³) =	3521,6	3526,8

Com esses dados, pode-se então realizar uma análise das Cargas Transportadas (C_t e $C_{t,twin}$) de ambos os casos para diferentes RPM, ou seja, o único parâmetro a ser alterado agora é a RPM. Observando os resultados, na Tabela 15, conforme se varia a rotação RPM o tempo de residência para torrefação da biomassa (τ) em ambiente reacional se altera e a Carga Torrefada (saída do reator no tempo de torrefação) é sempre o mesmo.

A variação do RPM (depois da seleção de projeto) possibilita um controle do tempo da biomassa em ambiente reacional, respeitando as condições apresentadas na Tabela 14. A Carga Transportada (C_t) aumenta conforme é aumentado a rotação RPM (diminuindo o tempo de torrefação (τ)), no entanto, a carga de saída da biomassa torrefada é sempre a mesma naquele período de torrefação desejado, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Carga, RPM, Velocidade para Reatores Simples e Duplo

	C_t	$C_{t,twin}$	Velocidade e Tempo de Torrefação da Biomassa					Carga torrefada
			Ambos	Single		Twin		
				RPM	(cm/min)	min	(cm/min)	
Carga (ton/hora) =	101,5	101,7	0,5	15,9	59,8	13,9	60,2	101,99
Carga (ton/hora) =	121,8	122,0	0,6	19,1	49,9	16,7	50,2	101,99
Carga (ton/hora) =	142,1	142,4	0,7	22,2	42,7	19,4	43,0	101,99
Carga (ton/hora) =	162,5	162,7	0,8	25,4	37,4	22,2	37,6	101,99
Carga (ton/hora) =	182,8	183,0	0,9	28,6	33,2	25,0	33,4	101,99
Projeto (ton/hora) =	203,1	203,4	1	31,8	29,9	27,8	30,1	101,99
Carga (ton/hora) =	406,1	406,7	2	63,5	15,0	55,5	15,0	101,99
Carga (ton/hora) =	609,2	610,1	3	95,3	10,0	83,3	10,0	101,99
Carga (ton/hora) =	812,3	813,5	4	127,0	7,5	111,0	7,5	101,99
Carga (ton/hora) =	1015,4	1016,9	5	158,8	6,0	138,8	6,0	101,99
Carga (ton/hora) =	1218,4	1220,2	6	190,5	5,0	166,5	5,0	101,99
Carga (ton/hora) =	1421,5	1423,6	7	222,3	4,3	194,3	4,3	101,99
Carga (ton/hora) =	1624,6	1627,0	8	254,0	3,7	222,0	3,8	101,99
Carga (ton/hora) =	1827,6	1830,4	9	285,8	3,3	249,8	3,3	101,99
Carga (ton/hora) =	2030,7	2033,7	10	317,5	3,0	277,5	3,0	101,99

Capítulo 5 – Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros

Com relação à temperatura de torrefação e frente aos rendimentos em massa e de energia disponível, pode-se ponderar: as elevadas temperaturas ($>270^{\circ}\text{C}$) causam decaimento tanto do rendimento mássico, como de energia disponível (apesar de elevar o poder calorífico). Logo, quando pensamos em uso de torrefação para obtenção de produtos energéticos, temperaturas até e próximas (nunca superiores) a 270°C demonstram-se ideais, pelo bom rendimento mássico e manutenção da energia disponível, principalmente para as biomassas lenhosas (*wood*). Isso pode ser possivelmente explicado pelo início de considerável decomposição da celulose ($>270^{\circ}\text{C}$) onde o rendimento de torrefação decai. Em temperaturas inferiores a 270°C , os rendimentos das biomassa não-lenhosas (*Non-wood*) são sempre inferiores das lenhosas (*wood*), em temperaturas acima desta os rendimentos das lenhosas se aproximam da não-lenhosas.

Dada a temperatura eleita para o termoprocessamento, os rendimentos irão variar, com temperaturas mais elevadas a celulose inicia sua decomposição e por consequência o rendimento de biomassa torrefada irá diminuir. Por isso, deve-se primeiro eleger uma temperatura ideal para o processo diante dos produtos desejados: uso energético, tolerância ao transporte (hidrofobia e baixa biodegradação), produtos da condensação. Desta forma, é imprescindível ponderar a relação custo benefício do processo e do produto desejado. Apesar de maiores poderes caloríficos serem adquiridos em temperaturas de torrefação severa ($275\text{-}300^{\circ}\text{C}$), temperaturas menores podem trazer benefício consideráveis à biomassa com menor perda de rendimento.

Na dificuldade de encontrar uma metodologia básica para dimensionamento de roscas transportadoras para reatores tipo *Auger*, este trabalho propõe uma metodologia simplificada, além de um passo a passo para eleição dos parâmetros básicos de uma rosca transportador (simples ou dupla). Algumas conclusões podem ser anotadas para o dimensionamento de roscas transportadoras:

- 1^a) Para uma mesma Carga Transportada (C_t) (massa/tempo), mesmo RPM e mesmo tempo de processo (τ) o Diâmetro *Auger* (D_{auger}) e o Comprimento do Reator (L) da rosca dupla é inferior ao da rosca simples;
- 2^a) Para uma mesma Carga Transportada (C_t) (massa/tempo), mesmo RPM e mesmo tempo de processo (τ) a carga de saída para aquele tempo de torrefação é sempre a mesma;
- 3^a) O Diâmetro *Auger* (D_{auger}) da rosca Dupla é inferior, por isso a velocidade de transporte também será inferior, no entanto, quando ambos são operados no mesmo RPM o tempo de torrefação é o mesmo;
- 4^a) Uma condição de projeto importante é que a seleção do RPM de projeto para um determinado tempo de torrefação (τ), possa permitir, sem possíveis comprometimentos estruturais do reator (em rotações muito baixas, há relatos de superaquecimento do motor, isso deverá ser previsto), a redução do RPM para o aumento do tempo de torrefação (τ).

Como mencionado, na seção 3.2.2, 19^a consideração, roscas com comprimento superior a 3,65 metros demandam de suportes, rolamentos e mancais, por isso, nos reatores dimensionados neste trabalho, estes suportes deverão ser previstos. Esses suportes provocam descontinuidades ao longo do transporte de biomassas, o que pode ser um problema na homogeneidade do produto. Uma forma de superar isso, pode ser a alteração do projeto para que, ao invés de possuir um nível contínuo de roscas, ser projetado em desníveis, onde a biomassa cai, por gravidade, a uma subsequente rosca posterior, com comprimento inferior a 3,65.

