

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIA – CAV**  
**MESTRADO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**ARITON ARALDI**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA  
VISANDO À GERAÇÃO DE ENERGIA**

**LAGES - SC**  
**2022**

**ARITON ARALDI**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA  
VISANDO À GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof.Dr<sup>a</sup>.: Martha Andreia Brand

Co-orientador: Prof.Dr. Matheus Fontanelle Pereira

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Araldi, Ariton

Desenvolvimento de protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia. / Ariton Araldi. -- 2022.  
95 p.

Orientadora: Martha Andreia Brand

Coorientador: Matheus Fontanelle Pereira

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2022.

1. Torrefação. 2. Protótipo. 3. Biocombustíveis sólidos. 4. Poder calorífico. 5. Biomassa. I. Brand, Martha Andreia. II. Pereira, Matheus Fontanelle. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

**ARITON ARALDI**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA  
VISANDO À GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora**

**Orientadora:**

---

Prof. Dr<sup>a</sup>.Martha Andreia Brand  
Universidade do Estado de Santa Catarina

**Membros:**

---

Prof. Dr. Rafael Santiago Floriani Pereira  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio  
Universidade Federal Rural da Amazônia

Lages, 25 de fevereiro de 2022

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por me dar o sopro da vida.

A Maria Santíssima Rainha do céu e da terra.

A minha família pelo incondicional apoio, especialmente a minha mãe (*in memorin*).

A minha esposa querida Kariana Ribeiro que de longe foi a maior incentivadora desse projeto,

sendo o esteio de todas minhas necessidades.

As minhas filhas, Lara e Lívia mais que especiais que são a inspiração de minhas conquistas.

Aos meus pais, irmãs, que com muito carinho e compreensão, não mediram esforços para que

eu concluísse esta etapa da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora prof Dr. Martha Andreia Brant pela orientação e ensinamentos, paciência, estímulo e confiança no desenvolvimento deste trabalho, obrigado pela inspiração!

Ao meu co-orientador prof Dr. Matheus Pereira Fonthanele pela orientação e ensinamentos, paciência, estímulo e confiança no desenvolvimento deste trabalho, obrigado pela inspiração!

A minha banca orientadora Prof. Dr. Rafael Santiago Floriani Pereira, Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio, pelas contribuições, sensibilidade e disponibilidade. Obrigado!

A todos os professores do Programa de Mestrado de Engenharia Florestal da UDESC-Lages, pelos ensinamentos e dedicação no exercício de suas profissões. Obrigado!

Ao Engenheiro Mecânico Lucas Savi Mondo pela sua contribuição técnica, disponibilidade e companheirismo. Obrigado!

A UDESC *Campus* Lages pela oportunidade de usufruir da infraestrutura de laboratórios. Obrigado!

Ao IFSC *Campus* Lages pela fundamental importância no desenvolvimento desta pesquisa, disponibilizando toda a estrutura com as condições técnicas para sua execução.

A UNIPLAC *Campus* Lages pela oportunidade de usufruir da infraestrutura de laboratórios. Obrigado!

## RESUMO

A matriz energética mundial tem sua maior parte constituída por combustíveis fósseis. Já a biomassa, apesar de abundante, representa apenas 9,3% desta matriz mundial. Muito disso porque, *in natura*, a biomassa tem uma densidade energética relativamente baixa quando comparada a um combustível fóssil a unidade favorece sua biodegradabilidade, além de ter um poder calorífico baixo. Porém, uma solução para melhorar essas características é o processo de torrefação. A torrefação é um processo de pirólise parcial da biomassa, que é realizada na faixa de temperatura de 200 - 300°C, em ambiente com controle de oxigênio. A finalidade da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, com taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo a degradação de alguns carboidratos e, conseqüentemente, volatilização de compostos. Esta dissertação teve como objetivo desenvolver um protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia. Para tanto, o trabalho foi dividido em dois Capítulos. O capítulo I teve como objetivo o planejamento do projeto, o desenvolvimento, a fabricação e a análise da eficiência do protótipo de torrefação de biomassa. A metodologia para o desenvolvimento mecânico do equipamento utilizou as macrofases do PDP (Processo desenvolvimento de produto) como modelo de referência de Rozenfeld *et al.* (2006). O protótipo fabricado foi submetido a teste de funcionamento em módulos separadamente: módulo de ventilação, módulo queimador e módulo de torrefação. O protótipo fabricado teve como configurações: sistema de funcionamento por batelada; câmara de torrefação por tamboreamento; capacidade de carregamento de 3Kg; acionamento da câmara de torrefação com motor elétrico de 1CV e redutor 40:1; queimador a gás GLP como fonte de energia; válvula de regulagem manual de gás; medição de temperatura com dois termopares cerâmicos tipo K; medidor digital de temperatura; ventilador elétrico de 245W; controle e acionamento do ventilador por inversor de frequência CFW100; alimentação manual por escotilhas; controle de tempo e temperatura operado manualmente. Os pontos positivos do projeto foram: a fabricação realizada em módulos separados e sua mobilidade. Os pontos negativos do protótipo foram: operação de controle de temperatura e tempo manual, aquisição de dados manual e queimador a gás GLP. O desempenho eletromecânico testado do protótipo teve suas funcionalidades comprovadas. O capítulo II teve como objetivo foi avaliar a qualidade da biomassa torrefada no protótipo, por meio da caracterização física e energética da biomassa, quando submetida a diferentes temperaturas de torrefação. Pellets de *Pinus* foram torrefados no protótipo fabricado anteriormente, em temperaturas de 220 e 280°C, com tempo de residência de 20 minutos, em condições de ar atmosférico. As propriedades físicas e energéticas dos pellets foram avaliadas