Como demonstrado na Tabela 15, a seleção do RPM de projeto é essencial. Um bom projeto é aquele que prevê, tanto o aumento de capacidade, quanto a sua redução. Por isso, a determinação do RPM de projeto deve ser eleito com a possibilidade de ambas as situações (lembrando que baixíssimas rotações de motes provocam superaquecimento).

Como sugestão de trabalhos futuros, uma possibilidade de estudo é o entendimento da diferença de rendimentos tão grande entre biomassas lenhosas e não-lenhosas. Possivelmente há relação ao acesso/compactação/empacotamento biomassa (relacionadas à densidade do material). Além disso, os rendimentos devem estar relacionados aos tipos de cinzas, bem como quais elementos que mais influenciam no rendimento.

Temperaturas menores que 270°C parecem ser mais interessantes diante dos rendimentos, principalmente para biomassas lenhosas. No entanto, é de suma importância a investigação do tempo de torrefação necessário. Além disso, deve-se investigar que, para adquirir características como a hidrofobicidade, temperaturas inferiores e tempos de torrefação curtos já sejam suficientes para se preservar a biomassa, estendendo o tempo de estocagem.

Anexo I – Dados em Base Seca

Woody biomass - Biomassas Lenhosas																		
Biomassa	Temp(°C)	Minutos	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	MY (%p)	EY (%p)	Cinzas(%p)	MV (%p)	FC(%p)	Umidade (%)	O/C	H/C	HHV (MJ/kg)	Dens, E	Ref.
Banyan	Original		46,20	6,08	46,53	0,08				1,11	77,57	18,03				20,29		(CHEN, W. H. et al., 2011b)
	230	60	53,55	6,84	37,08	0,15												
	260	60	60,73	6,46	28,52	0,18												
	290	60	66,21	6,22	22,57	0,15												
Beech	Original		47,20	6,00	45,20	0,40				0,30	84,20	15,50				18,30		(COUHERT; SALVADOR; COMMANDRÉ, 2009)
	240	60	51,70	5,40	42,90	0,00				0,35	80,60	19,20						(CHEN, W. H. et al., 2011b)
	260	60	54,40	5,20	40,40	0,00				0,40	75,70	24,20						
Birch	Original		45,50	6,20	48,20	0,10										16,44		(PACH; ZANZI; BJÖRNBOM, 2002)
	250	60						85,50	97,93							18,83		
Cedarwood	Original		45,14	6,34	46,25	0,26	0,29			1,72	85,49	12,79				18,13		(MEI <i>et al.</i> , 2015)
	200	50	47,66	5,68	44,21	0,50	0,31			1,64	84,63	13,73				19,02		
	230	50	48,82	5,49	42,97	0,48	0,37			1,87	83,04	15,09				19,35		
	260	50	52,17	5,21	39,93	0,70	0,41			1,58	81,26	17,16				20,56		
	290	50	54,30	4,99	37,07	0,83	0,43			2,38	74,60	23,02				21,25		
	200	50	53,74	4,48	39,06	0,31	0,45			1,96	69,71	28,33				20,66		
	230	50	55,28	4,12	38,20	0,57	0,41			1,42	66,13	32,45				20,96		
	260	50	56,13	4,01	37,27	0,48	0,42			1,69	58,48	39,83				21,14		
	290	50	56,55	3,97	36,32	0,55	0,37			2,24	57,75	40,01				22,25		
	Eucalyptus grandis (bark)	220	60								4,80	65,70	29,50					
250		60								3,90	63,80	32,30						
280		60								4,10	53,00	42,90						
Eucalyptus grandis (wood)	220	60								0,20	77,50	22,30						
	250	60								0,30	71,40	28,30						
	280	60								0,20	67,50	32,30						
Eucalyptus saligna (bark)	220	60								3,60	73,60	22,70						
	250	60								4,60	65,60	29,70						
	280	60								6,50	57,90	35,60						
Eucalyptus saligna (wood)	220	60								0,20	77,10	22,70						
	250	60								0,30	72,50	27,20						
	280	60								0,10	67,10	32,80						

River tamarind (Leucaena)	Original		45,80	6,80	46,00	1,40	0,00			12,00	72,70	15,30		0,75	1,77	17,90	1,00	(MATALI et al., 2016)	
	200	60	50,80	8,20	40,77	0,30	0,00	92,00	93,90	20,70	65,70	13,60		0,60	1,94	18,30	1,02		
	225	60	52,20	6,00	40,10	1,70	0,00	88,90	91,90	31,10	56,80	12,20		0,58	1,39	18,50	1,03		
	250	60	51,20	5,80	41,78	1,20	0,01	46,70	82,40	1,90	76,60	21,50		0,61	1,35	19,30	1,08		
	275	60	54,60	5,80	38,40	1,20	0,00	68,80	83,30	21,90	57,10	21,00		0,53	1,28	21,70	1,21		
	300	60	62,60	5,50	30,40	1,50	0,00	43,20	60,10	31,50	37,80	30,70		0,36	1,06	24,90	1,39		
				50,10	7,40	41,80	0,70			0,80	86,10	13,10		0,63	1,77	20,30			(WANNAPEERA; FUNGTAMMASAN; WORASUWANNARAK, 2011)
	200	30	51,70	7,10	40,50	0,70		91,00	94,14	0,70	85,30	14,00		0,59	1,65	21,00			
	225	30	52,40	7,10	39,80	0,70		86,50	90,33	0,80	84,30	14,90		0,57	1,63	21,20			
	250	30	53,00	6,40	39,90	0,70		73,00	76,24	0,90	82,20	16,90		0,56	1,45	21,20			
275	30	57,20	5,50	36,50	0,80		54,50	61,21	1,30	73,80	24,90		0,48	1,15	22,80				
Pine	Original															18,70		(PENG et al., 2013a)	
	280	52					71,00	77,00								22,10	1,18		
	Original															19,50			(PENG et al., 2013b)
	280	52					70,00	80,00								24,60	1,26		
	225	30							0,27	84,78	14,95								(PHANPHANICH; MANI, 2011)
	250	30							0,25	82,52	17,24								
	275	30							0,35	76,40	23,26								
	300	30							0,43	58,72	40,85								
	Original		47,21	6,64	45,76	0,17			0,27	85,98	13,76			0,73	1,69	18,46	1,00		
	225	30	49,47	6,07	44,03	0,15	89,00	93,92	0,27	84,78	14,95			0,67	1,47	19,48	1,06		
250	30	51,46	5,86	42,02	0,14	82,00	89,20	0,25	82,52	17,24			0,61	1,37	20,08	1,09			
275	30	54,91	6,20	38,17	0,20	73,00	86,29	0,35	76,40	23,26			0,52	1,35	21,82	1,18			
300	30	63,67	5,58	29,99	0,20	52,00	71,49	0,43	58,72	40,85			0,35	1,05	25,38	1,37			
Pine wood chips	Original															18,46		(PACH; ZANZI; BJÖRNBOM, 2002)	
	225	30					89,00	94,00								19,48			
	250	30					82,00	90,00								20,08			
	275	30					73,00	87,00								21,82			
	300	30					52,00	71,00								25,38			
	Original															18,07			
230	60					92,40	96,51								18,51				
250	60					88,20	94,37								20,80				
280	60					78,10	93,90												
		60	49,70	5,90	44,30	0,06													
		60	50,90	5,80	43,20	0,06													
		60	56,40	5,50	38,00	0,06													
Stump	Original		47,40	6,50	46,00	0,10	0,03			0,40	86,70	12,90		0,73	1,64	19,50		*(WANG, L. et al., 2016)	
	225	30	49,20	6,20	44,50	0,10	0,02			0,70	84,60	14,70		0,68	1,51	19,80			
	225	60	50,60	6,10	43,20	0,10	0,02			0,70	82,10	17,20		0,64	1,45	20,20			
	275	30	52,00	6,00	41,90	0,10	0,02			0,60	75,20	24,20		0,60	1,39	20,50			
	275	60	53,20	6,00	40,70	0,10	0,01			0,70	73,30	26,60		0,57	1,35	20,80			
	300	30	60,20	5,90	33,80	0,10	0,01			0,80	65,70	33,70		0,42	1,17	22,70			
	300	60	63,30	5,80	30,90	0,10	0,01			1,10	55,70	43,20		0,37	1,09	23,50			