antes e após a torrefação. O processo de torrefação tornou as dimensões dos pellets mais homogêneas; aumentou a hidrofobicidade e alterou a composição química imediata dos pellets. Porém, não alterou o poder calorífico e reduziu a densidade energética dos biocombustíveis sólidos, principalmente por sua influência nas dimensões dos pellets. Além disso, este tratamento térmico afetou o comportamento da degradação térmica dos pellets, tanto em termos de temperatura, massa remanescente em cada etapa da perda de massa e, também, nas temperaturas de maior velocidade de perda de massa. De forma geral, as propriedades físicas dos pellets e o comportamento térmico de degradação foram afetados de forma mais intensa que o potencial energético deste biocombustível demonstrando uma boa combustibilidade.

**Palavras – chave:** Torrefador; biomassa; poder calorífico; biocombustíveis sólidos.



## ABSTRACT

The world's energy matrix is mostly made up of fossil fuels. Biomass, despite being abundant, represents only 9.3% of this world matrix. Much of this is because, in natura, biomass has a relatively low energy density when compared to a fossil fuel, moisture favors its biodegradability, in addition to having a low calorific value. However, a solution to improve these characteristics is the roasting process. Torrefaction is a process of partial pyrolysis of biomass, which is carried out in the temperature range of 200 - 300°C, in an environment with oxygen control. The purpose of torrefaction is to concentrate the energy of the biomass in a product formed in a short time, with heating rates and moderate temperatures, allowing the degradation of some carbohydrates and, consequently, the volatilization of compounds. This dissertation aimed to develop a prototype for biomass torrefaction aiming at energy generation. Therefore, the work was divided into two Chapters. Chapter I aimed to plan the project, develop, manufacture and analyze the efficiency of the biomass torrefaction prototype. The methodology for the mechanical development of the equipment used the macrophases of the PDP (Product Development Process) as a reference model by Rozenfeld et al. (2006). The prototype manufactured was submitted to a functioning test in separate modules: ventilation module, burner module and roasting module. The prototype manufactured had the following configurations: batch operating system; tumbling roasting chamber; loading capacity of 3Kg; roasting chamber drive with 1CV electric motor and 40:1 reducer; LPG gas burner as energy source; manual gas regulation valve; temperature measurement with two type K ceramic thermocouples; digital temperature gauge; 245W electric fan; fan control and drive by CFW100 frequency inverter; manual feeding through hatches; manually operated time and temperature control. The positive points of the project were: the manufacturing carried out in separate modules and its mobility. The negative points of the prototype were: manual temperature and time control operation, manual data acquisition and LPG gas burner. The tested electromechanical performance of the prototype had its functionality proven. Chapter II aimed to evaluate the quality of the torrefied biomass in the prototype, through the physical and energetic characterization of the biomass, when submitted to different torrefaction temperatures. Pine pellets were roasted in the previously manufactured prototype, at temperatures of 220 and 280°C, with a residence time of 20 minutes, in atmospheric air conditions. The physical and energetic properties of the pellets were evaluated before and after roasting. The roasting process made the dimensions of the pellets more homogeneous; increased hydrophobicity and changed the immediate chemical composition of the pellets. However, it

did not change the calorific value and I reduced the energy density of solid biofuels, mainly due to its influence on the dimensions of the pellets. In addition, this heat treatment affected the behavior of the thermal degradation of the pellets, both in terms of temperature, remaining mass at each stage of mass loss, and also at temperatures with the highest mass loss velocity. In general, the physical properties of the pellets and the thermal degradation behavior were affected more intensely than the energy potential of this biofuel, demonstrating good combustibility.

**Keywords:** Roaster; biomass; calorific value; solid biofuels.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Planta de torrefação da PECHI. ....	18
Figura 2- Planta de torrefação da empresa PILLARD. ....	19
Figura 3- Modelo de Referência. ....	21
Figura 4 - Fluxo e entregáveis de cada etapa. ....	22
Figura 5- Função Global do projeto de um protótipo de torrefador de biomassa florestal. ....	39
Figura 6- Estrutura funcional do protótipo do torrefador de biomassa. ....	40
Figura 7- Croqui esquemático do protótipo de torrefação. ....	45
Figura 8- Especificações técnicas do do ventilador utilizado na construção do torrefador de biomassa. ....	47
Figura 9- Informações técnicas do inversor de frequência CFW100. ....	49
Figura 10- Conjunto de ventilação do torrefador de biomassa. ....	49
Figura 11- Lança-chamas. ....	50
Figura 12- Fabricação do queimador: Tubo calandrado e misturador aletado. ....	50
Figura 13- Fabricação do queimador, processo de soldagem com eletrodo revestido. ....	51
Figura 14- Fabricação da câmara de Torrefação. ....	54
Figura 15- Termopar tipo K cerâmico. ....	57
Figura 16- Medição de temperatura com medidor digital Minipa. ....	57
Figura 17- Tambor de torrefação com adequação da abertura lateral. ....	58
Figura 18- Testes de funcionamento do torrefador. ....	59
Figura 19- Testes de funcionamento do torrefador. ....	59
Figura 20- Variação da temperatura e tempo de torrefação ao longo da torrefação dos pellets de madeira. ....	60
Figura 21- Pellets in natura x Pellets torrefado. ....	61
Figura 22- Esquema do projeto do queimador/misturador e dados de entrada ....	63
Figura 23- Esquema do projeto do queimador/misturador e dados de entrada ....	65
Figura 24- Gráfico da eficiência do protótipo de torrefação de biomassa para temperaturas de operação de 220° e 280°C . ....	66
Figura 25- Amplitude das dimensões e densidade unitária dos pellets de Pinus em função da temperatura de torrefação. ....	78
Figura 26- Variação da umidade de equilíbrio dos pellets de Pinus em câmara climatizada em função da torrefação ....	79
Figura 27- Comportamento da perda de massa (Tg) e velocidade da perda de massa (DTG) dos pellets de Pinus em função da temperatura de torrefação. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Delineamento experimental aplicado para a análise da eficiência do protótipo de torrefação de biomassa.....	22
Tabela 2- Matriz de apoio ao levantamento da necessidades dos clientes. ....	28
Tabela 3- Lista de necessidades dos clientes.....	31
Tabela 4- Tabela das necessidades em requisitos dos clientes.....	32
Tabela 5- Valoração dos requisitos dos clientes por meio da Matriz de Mudge.....	33
Tabela 6- Matriz de apoio ao levantamento da necessidades dos clientes. ....	33
Tabela 7- Casa da Qualidade - QFD construída para o projeto do protótipo do torrefador de biomassa florestal.....	36
Tabela 8- Especificações/metasp do projeto do protótipo de torrefador de biomassa. ....	37
Tabela 9- Matriz morfológica para solução de problemas do projeto do torrefador de biomassa.....	41
Tabela 10- Matriz de concepções gerada a partir da matriz morfológica. ....	42
Tabela 11- Comparação das concepções - Matriz pugh.....	44
Tabela 12- Delineamento experimental dos ensaios de torrefação de pellets de Pinus em um protótipo de torrefador.....	73
Tabela 13- Análises das propriedades físicas e energeticas realizadas nos pellets de Pinus antes e após o processo de torrefação .....	74
Tabela 14- Dimensões e densidade unitária dos pellets de Pinus em função do processo e temperatura de torrefação .....	77
Tabela 15- Relação em entre o teor de umidade e o potencial energético dos pellets até umidade de equilíbrio dos pellets antes e após o processo de torrefação.....	80
Tabela 16- Densidade energética dos pellets de Pinus submetidos a diferentes temperaturas de torrefação .....	81
Tabela 17- Temperaturas de degradação térmica dos pellets em função da temperatura de torrefação.....	85
Tabela 18- Massa remanescente nos principais pontos de perda de massa, na degradação térmica dos pellets em função da temperatura de torrefação.....	85
Tabela 19- Composição química imediata dos pellets em função da temperatura de torrefação.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CV	Coefficiente de variação
cm	Centímetro
DB	Densidade básica
DE	Densidade energética
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EIA	Energy information Administration
EPE	Empres de pesquisa energética
FO	Frequência observada
GPS	Global Positioning System
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IEA	International Energy Agency
L	Lignina
m	Metros
NBR	Normas Brasileiras
PCS	Poder calorífico superior
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
QFD	Quality Function Deployment
SC	Santa Catarina
TC	Teor de cinzas
TCF	Teor de carbono fixo
TGA	Análise termogravimétrica
TU	Teor de umidade
TV	Teor de voláteis

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>17</b>
<b>DESENVOLVIMENTO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM TORREFADOR DE PEQUENO PORTE PARA BIOMASSA FLORESTAL.....</b>	<b>17</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	17
1.2 DESENVOLVIMENTO .....	20
1.2.1 Metodologia do Projeto .....	20
1.2.2 Projeto Informacional .....	23
1.2.2.2 Levantamento das necessidades dos clientes.....	26
1.2.3 Projeto Conceitual .....	38
1.2.4 Projeto detalhado .....	46
1.2.4.1 Fabricação da Ventilação .....	47
1.2.4.2 Fabricação do queimador .....	50
1.2.4.3 Fabricação da câmara de torrefação .....	52
1.2.4.4 Montagem e testes de eficiência.....	57
1.2.4.5 Análise de Eficiência Térmica.....	61
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>71</b>
<b>2.AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA PROCESSADA NO PROTÓTIPO DE TORREFAÇÃO .....</b>	<b>71</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	71
2.2 METODOLOGIA .....	72
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	77
2.4 CONCLUSÕES .....	87
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

A demanda global de energia cresceu 6%, em 2021, sendo o maior aumento percentual desde 2010 (IEA, 2022). A maior fatia da matriz energética mundial (mais de 80%) é ocupada pelos combustíveis fósseis. Já a biomassa, apesar de abundante, representa apenas 9,3% desta matriz mundial (EPE, 2022).

Neste cenário, o setor florestal se credencia a aumentar a sua participação no setor energético. Há um crescimento na demanda do uso da madeira para fins energéticos nacionalmente, que atendem principalmente as indústrias alimentícias, na secagem de grãos, mineradoras e nos fornos cerâmicos (REIS *et al.*, 2017). Para esses casos, a fonte de energia produzida pela biomassa é térmica, com geração de calor e vapor (REIS *et al.*, 2015).

O Brasil é considerado um líder mundial na produção de madeira e referência no setor de árvores plantadas. Possui um total de 9,55 milhões de hectares de florestas plantadas (IBA, 2021). O Brasil e os Estados Unidos também possuem a maior capacidade de gerar energia de biomassa no mundo (PAO; FU, 2013). O setor de biomassa tem potencial para produção de energia e pode ter um aumento ainda maior se apostar na alocação de culturas energéticas em terras menos férteis (VÁVROVÁ; KNÁPEK; WEGER, 2014; ROBERTS *et al.*, 2015).