Non-woody biomass - Biomassas Não Lenhosas

Biomassa	Temp(°C)	Minutos	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	MY (%p)	EY (%p)	Cinzas(%p)	MV (%p)	FC(%p)	Umidade (%)	O/C	H/C	HHV (MJ/kg)	Dens, E	Ref.
Bamboo	Original		43,84	6,05	46,53	0,07				3,51	73,56	19,94				18,70		(CHEN, W. H. et al., 2011b)
	230	60	56,68	6,18	32,42	0,17												
	260	60	62,26	6,29	24,64	0,13												
	290	60	64,58	6,56	19,31	0,16												
Bamboo stem	Original									2,12	80,13	17,75		0,75	1,64	18,21		(ROUSSET et al., 2011)
	220	60						93,00	96,10	2,32	75,20	22,48		0,67	1,44	19,30		
	250	60						78,00	88,40	2,88	67,93	29,19		0,57	1,25	21,00		
	280	60						67,00	78,00	3,42	58,80	37,78		0,46	1,05	23,10		
Bagasse (sugarcane)	250	60								2,89	65,49	26,82						(PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010)
	270	60								2,91	60,03	32,97						
	300	60								4,12	40,44	51,63						
	Original		44,80	5,80	49,10	0,25				1,53	67,31					17,08		(PACH; ZANZI; BJÖRNBOM, 2002)
	230	60	48,60	5,60	45,50	0,25		87,50	96,42							18,08		
	250	60	50,60	5,60	43,50	0,30		78,90	92,03							18,73		
280	60	52,80	5,30	41,50	0,39		68,60	82,90							15,50			
Corncob	Original		44,30	6,40	44,40	0,40				4,90	85,70	9,40		0,75	1,73	18,70		(TIAN et al., 2020)
	210	30	47,80	6,30	40,20	0,40				5,80	81,00	13,20		0,63	1,57	20,10		
	240	30	54,20	6,00	32,70	0,50				7,20	81,30	11,50		0,45	1,34	22,80		
	270	30	65,10	5,20	18,80	0,70				10,80	57,20	32,00		0,22	0,96	26,90		
	300	30	68,40	5,00	14,40	0,80				12,20	50,00	37,80		0,16	0,75	28,10		
Corn stalk digest	Original		37,70	4,90	35,50	2,00	20,00			20,00	63,20	16,70		0,71	1,55	15,30	1,00	(ZHANG, D. et al., 2019)
	220	30	40,90	4,10	31,00	1,60	22,50	84,00	93,20	22,50	63,20	18,30		0,57	1,21	16,40	1,07	
	240	30	42,00	3,80	26,10	1,70	26,50	83,60	87,60	26,50	50,30	22,70		0,47	1,08	16,40	1,07	
	260	30	42,70	3,20	23,60	1,70	30,50	79,90	70,00	28,80	45,30	25,40		0,42	0,90	17,40	1,13	
	280	30	44,60	2,80	16,20	1,80	34,70	71,50	60,30	34,70	31,70	32,60		0,27	0,74	17,00	1,11	
	250	30	48,80	5,20	45,10	0,90	0,00							0,69	1,28	19,00		
	300	10	56,60	4,90	37,60	1,10	0,00							0,50	1,04	21,00		
	300	20	55,80	4,80	38,20	1,00	0,20							0,51	1,03	20,80		
	300	30	59,00	4,70	35,40		0,90							0,45	0,96	21,60		
Cotton stalk	Original		46,43	6,18	42,62	0,80				2,70	76,92	19,19						(WANG, G. J. et al., 2011)
	200	30								8,44	44,43	41,89						
	250	30								12,69	36,13	44,48						
	300	30								14,74	31,16	48,00						
	200	30						63,89	83,44							23,94		
	250	30						33,80	45,30							24,57		
	300	30						30,04	41,02							25,03		