Uma formação estratégica com ferramentas de apoio as atividades florestais, com questões de uso das florestas é de suma importância para a manutenção de competitividade do Brasil (MOREIRA; OLIVEIRA, 2017). Neste viés o estudo de (SIMIONI; HOEFLICH, 2010), demonstra que uma análise de prospecção se torna importante para reconhecer as demandas tecnológicas do setor, isso serve de informação para a desenvolver políticas públicas, como o uso de biomassa florestal para geração de energia e nortear ações a instituições privadas.

No atual cenário é oportuno desenvolver tecnologias que busquem melhorar a qualidade da biomassa para fins energéticos. O propósito deste trabalho é avançar no desenvolvimento do processo de torrefação de biomassa. No Brasil as primeiras referências da utilização de tratamento térmico em madeira, referente ao processo de torrefação foi escrita por Brito (1993), mas uma parcela considerável dos trabalhos realizados na área são da Europa, sendo a França a pioneira nesta linha de pesquisa com pesquisadores como Patrick Rousset (Rousset, 2012).

A torrefação tem como objetivo fundamental concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, temperaturas de 200 a 300°C e baixas taxas de aquecimento (5°/mi a 15°/min), o que permite a degradação de alguns carboidratos e, conseqüentemente, volatilização de compostos oxigenados. Nessas condições, o produto final é um sólido, denominado biomassa torrificada, composto basicamente de celulose e lignina,

caracterizada pela hidrofobicidade, aumento da fragilidade, resistência a biodegradabilidade e aumento da densidade energética (SILVA, 2013). A temperatura é um dos principais parâmetros utilizados no processamento da biomassa torrificada. Além disso, a biomassa torrificada possui baixas emissões de fumaça durante a combustão, pode ser estocada por períodos mais longos que a biomassa *in natura*, facilitando assim seu uso doméstico. Já industrialmente no processo de gaseificação pela obtenção de gás mais limpo (LUENGO *et al.*, 2006).

Esta problemática conduz ao seguinte questionamento: Há como melhorar a qualidade da biomassa para a geração de energia? Com base nisso, deve-se considerar que a biomassa pode ter diferenças consideráveis nas suas características físicas, químicas e morfológicas. Neste contexto, o trabalho se propõe a estudar o processo de torrefação da biomassa, com o desenvolvimento de um protótipo a fim de melhorar a qualidade da biomassa para geração de energia.

A contribuição do projeto será de grande impacto, principalmente para pequenos produtores já que o desenvolvimento de um torrefador de pequeno porte, trará no futuro condições de geração de biocombustível com maior desempenho energético, aproveitando diferentes resíduos florestais gerados por diversas atividades econômicas.

Apresentada a problemática do projeto, entende-se que é preciso desenvolver novas tecnologias em favor da geração de energia por meio da biomassa, pois esta fonte tem potencial para suprir parte da energia que o mundo demandará nos próximos anos. Para este desafio, o desenvolvimento do protótipo de torrefação vai preencher uma lacuna que trata de melhorar a qualidade da biomassa, nos aspectos que diz respeito a geração de energia. Com esta proposta, o objetivo geral do trabalho foi: Desenvolver e testar um protótipo para torrefação de biomassa.

Já, os objetivos específicos do trabalho foram:

Capítulo I – Desenvolver, fabricar e avaliar a eficiência de um protótipo para torrefação de biomassa florestal.

Capítulo II - Avaliar a qualidade da biomassa processada no protótipo de torrefação.



## CAPÍTULO 1

### DESENVOLVIMENTO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM TORREFADOR DE PEQUENO PORTE PARA BIOMASSA FLORESTAL.

#### 1.1 INTRODUÇÃO

A definição de biomassa é qualquer material derivado da vida vegetal, que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos. Desta forma, a maioria dos recursos energéticos como o petróleo, carvão mineral não são considerados renováveis, apesar de serem derivados da vida vegetal. Do ponto de vista energético, o conceito geral abordado pelo CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa) é que “biomassa seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia” (IEE, 2022).

Para Brand (2010), os combustíveis derivados da biomassa podem ser classificados em: biomassa florestal, agrícola e de resíduos urbanos. A biomassa florestal é o material orgânico produzido, que pode ser classificado como nativo ou implantado. Tanto as florestas nativas, quanto as implantadas, possuem grande diversidade de produtos que a exploração tradicional não utiliza, por serem considerados resíduos. Estes podem ser convertidos em energia dando um novo destino em potencial (BRAND *et al.*, 2009). Para esta fonte de energia surge mercado, pois além de seu baixo custo existe um desenvolvimento tecnológico para ser usada com eficiência (CORTEZ *et al.*, 2008).

No entanto a densidade baixa, umidade alta e heterogeneidade dificultam o transporte, armazenamento e utilização da biomassa *in natura* (KALIYAN; MOREY, 2009; TUMULURU *et al.*, 2011; ZAMORANO *et al.*, 2011). Assim, o melhoramento da qualidade da biomassa facilita a sua utilização e que viabiliza a biomassa como um combustível viável.

De acordo com Brand (2010), a composição química elementar é a responsável pela base de cálculo para saber o potencial energético de um combustível. Já a química imediata refere-se ao carbono fixo (F), materiais voláteis (V) e cinzas (A). O teor de voláteis e o carbono fixo são inversamente proporcionais. Para as propriedades físicas se tem a umidade que é a quantidade de água base na biomassa (seca ou úmida). A água dificulta a queima do combustível e reduz o poder calorífico. A principal característica da biomassa para geração de energia é o poder calorífico que é a quantidade de calor total liberado durante a combustão completa do material.