Empty fruit bunches (oil palm)	220	60						43,16	43,54				17,17		(UEMURA et al., 2011)		
	250	60						36,98	38,39				17,67				
	300	60						24,18	29,00				20,41				
	Original		45,53	5,46	43,40	0,45							17,02				
	220	60	46,75	4,68	41,42	1,27											
	250	60	47,07	4,95	42,24	1,35											
	300	60	49,56	4,38	43,19	1,27											
Fountain grass (Pennisetum)	Original												17,00	1,00	(HUANG et al., 2012)		
	150	10						68,10	79,60				20,00	1,17			
	150	25						51,70	66,20				21,70	1,28			
	200	25						50,90	59,20				20,00	1,16			
	250	25						28,30	42,30				25,00	1,47			
	300	25						27,00	42,10				26,00	1,53			
	350	25						25,60	37,40				24,40	1,43			
Kernel shell (oil palm)	Original		46,68	5,86	42,01	1,01							18,85		(UEMURA et al., 2011)		
	220	60	45,87	6,31	43,07	0,40		77,44	73,80				19,07				
	250	60	51,89	5,71	38,50	0,47		73,83	71,18				21,68				
	300	60	54,21	5,08	36,66	0,50		71,27	78,12				19,78				
Lucerne	Original		47,70	2,70	43,10	6,50							18,42		(TITO FERRO et al., 2004)		
	230	60	48,70	3,20	41,80	6,30		87,00	88,28				18,69			(TITO FERRO et al., 2004)	
	250	60	50,70	3,20	40,40	5,70		81,60	83,06				18,75				
	280	60	54,10	3,60	37,00	5,30		71,60	77,31				19,89				
Mesocarp (oil palm)			46,92	5,89	42,66	1,12							19,61		(UEMURA et al., 2011)		
	220	60	46,93	5,50	43,30	1,83		63,08	61,21				19,03				
	250	60	47,70	5,20	40,18	1,74		60,04	58,91				19,24				
	300	60	48,60	4,87	40,03	2,14		52,45	59,30				22,17				
Oil palm frond	Original		41,80	5,50	51,40	1,40	0,00			25,60	79,40	20,60	0,92	1,58	17,70	1,00	(MATALI et al., 2016)
	200	60	42,80	6,10	49,40	1,70	0,00	95,00	99,90	15,70	79,20	20,80	0,87	1,71	18,60	1,05	
	225	60	47,30	5,80	45,50	1,40	0,00	87,00	100,00	38,90	75,70	24,30	0,72	1,46	20,30	1,15	
	250	60	48,00	4,80	45,10	2,00	0,00	75,00	89,10	29,10	70,90	29,10	0,70	1,21	21,00	1,19	
	275	60	51,60	3,90	42,10	2,50	0,00	63,00	81,20	16,40	60,70	39,30	0,61	0,91	22,80	1,29	
	300	60	56,70	3,80	36,80	2,70	0,00	50,00	71,20	30,00	46,40	53,60	0,49	0,80	25,20	1,42	
Peanut husk	250	60						81,00	72,50				16,40	1,02	(PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010)		
	270	60						85,20	67,00				18,60	1,14			
	300	60						72,30	55,80				19,00	1,16			
	250	60								24,48	50,86	20,05					
	270	60								26,84	45,47	23,81					
	300	60								33,77	38,82	23,86					

Rape stalk	Original		46,96	6,13	41,95	0,37			3,16	76,35	19,30			18,80	1,00	(DENG et al., 2009)	
	200	30					63,30	65,80						19,50	1,04		
	250	30					38,30	41,00						20,10	1,07		
	300	30					25,30	29,10						21,60	1,15		
Rice husk	250	60					77,50	86,00						15,90	1,11	(DENG et al., 2009)	
	270	60					74,30	83,30						16,10	1,12		
	300	60					58,30	71,60						17,60	1,23		
	Original		38,20	5,50	39,50	0,30	16,50	70,60	12,90		0,78	1,73	16,60			(ZHANG, S. et al., 2016)	
	250	30	42,60	5,00	35,90	0,30	16,20	69,00	14,80		0,63	1,41	17,40				
	280	30	44,20	4,80	33,30	0,40	17,30	65,50	17,20		0,57	1,30	18,20				
	310	30	46,90	4,60	28,60	0,40	19,50	59,00	21,50		0,46	1,18	18,60			(ZHANG, S. et al., 2015)	
	Original						15,30	69,70	15,00		0,75	1,55	16,24				
	220	30					92,50	94,20	16,00	68,20	15,80		0,65	1,34	16,72		
	250	30					82,00	87,20	17,20	64,30	18,50		0,59	1,21	17,27		
	280	30					71,40	77,30	18,70	55,50	25,80		0,51	1,11	17,57		
	Original													16,60	1,00		
	250	30					90,60	65,00						17,40	1,05		
	280	30					85,10	93,30						18,20	1,10		
310	30					78,50	88,10						18,60	1,12			
250	60							21,56	54,76	19,73					(PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010)		
270	60							24,57	49,99	21,75							
300	60							31,32	30,04	35,97							
Rice straw	Original													16,20	1,00	(HUANG et al., 2012)	
	150	10					71,40	78,00						17,70	1,09		
	150	25					54,70	64,60						19,10	1,18		
	200	25					49,10	59,20						19,50	1,21		
	250	25					34,90	42,90						20,00	1,23		
	300	25					34,20	44,30						21,00	1,30		
	350	25					43,50	43,50						20,00	1,23		
	200						59,84							17,16		(TUMULURU et al., 2011a)	
	250						40,32							18,03			
	300						36,57							18,68			
	Original		39,00	5,08	40,96	1,03			8,59	68,83	17,46			17,12		(DENG et al., 2009)	
	200	30					59,84	59,98						17,16			
	250	30					40,32	42,46						18,03			
	300	30					36,57	39,90						18,68			
Reed canary grass	Original		48,60	6,80	37,30	0,30			5,50	82,50	12,10	4,70	0,58	1,68	19,50	(BRIDGEMAN et al., 2008)	
	230	30	49,30	6,50	N/A	0,10	92,60	93,50				2,50	1,58				
	250	30	50,30	6,30	37,00	0,00	84,00	86,60	6,40	80,30	13,30	1,90	0,55	1,50	20,00		
	270	30	52,20	6,00	37,30	0,10	72,00	77,10	7,30	76,60	16,10	1,30	0,54	1,38	20,80		
	290	30	54,30	6,10	36,30	0,10	61,50	69,00	8,30	70,50	21,30	1,20	0,50	1,35	21,80		