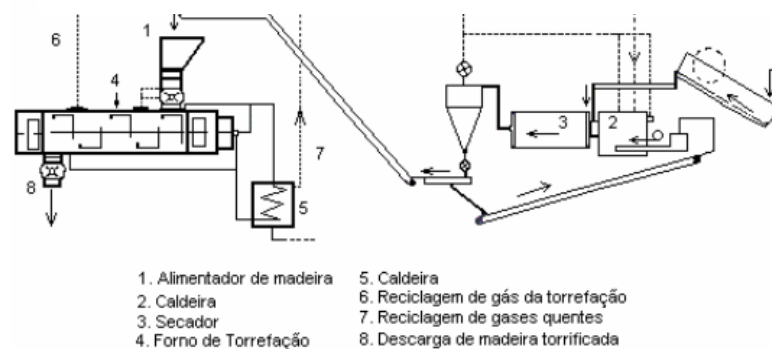
Para melhorar a capacidade energética da biomassa e os resíduos lignocelulósicos, existem diversas tecnologias para o aproveitamento da bioenergia. Dentre os processos termoquímicos, a torrefação vem emergindo como método de pré-tratamento térmico que elimina muitas das limitações associadas à biomassa bruta (*in natura*). A torrefação produz um rico produto sólido de carbono. A torrefação não é um processo de secagem e sim uma pirólise parcial da biomassa, que é realizada na faixa de temperatura de 200 - 300°C, em ambiente inerte (MEDIC *et al.*, 2011). Como características da madeira após o processo de torrefação têm-se: redução da flexibilidade, alteração de composição e redução de higroscopicidade, conferindo-lhe uma melhor estabilidade dimensional (RODRIGUES, 2009).

Portanto, a biomassa torrificada é de boa qualidade para gaseificação e combustão, com características favoráveis ao armazenamento e transporte, por ter baixa umidade, alta densidade e natureza hidrofóbica (ROSILLO-CALLE; BEZZON 2005). Essas características da biomassa torrificada variam principalmente em função da temperatura final, mas também pelo tempo de residência, a taxa de aquecimento e as propriedades iniciais da madeira.

A torrefação na área energética iniciou-se na França, por volta de 1940, onde buscou uma alternativa para o petróleo e derivados. Com o fim da guerra a distribuição de petróleo se estabilizou e outras tecnologias, além da torrefação foram descontinuadas. No entanto, na década de 1970 com a crise do petróleo voltou-se a desenvolver fontes de energia alternativas. Na França, novamente foi onde se desenvolveu em níveis industriais (LUENGO *et. al.*, 2006).

Basicamente dois tipos de processos de torrefadores foram desenvolvidos; processo contínuo e processo por batelada. Desenvolvido por PECHINEY Eletrometalurgia, o processo contínuo se dá pelo contato da superfície do reator aquecido na biomassa (GIRARD; SHAH, 1991). Para este processo, a madeira é triturada (10 mm), os gases da torrefação são recirculantes dentro do sistema. O reator de torrefação é rotatório, onde a biomassa antes de alimentada para torrefação passa por um processo de secagem. (Figura 01).

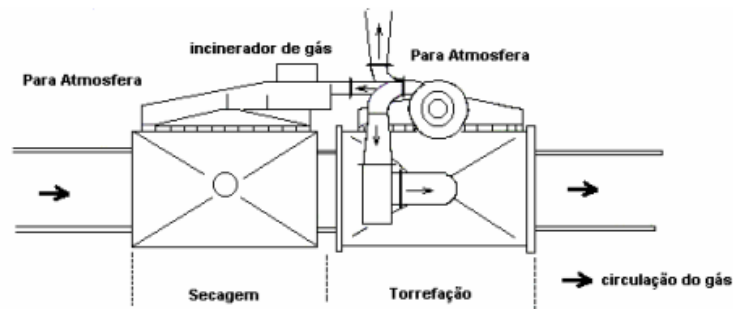
Figura 1- Planta de torrefação da PECHI.



Fonte: Luengo *et al.* (2006); adaptado de Girard; Shah (1991).

Já o processo de torrefação por batelada tem o princípio de convecção de gás em dois fornos, um para secagem da biomassa e outro para torrefação. Este sistema foi desenvolvido pela empresa PILLARD (Figura 2).

Figura 2- Planta de torrefação da empresa PILLARD.



Fonte:(Luengo *et al.* (2006); adaptado de Girard; Shah (1991).

Nos principais equipamentos de torrefação têm-se o sistema contínuo e de batelada, ambos com suas peculiaridades. O contínuo possibilita a aplicação em grande escala, que pode fazer parte de um sistema produtivo maior na geração de energia de uma indústria, por exemplo. O sistema por batelada trás maior flexibilidade para utilizar diferentes biomassas e aplicações em pequeno porte (GIRARD; SHAH, 1991).

Nesse contexto, o protótipo desenvolvido neste trabalho seguirá a aplicação da torrefação para sistemas de pequeno porte, pequenas propriedades onde a biomassa é abundante, além de desenvolver pesquisa aplicada, gerando conhecimento científico regional.