Rape stalk	200						63,29					19,50		(TUMULURU <i>et al.</i> , 2011a)	
	250						38,26					20,10			
	300						25,30					21,59			
Rubber seed kernel			43,21	5,97	50,25	0,55								(HARUN; AFZAL; AZIZAN, 2010)	
Straw pellet	Original		47,50	0,63	45,50	6,40			4,60	80,80	19,20		17,80	(TITO FERRO <i>et al.</i> , 2004)	
	230	60	47,80	0,66	45,20	6,30		95,00	95,53						
	250	60	49,00	0,79	44,10	6,10		90,00	92,07						
	280	60	52,80	0,85	40,30	6,10		79,90	89,87						
Wheat straw	Original											17,50	1,00	(BAI <i>et al.</i> , 2018)	
	250	30					77,90	88,10				19,10	1,09		
	275	30					69,40	77,40				20,60	1,18		
	300	30					49,70	63,90				22,50	1,29		
	Original											18,20	1,00	(CHENG <i>et al.</i> , 2019)	
	200	360					82,60	92,60				18,40	1,01		
	225	360					74,60	97,70				20,70	1,14		
	250	360					61,20	77,10				20,80	1,14		
	200	720					76,30	90,80				19,60	1,08		
	225	720					73,70	95,60				21,00	1,15		
	250	720					55,60	76,70				22,70	1,24		
	Original											19,20	1,00	(WANG, G. J. <i>et al.</i> , 2011)	
	200	30					47,60	56,00				19,84	1,03		
	250	30					41,20	51,10				20,85	1,09		
	300	30					31,60	40,70				21,67	1,13		
	Original		44,00	5,80	48,90	0,90	0,40		3,50	77,00	19,50		0,83	1,57	(BAI <i>et al.</i> , 2018)
	250	30	48,40	5,20	45,00	0,90	0,50		10,00	66,10	23,90		0,70	1,30	
	275	30	52,30	5,20	41,00	1,10	0,50		9,70	65,40	25,00		0,59	1,19	
	300	30	56,90	5,00	36,20	1,30	0,50		12,70	44,20	43,10		0,48	1,06	
	Original		47,30	6,80	37,70	0,80			6,30	76,40	17,30	4,10	0,60	1,73	(BRIDGEMAN <i>et al.</i> , 2008)
	230	30	48,70	6,30		0,70		91,00	93,50			1,50	1,55	19,40	
	250	30	49,60	6,10	35,60	0,90		82,60	86,20	7,40	77,00	15,60	0,90	0,54	1,48
	270	30	51,90	5,90	33,20	0,80		71,50	78,20	8,40	65,20	26,50	0,30	0,48	1,36
	290	30	56,40	5,60	27,60	1,00		55,10	65,80	10,20	51,80	38,00	0,80	0,37	1,19
Water hyacinth	250	60							58,98	31,33	5,84			(PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010)	
	270	60							51,19	32,15	13,09				
	300	60							58,50	24,82	13,86				

Referências

- ACHARJEE, Tapas Chandra; CORONELLA, Dr. Charles J. Thermal pretreatment options for lignocellulosic biomass. **Chemical Engineering**, [s. l.], v. Master of, p. 128, 2010. Disponível em: <http://proquest.umi.com.ezproxy.lib.monash.edu.au/pqdweb?SrchMode=2&sid=1&firstIndex=0&RQT=511&TS=1307934525&clientId=16397>
- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 101, n. 24, p. 9778–9784, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.026>
- ANSI/CEMA standard no. 350. **Screw Conveyors for Bulk Materials**. 5th edition 2019. Disponível em: <https://cemanet.org/wp-content/uploads/2019/06/ANSI-CEMA-350-FinalReview.pdf>
- ARAMIDEH, Soroush *et al.* Numerical simulation of biomass fast pyrolysis in an auger reactor. **Fuel**, [s. l.], v. 156, p. 234–242, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.038>
- ARIAS, B. *et al.* Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.09.002>
- BABLER, Matthaus U. *et al.* Modeling and pilot plant runs of slow biomass pyrolysis in a rotary kiln. **Applied Energy**, [s. l.], v. 207, p. 123–133, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.034>
- BACH, Quang Vu; SKREIBERG, Oyvind. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 54, p. 665–677, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>
- BAI, Xiaopeng *et al.* Effects of combined pretreatment with rod-milled and torrefaction on physicochemical and fuel characteristics of wheat straw. **Bioresource Technology**,

- [s. l.], v. 267, p. 38–45, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.022>
- BASU, Prabir. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- BATES, Richard B.; GHONIEM, Ahmed F. Biomass torrefaction: Modeling of volatile and solid product evolution kinetics. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 124, p. 460–469, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.018>
- BERGMAN, Patrick CA; KIEL, Jacob HA. Torrefaction for biomass upgrading. In: **Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France**. sn, 2005. p. 17-21.
- BERGMAN, P C a *et al.* Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. **Energy research Centre of the Netherlands ECN ECNC05013**, [s. l.], n. July, p. 71, 2005. Disponível em:
<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--05-013>
- BRASSARD, Patrick. Biochar production in an auger pyrolysis reactor and its amendment to soil as a tool to mitigate climate change. [s. l.], n. December, 2017.
- BRASSARD, Patrick; GODBOUT, Stéphane; RAGHAVAN, Vijaya. Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 161, p. 80–92, 2017. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020>
- BRIDGEMAN, T. G. *et al.* Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**, [s. l.], v. 87, n. 6, p. 844–856, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041>
- BRIDGWATER, Tony. Challenges and opportunities in fast pyrolysis of biomass: Part II. **Johnson Matthey Technology Review**, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 150–160, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1595/205651318X696738>
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 38, p. 68–94, 2012. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- BRIDGEWATER AV. Thermal conversion of biomass and waste: the status. Birmingham (UK): **Bio-Energy Research Group**, Aston University; 2001
- BROSTRÖM, M. *et al.* Influence of torrefaction on the devolatilization and oxidation kinetics of wood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 96, p. 100–109, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.011>
- BROWN, Jared Nathaniel. Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology by. [s. l.], 2009.
- BOURGOIS, Jacques; BARTHOLIN, Marie-Claude; GUYONNET, René. Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. **Wood Science and Technology**, v. 23, n. 4, p. 303-310, 1989.

- BURTON, R.A. et al. (2010) Heterogeneity in the chemistry, structure and function of plant cell walls. *Nat. Chem. Biol.* 6, 724–732
- BORTOLAMASI M, Fottner J. Design and sizing of screw feeders. In: Proceedings of the Int. Congr. Part. Technol. Nuremberg, Germany; 2001, p. 27–9.
- CAMPUZANO, Felipe; BROWN, Robert C.; MARTÍNEZ, Juan Daniel. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 102, n. December 2018, p. 372–409, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>
- CAO, Liang *et al.* Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 185, p. 254–262, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.045>
- CARDONA, Sandra *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*, [s. l.], v. 31, n. February 2018, p. 17–24, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.11.002>
- CARSON, John W.; PETRO, Greg. How to design efficient and reliable feeders for bulk solids. *Jenike & Johanson Incorporated*, [s. l.], n. 978, p. 16, 2005.
- CHANG, Sheng *et al.* Characterization of products from torrefaction of sprucewood and bagasse in an auger reactor. *Energy and Fuels*, [s. l.], v. 26, n. 11, p. 7009–7017, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef301048a>
- CHEN, Dengyu *et al.* Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. *Fuel*, [s. l.], v. 275, n. March, p. 117936, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117936>
- CHEN, Qing *et al.* Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification technology. *Chinese Science Bulletin*, [s. l.], v. 56, n. 14, p. 1449–1456, 2011a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4292-z>
- CHEN, Wei Hsin *et al.* An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. *Applied Energy*, [s. l.], v. 88, n. 11, p. 3636–3644, 2011b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.040>
- CHEN, Wei Hsin *et al.* Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, [s. l.], v. 82, p. 100887, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100887>
- CHEN, Wei Hsin *et al.* Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 3012–3021, 2011c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.045>
- CHEN, Wei Hsin; KUO, Po Chih. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. *Energy*, [s. l.], v. 36, n. 11, p. 6451–6460, 2011a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.022>
- CHEN, Wei Hsin; KUO, Po Chih. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 803–811, 2011b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.036>