Levando em consideração que há abundância e diversidade de biomassa, o desenvolvimento do protótipo de torrefação terá desafios técnicos de elevar a qualidade da biomassa, aumentando o poder calorífico da mesma. As propriedades físico-químicas da biomassa torreficada, tais como durabilidade, homogeneidade e comportamento hidrofóbico, e atividade biológica, também serão melhoradas. Para este desfecho ocorrer as principais hipóteses estabelecidas foram:

- O sistema mecânico por tamboreamento, realizando a torrefação por batelada, terá maior viabilidade técnica para construção do protótipo.
- A eficiência da torrefação no protótipo poderá ser medida por meios de parâmetros como; temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento.

Com base nos conceitos de torrefação e nos tipos de sistemas de torrefação já desenvolvidos, este capítulo teve como objetivo o planejamento do projeto, o desenvolvimento, a fabricação e a análise da eficiência do protótipo de torrefação de biomassa.

## 1.2 DESENVOLVIMENTO

### 1.2.1 Metodologia do Projeto

A metodologia de projetos aplicada na engenharia mecânica, em sua amplitude trata o projeto com uma abordagem sistemática para desenvolvimento de produtos. A indústria competitiva mundial emprega modelos de desenvolvimento de produtos com melhorias contínuas, modificando etapas do projeto com maior detalhamento e efetividade, substituindo os aspectos mais abstratos do projeto com um modelo mais detalhado e concreto, proporcionando assim um produto físico pareado com o projeto (FERREIRA, 1997).

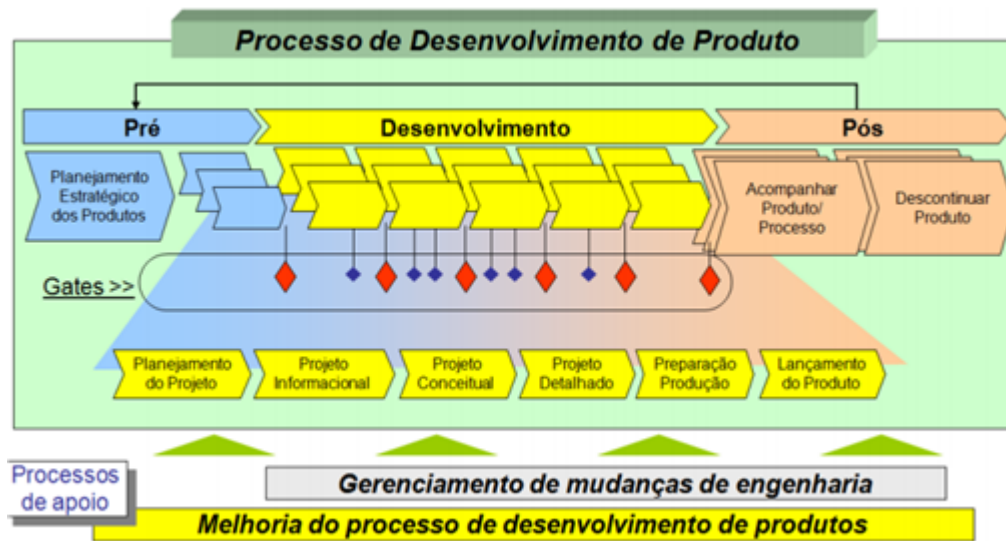
Há muitos modelos de projeto desenvolvidos com o objetivo de melhorar a qualidade, reduzir tempo e custo de fabricação. A diferença entre esses modelos são de cunho terminológico (ROOZENBURG; EEKELS, 1995). Os autores diferenciam três tipos de modelos de projeto, onde os mesmos se complementam: ciclo empírico (observação-suposição-expectativa-teste-avaliação) ou solução de problemas; modelo de fases e desenvolvimento concêntrico (projeto como o desenvolvimento de nova atividade empresarial).

O modelo de fase reúne as proposições de Pahl; Beitz (1996), Hubka; Eder (1988), da norma alemã VDI 2221 (1985). A semelhança entre esses modelos levou Ogliari (1999) a denominá-los de modelo de consenso, o qual é composto de quatro fases, que são: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado.

Para o desenvolvimento do torrefador, a metodologia de fases utilizada foi a denominada como PDP (Processo de Desenvolvimento de Produtos). O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pode ser definido como um conjunto de atividades onde se busca, a partir das necessidades dos clientes e as possibilidades e restrições tecnológicas, direcionar para as estratégias competitivas da empresa, chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que sua manufatura seja capaz de produzi-lo (Rozenfeld *et al.*, 2006).

Na figura 3 se tem a apresentação gráfica do modelo de referência da metodologia.

Figura 3- Modelo de Referência.