- CHEN, Wei Hsin; PENG, Jianghong; BI, Xiaotao T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 44, p. 847–866, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- CHENG, Xingxing *et al.* A novel on-site wheat straw pretreatment method: Enclosed torrefaction. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 281, n. February, p. 48–55, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.075>
- CHEN, Wei-Hsin; KUO, Po-Chih. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. **Energy**, v. 36, n. 11, p. 6451-6460, 2011.
- CHEW, J. J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.017>
- CHONGCHITPAISAN, Pornchai; SUDSAWAT, Supattarachai. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications. [s. l.], 2022.
- CONVEYOR ENG. & MFG. CO. **Screw Conveyor components & design - Version 2.20** (2012). Disponível em: <https://www.conveyoreng.com/>.
- COUHERT, C.; SALVADOR, S.; COMMANDRÉ, J. M. Impact of torrefaction on syngas production from wood. **Fuel**, [s. l.], v. 88, n. 11, p. 2286–2290, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.003>
- DAI, Jianjun; CUI, Heping; GRACE, John R. Biomass feeding for thermochemical reactors. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 716–736, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.002>
- DAI, Jianjun; GRACE, John R. A model for biomass screw feeding. **Powder Technology**, [s. l.], v. 186, n. 1, p. 40–55, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.032>
- DAI, Jianjun; GRACE, John R. Biomass granular screw feeding: An experimental investigation. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 942–955, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.026>
- DAI, Leilei *et al.* Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 107, n. January, p. 20–36, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.015>
- DAI, Leilei *et al.* Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 107, n. October 2018, p. 20–36, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.015>
- DENG, Jian *et al.* Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 86, n. 2, p. 331–337, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.08.006>

- DHYANI, Vaibhav; BHASKAR, Thallada. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 129, p. 695–716, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- DUNNING, Timothy C. **Determining Design Criteria for Feeding Biomass into a Fluidized Bed using a Feed Screw**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2020.
- FAKULT, Der Technischen; ERLANGUNG, Zur. Experimental Study of Thermo-Catalytic Reforming of Biogenic Waste Streams and their Simulation from Lab to Pilot Scale
Experimentelle Untersuchung der thermo- katalytischen Reformierung von biogenen Abfallströmen und deren Simulation vom Labor- bis zum P. [s. l.],
- FELFLI, Felix Fonseca *et al.* Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 19–22, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60519-0](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60519-0)
- FERNANDEZ, Justin W.; CLEARY, Paul W.; MCBRIDE, William. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 66, n. 22, p. 5585–5601, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.043>
- FONTES, Lucio Angelo de Oliveira. DESENVOLVIMENTO DE UMA UNIDADE PIROLÍTICA COM REATOR DE CILINDRO ROTATIVO: Obtenção de Bio-óleo. **Tese Doutorado**, [s. l.], p. 123, 2011.
- FRANCISCO, R. P.; Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia. **Dissertação de Mestrado Pós-graduação em Engenharia da Energia**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI. São João del Rei, 2012
- FITZPATRICK JJ, BARRINGER SA, IQBAL T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. **Journal of Food Engineering** 2004;61:399e405.
- FUNKE, A. *et al.* Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, [s. l.], v. 130, n. February, p. 67–75, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.05.023>
- FUNKE, Axel *et al.* Dimensional Analysis of Auger-Type Fast Pyrolysis Reactors. **Energy Technology**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 119–129, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ente.201600095>
- GARCIA-NUNEZ, J. A. *et al.* **Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review**. [S. l.: s. n.], 2017. ISSN 15205029.v. 31 Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>
- GRUDULS, Kristaps *et al.* Characteristics of wood chips from logging residues and quality influencing factors. **Research for Rural Development**, v. 2, p. 49-54, 2013.
- GUEDES, Raquel Escrivani; LUNA, Aderval S.; TORRES, Alexandre Rodrigues. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 129, p. 134-149, 2018.
- GUIMARÃES, Henrique Real; TANNOUS, Katia. Influence of torrefaction on the pyrolysis of energy cane: A study on thermal properties and decomposition kinetics. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 139, n. 3, p. 2221–2233, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08584-z>

- GEITMANN, A. (2010) Mechanical modeling and structural analysis of the primary plant cell wall. **Curr. Opin. Plant Biol.** 13, 693–699
- HARUN, Noorfidza Yub; AFZAL, M T; AZIZAN, Mohd Tazli. TGA Analysis of Rubber Seed Kernel. **International Journal of Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 639–652, 2010. Disponível em: <http://www.cscjournals.org/csc/manuscript/Journals/IJE/volume3/Issue6/IJE-100.pdf>
- HORNUNG, A. **Intermediate pyrolysis of biomass**. [S. l.]: Woodhead Publishing Limited, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857097439.2.172>
- HORNUNG, A.; APFELBACHER, A.; SAGI, S. Intermediate pyrolysis: A sustainable biomass-to-energy concept-biothermal valorisation of biomass (BtVB) process. **Journal of Scientific and Industrial Research**, [s. l.], v. 70, n. 8, p. 664–667, 2011.
- HORNUNG, Andreas; STENZEL, Fabian. Biochar - just a black matter is not enough! **Biochar II: Production, Characterization and Applications**, [s. l.], 2019.
- HUANG, Y. F. *et al.* Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 123, p. 1–7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.006>
- HUBER, George W.; IBORRA, Sara; CORMA, Avelino. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical reviews*, v. 106, n. 9, p. 4044-4098, 2006.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2014). **2014 Key World Energy Statistics**. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>
- JALALIFAR, Salman *et al.* CFD analysis of fast pyrolysis process in a pilot-scale auger reactor. **Fuel**, [s. l.], v. 273, n. March, p. 117782, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117782>
- JENIKE AW. Storage and flow of solids, bulletin 123. Engineering Experiment Station, Utah University; 1964.
- JOSHI, Yash; DI MARCELLO, Manuela; DE JONG, Wiebren. Torrefaction: Mechanistic study of constituent transformations in herbaceous biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 115, p. 353–361, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.08.014>
- KANTARELIS, Efthymios. **Catalytic Steam Pyrolysis of Biomass for Production of Liquid Feedstock**. [S. l.: s. n.], 2014.
- KAZAWADI, Deodatus; NTALIKWA, Justin; KOMBE, Godlisten. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar. **Journal of Renewable Energy**, [s. l.], v. 2021, p. 1–10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
- KOCHER, M. F.; JONES, D. D. Auger design for uniform unloading of granular material. II. Cylindrical containers. **Transactions of the American Society of Agricultural**