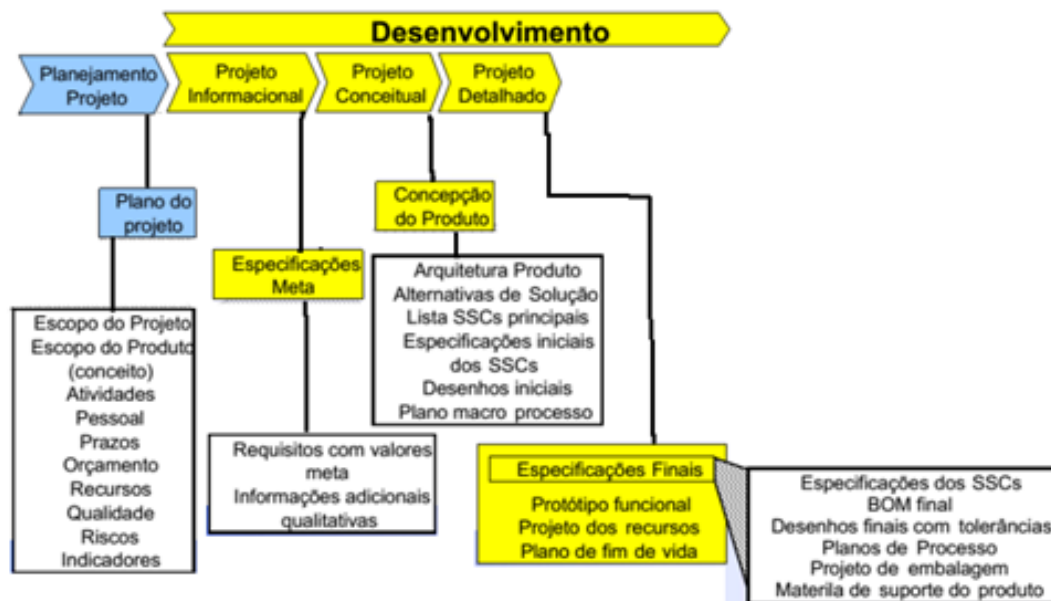


Fonte: Rozenfeld et. al. (2006)

A Metodologia é dividida em 3 macrofases: Pré-desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-desenvolvimento. A fase de desenvolvimento é onde a maior parte do projeto estará concentrado. O planejamento do projeto foi utilizado na etapa do pré-desenvolvimento. Isso porque, se trata de um protótipo de pesquisa onde a fase anterior ao planejamento e o pós-desenvolvimento não se enquadram no trabalho.

Dentro do desenvolvimento foram cumpridas 3 grandes etapas: projeto informacional, projeto conceitual e projeto detalhado. Em cada etapa destas houve uma sequência de atividades sistemáticas que foram executadas utilizando algumas ferramentas auxiliares como QFD (Quality Function Deployment - Desdobramento da Função Qualidade), matriz de Mudge, matriz morfológica, a fim de estabelecer os entregáveis de cada etapa. Na figura 04 se pode visualizar graficamente qual a sequência de execução adotada e os produtos obtidos em cada etapa.

Figura 4 - Fluxo e entregáveis de cada etapa.



Fonte: Adaptado de Rozenfeld *et. al.* (2006)

Concluído o projeto detalhado, foi desenvolvida a próxima etapa que consistiu em avaliar o desempenho do protótipo de torrefação de biomassa. Nesta fase foram realizados testes sistemáticos validando o protótipo funcional e principalmente avaliando o processo de torrefação. Para o método de validação foram avaliadas 3 variáveis de controle: controle de temperatura (200 - 300°C), tempo de residência da biomassa (t) e taxa de aquecimento (°C/min).

Para tanto, foram realizados ciclos de torrefação por batelada, com carregamento de 3kg de *pellets* de *Pinus sp.*, com tempo de residência de 20 minutos e taxa de aquecimento de 15,5°C/min. Foram realizados o total de 2 tratamentos, com 2 repetições cada. Os tratamentos e temperaturas utilizados podem ser visualizados na Tabela 1:

Tabela 1- Delineamento experimental aplicado para a análise da eficiência do protótipo de torrefação de biomassa

<b>Dados de Avaliação</b>				
Biomassa	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Tempo de residência	Tempo total
<i>Pinus sp.</i>	<i>in natura</i>	X	X	x
	220,8	15,5°C/min	20min	30min
	280,2	15,5°C/min	20min	34min

Fonte: O autor.

### 1.2.2 Projeto Informacional

Nesta etapa foram definidas as especificações técnicas do protótipo de torrefação. As especificações de projeto correspondem ao produto que, a partir das informações levantadas no planejamento, irão servir de orientação para gerar as soluções e fornecer conteúdo para montar os critérios de avaliações de tomadas de decisão nas etapas seguintes (ROOZENBURG; EEKELS, 1995).

No projeto informacional se reflete o real problema e assim se inicia uma investigação, se iniciando pelos interessados - “clientes”, entendendo suas necessidades, mapeado por meio do ciclo de vida do produto em cada uma das suas fases. Em sequência, estas informações são tratadas, gerando requisitos do cliente.

Neste momento, se pode deparar com informações obtidas dos clientes de várias formas e fontes, que em sua maioria possuem muita subjetividade. Isso, para definição de requisitos é vago. Para tanto, é necessário que seja reescrito com característica técnicas e variáveis passíveis de mensuração.

Um aspecto importante que deve ser destacado nesta etapa é que definições inadequadas a respeito do produto redirecionam o desenvolvimento e a tomada de decisões nas próximas etapas erroneamente, o que compromete todo o projeto.

Dentro do projeto informacional, a sequência das atividades a serem desenvolvidos são:

1. A definição do ciclo de vida do produto;
2. Levantamento das necessidades do projeto;
3. A Conversão das necessidades em requisitos dos clientes;
4. A Conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto;
5. A avaliação do cruzamento dos requisitos dos clientes x requisitos de projeto;
6. A definição das especificações-metas do projeto.

Para iniciar o projeto informacional é realizada uma busca de anterioridade, afim de conhecer os projetos desenvolvidos atualmente, em nível nacional e internacional, do mesmo interesse; colaborando com o entendimento da tecnologia, norteando o trabalho tecnologicamente.

Neste trabalho, para os primeiros passos do projeto informacional foi realizada a busca de anterioridade utilizando-se a plataforma brasileira do INPI ( Instituto Nacional da Propriedade Industrial) (INPI, 2021), onde realizou-se uma pesquisa com palavras chaves: torrefação, biomassa, processo e reator.