- Engineers**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 1163–1166, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.27935>
- KWS. *Screw_conveyors_pipe.pdf*. [s. l.], p. 13, 2015. Disponível em: <https://www.kwsmfg.com/wp-content/themes/va/pdf/Screw-Conveyor-Engineering-Guide.pdf>
- M. BORTOLAMASI AND J. FOTTNER. Design and sizing of screw feeders. **International Congress for Particle Technology**, [s. l.], n. January 2001, p. 27–29, 2001.
- MAMVURA, T. A.; DANHA, G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. **Heliyon**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. e03531, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>
- MATALI, S. *et al.* Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 148, p. 671–678, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.550>
- MEI, Yanyang *et al.* Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 177, p. 355–360, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.113>
- MEI, Yanyang *et al.* Torrefaction of different parts from a corn stalk and its effect on the characterization of products. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 92, p. 26–33, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.021>
- MEI, Yanyang *et al.* Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. **Bioresource technology**, v. 177, p. 355–360, 2015.
- MINGLANI, Dheeraj *et al.* A review of granular flow in screw feeders and conveyors. **Powder Technology**, [s. l.], v. 366, p. 369–381, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066>
- MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de; NASCIMENTO, Evandro Afonso do; MELO, Dárley Carrijo de. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 461–470, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622005000300014>
- MORGANO, Marco Tomasi. Screw Pyrolysis of Biogenic Feedstock with Integrated Hot Gas Filtration. [s. l.], 2019.
- MOSIER, Nathan *et al.* Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. [s. l.], v. 96, n. 2005, p. 673–686, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 4ª ed., 2002.
- NIESSEN, W. R. **Combustion and Incineration Processes**. Terceira Edição, Revisada e Expandida, 2002
- NHUCHHEN, Daya; BASU, Prabir; ACHARYA, Bishnu. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, [s. l.], p. 1–56, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5171/2014.506376>
- NORDIN, Anders; POMMER, Linda; NORDWAEGER, Martin; OLOFSSON, Ingemar. Biomass conversion through torrefaction. Erik Dahlquist **Technologies for converting biomass to useful energy – combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation**. by Taylor & Francis Group, LLC. 2013. P. 217–244.

- NACHENIUS, R. W., RONSSE, F., VENDERBOSCH, R. H., and PRINS, W. (2013). "Biomass Pyrolysis," in **Chemical Engineering for Renewables Conversion**. Editor D. Y. Murzin (Waltham, MA, USA: Academic Press),
- ONG, Hwai Chyuan *et al.* Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 152, n. March, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111698>
- PACH, M.; ZANZI, R.; BJÖRNBOM, E. Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal. **6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization**, [s. l.], n. May, p. 6, 2002.
- PACHÓN-MORALES, John *et al.* Flowability of lignocellulosic biomass powders: Influence of torrefaction intensity. **EPJ Web of Conferences**, [s. l.], v. 140, p. 0–3, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714013017>
- PENG, J. H. *et al.* Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. **Energy and Fuels**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 967–974, 2013a. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef301928q>
- PENG, J. H. *et al.* Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, [s. l.], v. 111, p. 411–421, 2013b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.048>
- PEREIRA, Matheus Perdigão De Castro Freitas *et al.* Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 36, n. 87, p. 269, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.87.1093>
- PERSSON, Henry; PERSSON, Henry. **Conversion of Biomass to Renewable Liquid Feedstocks in Pyrolysis-based Applications i**. [S. l.: s. n.], 2019.
- PHANPHANICH, Manunya; MANI, Sudhagar. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 1246–1253, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- PIERSA, Piotr *et al.* Review An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Torrefaction Reactors vs. Biomass Pyrolysis—Part 1. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15062227>
- PIMCHUAI, Anuphon; DUTTA, Animesh; BASU, Prabir. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy and Fuels**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 4638–4645, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef901168f>
- PRAT, R., 2012. Constitution chimique du bois [WWW Document]. **Univ. Pierre Marie Curie**. URL http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/bois/bois_chimie.htm (accessed 9.1.16).
- QI, Fenglei; WRIGHT, Mark Mba. A DEM modeling of biomass fast pyrolysis in a double auger reactor. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 150, p. 119308, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119308>

- QI, Fenglei; WRIGHT, Mark Mba. A DEM modeling of biomass fast pyrolysis in a double auger reactor. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 150, p. 119308, 2020.
- ROBERTS, A. W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors. **Powder Technology**, [s. l.], v. 104, n. 1, p. 56–67, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00039-X)
- ROEGIERS, Jelle; PIETERS, Jan; RONSSE, Frederik. Heat and mass transfer modelling of auger reactors. **Submitted in 2016**, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002275059>
- ROUSSET, Patrick *et al.* Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 102, n. 17, p. 8225–8231, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.093>
- RUDOLFSSON, Magnus *et al.* Combined effects of torrefaction and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass. **Applied Energy**, [s. l.], v. 191, p. 414–424, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.035>
- ROBERTS, A.W., MANJUNATH, K. S., Volumetric and torque characteristics of screw feeders. In: Proceedings of the Powder and Bulk Solids Conference, Rosemont, USA, pp. 1994. 189–208.
- ROBERTS, A. W.; MANJUNATH, K. S.; MCBRIDE, W. The mechanics of screw feeder performance for bulk solids flow control. In: **4th International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation: 7th International Symposium on Freight Pipelines; Preprints of Papers: 7th International Symposium on Freight Pipelines; Preprints of Papers**. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1992. p. 333-338.
- RONSSE, F. Commercial biochar production and its certification. **Interreg IVB Proj. Biochar Clim. Sav. soils, Groningen, Netherlands. Available at: http://archive.northsearegion.eu/files/repository/20140811101209_02_FrederikRonsse-Commercialbiocharproductionanditscertification.pdf (Accessed July 10, 2020)**, 2013.
- SANTOS, Hortencia Noronha dos *et al.* Revestimento Para Roscas Helicoidais Agrícolas a Base De Crc Depositado Via Hvf Posteriormente Irradiadas Com Laser De Nd Yag E De Co2. [s. l.], p. 1273–1283, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/1516-392x-31621>
- SARKER, Tumpa R. *et al.* A Review of Torrefaction Technology for Upgrading Lignocellulosic Biomass to Solid Biofuels. **Bioenergy Research**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 645–669, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2>
- SCHEIBEL, Matheus. Avaliação E Dimensionamento De Um Sistema De Transporte Pneumático Em Uma Indústria De Leite Em Pó. [s. l.], 2018.
- SCHULZE, D. Flow properties of powders and bulk solids (fundamentals). **Powder Technology**, [s. l.], v. 65, n. 1–3, p. 321–333, 2010.
- SILVA, Miguel Simões da. Torrefação de cavacos de eucalipto em reator de fluxo semi-contínuo. **Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Viçosa**, Universidade Federal de Viçosa. (2016)

- SOMERVILLE, C. et al. (2004) Toward a systems approach to understanding plant cell walls. **Science** 306, 2206–2211
- SOUZA, M. H.; CORADIN V. T. R. . Esclarecimento técnico sobre a tradução de termos em inglês para o português. **ROMADE**, 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1193>. Acesso em: 20/12/2022.
- TIAN, Xiaojie *et al.* Influence of torrefaction pretreatment on corncobs: A study on fundamental characteristics, thermal behavior, and kinetic. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 297, p. 122490, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122490>
- TITO FERRO, D. *et al.* Torrefaction of agricultural and forest residues. **Cubasolar** 2004, [s. l.], n. October, p. 1–8, 2004. Disponível em: [http://www.techtp.com/recentpapers/Torrefaction of Ag & Forestry Residues.pdf](http://www.techtp.com/recentpapers/Torrefaction%20of%20Ag%20&%20Forestry%20Residues.pdf)
- TOMASI MORGANO, Marco *et al.* Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment. **Waste Management**, [s. l.], v. 73, p. 487–495, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.049>
- TRUBETSKAYA, A. Fast pyrolysis of biomass at high temperatures. **DTU Library**, [s. l.], p. 209, 2016.
- TUMULURU, Jaya Shankar *et al.* A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 384–401, 2011a. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ind.2011.7.384>
- TUMULURU, Jaya Shankar *et al.* applications. [s. l.], n. october, 2011b. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>
- TUMULURU, Jaya Shankar; SOKHANSANJ, Shahab; WRIGHT, Christopher T.; KREMER, Timothy. GC Analysis of Volatiles and Other Products from Biomass Torrefaction Process. MOHD, Mustafa Ali. **Advanced Gas Chromatography – Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications**. InTech. 2012. P. 211-234.
- TUMULURU, Jaya Shankar *et al.* Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. **Frontiers in Energy Research**, [s. l.], v. 9, n. September, p. 1–20, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- UEMURA, Yoshimitsu *et al.* Torrefaction of oil palm wastes. **Fuel**, [s. l.], v. 90, n. 8, p. 2585–2591, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.021>
- ULLAL, Ankith. Digital Commons @ Michigan Tech HEAT TRANSFER ANALYSIS IN A PADDLE REACTOR FOR. [s. l.], 2017.
- VAN DER STELT, M. J.C. *et al.* Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- VERCLYTE, Alexander; PIETERS, Jan; RONSSE, Frederik. Modelling heat and mass transfer in screw reactors. [s. l.], p. 66, 2013. Disponível em: <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002063502>

- VERSION, Document; WILDT, De. **University of Groningen Biomass pyrolysis for chemicals de Wildt, Paulus**. [S. l.: s. n.], 2011.
- VERMA, M., S; GODBOUT, S.K.; BRAR, O. SOLOMATNIKOVA, S.P. LEMAY; J.P. Larouche. 2012. Biofuel production from biomass by thermochemical conversion technologies. **International journal of chemical engineering**. Article 542426. 18 pages.
- WANG, Congwei *et al.* Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 127, p. 318–325, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.092>
- WANG, Gui Jun *et al.* Pretreatment of biomass by torrefaction. **Chinese Science Bulletin**, [s. l.], v. 56, n. 14, p. 1442–1448, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11434-010-4143-y>
- WANNAPEERA, Janewit; FUNGTAMMASAN, Bundit; WORASUWANNARAK, Nakorn. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 99–105, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.010>
- WIGLEY, Tansy. Improving the quality of bio-oil by fast pyrolysis of acid leached and torrefied Pinus radiata A thesis submitted in full fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering at the University of Canter. [s. l.], 2015.
- XD, Tag X; XD, D X; XD, D X. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism : A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 62, p. 33–86, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
- YILDIZ, Güray *et al.* **Catalytic fast pyrolysis of biomass**. [S. l.: s. n.], 2012. ISSN 13791176.v. 77
- YU, Yongqin. Theoretical modelling and experimental investigation of the performance of screw feeders. [s. l.], p. 254, 1997. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/1601>
- ZENG, Kuo. Solar pyrolysis of biomass at laboratory scale To cite this version : Solar pyrolysis of biomass at laboratory scale. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01359552/document>
- ZHANG, Deli *et al.* Effect of pretreatment on chemical characteristic and thermal degradation behavior of corn stalk digestate: Comparison of dry and wet torrefaction. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 275, p. 239–246, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.044>
- ZHANG, Linghong; CHARLES, Chunbao; CHAMPAGNE, Pascale. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 969–982, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>
- ZHANG, Shuping *et al.* Effects of water washing and torrefaction on the pyrolysis behavior and kinetics of rice husk through TGA and Py-GC/MS. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 199, p. 352–361, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.110>

- ZHANG, Shuping *et al.* Effects of water washing and torrefaction pretreatments on rice husk pyrolysis by microwave heating. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 193, p. 442–448, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.142>
- ZHAO, Yuanyuan *et al.* Advances in Imaging Plant Cell Walls. **Trends in Plant Science**, [s. l.], p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.05.009>
- ZINLA, Désiré *et al.* Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Côte d'Ivoire. **Fuel**, [s. l.], v. 283, n. September 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119250>