Foram encontradas centenas de patentes relacionadas. No entanto, 14 patentes se destacaram com maior significância para o projeto. Abaixo tem-se uma lista com o título e o número de depósito das patentes:

- **Título:** processo de comando, processo de torrefação, disposição de comando e unidade de torrefação - **BR 112014015528-3 A2**
- **Título:** método de torrefação de uma biomassa compreendendo o passo de resfriamento da reação de torrefação **BR11 2013 029477 9**
- **Título:** equipamento para torrefação **PI 1010186-1 A2**
- **Título:** reator de secagem e torrefação, instalação de tratamento de biomassa, processo de secagem e aplicação do reator **BR 112014011095-6 A2**
- **Título:** dispositivo termo acústico para torrefação de biomassas **BR102018076106-4 A2**
- **Título:** reator de torrefação e método para modificar um secador vibratório para fornecer um reator de torrefação de vibração **BR 112016012780-3**
- **Título:** método para conduzir o processo de torrefação da biomassa, instalação para conduzir um processo de torrefação, e, método para purificar os gases de combustão do processo de torrefação **BR 112015028950-9 A2**
- **Título:** método e sistema para torrefação eficiente de energia da biomassa **BR112017 015742 0**
- **Título:** sistema e método para torrefação de biomassa **BR 112013008504-5**
- **Título:** método de disposição para a torrefação eficiente da biomassa **BR1120130294795**
- **Título:** processo e dispositivo de torrefação e de moagem em camada fluidizada de uma carga de biomassa, visando uma gaseificação ou de uma combustão posterior **PI0819705-9**
- **Título:** método para o tratamento de biomassa com um sistema de torrefação **BR112013018884-7**
- **Título:** dispositivo e processo de torrefação autotérmico de biomassa, método para aumentar a efetividade de custo no uso da mesma como combustível e processo para produzir péletes de biomassa torrada **PI 0911367-3 B1**
- **Título:** reator de trituração e de torrefação de biomassa, sistema, processo de aplicação de um reator e instalação de tratamento de biomassa de preferência lignocelulósica **BR 112014011131-6 A8**



A pesquisa de patentes demonstrou que se tem avançado no desenvolvimento de processos que utilizam os efeitos da torrefação na biomassa, sendo utilizados nas mais variadas aplicações industriais, como na geração de energia, melhoramento de qualidades físicas, processos intermediários, gaseificação etc. Essa busca contribuiu para se ter um panorama geral principalmente relacionado ao protótipo em desenvolvimento, tecnologias utilizadas, sistemas de funcionamentos e tipo de processos utilizados. Sendo ponto chave tanto para definição das especificações/metapas do projeto informacional como para as etapas seguintes: projeto conceitual e detalhado.

#### 1.2.2.1 Definição do ciclo de vida do produto

Para a definição do ciclo de vida do torrefador de biomassa foram detalhadas as fases do projeto. Para tanto, foi necessário contemplar todos os clientes envolvidos, sejam eles internos ou externos. Os clientes internos foram definidos como sendo todos os relacionados ao processo de desenvolvimento do produto. Já os clientes externos são os potenciais usuários do produto: pesquisadores, empresas e propriedades agrícolas de pequeno porte. Ainda como clientes externos, mais relacionados à fabricação do equipamento, foram relacionados os fornecedores de matéria-prima, de instrumentação e recursos necessários para o desenvolvimento do projeto.

Identificados os clientes, foram definidas as próximas fases do ciclo de vida do produto “protótipo de torrefação de biomassa”, que se constituíram em:

- Projeto
- Fabricação
- Testes
- Utilização
- Manutenção
- Descarte

Neste trabalho foram planejadas as seis fases do ciclo de vida, porém foram executadas as três primeiras fase do projeto, ficando as demais para etapas posteriores de pesquisa.

### 1.2.2.2 Levantamento das necessidades dos clientes

Nesta etapa uma das formas de levantar as necessidades do cliente é por meio da aproximação e entedimento dos atores que fazem parte do processo. Para isso existem ferramentas que podem ser utilizadas. Entre elas se tem: bibliografias, questionários aplicados, pesquisas online, observação *in loco* e entrevistas.

Neste projeto, como o objetivo é desenvolvimento de um protótipo, os principais clientes, inicialmente, são os próprios desenvolvedores. Para o levantamento da informação, foram realizadas pesquisas bibliográficas, principalmelmetne em publicações científicas; entrevistas com especialistas da área de energia e biomassa, e a análise e entendimento do arranjo produtivo local, que envolve produtores rurais e indústrias de pequeno porte que produzem biomassa de origem vegetal.

A partir dessas informações compiladas, as necessidades dos clientes foram sistematizadas com auxílio de uma matriz de apoio, utilizada como meio de identificar as necessidades dos clientes nas fases do ciclo de vida do protótipo.

O uso da matriz permite a inserção de todas as outras necessidades que não ficaram claras no levantamento das necessidades dos clientes dentro do ciclo de vida do produto. Para isso foi utilizada a experiência e abstração em todo o ciclo do produto, cruzadas com os atributos básicos do produto.

Na matriz de apoio analisam-se as colunas, onde estão os atributos, cruzando-as com as linhas que definem o ciclo de vida do produto. Esta matriz se torna uma ferramenta importante, pois, torna mais fácil associar os atributos ao ciclo de vida, diminuindo a chance de faltar uma necessidade importante do cliente.

Tendo os requisitos dos clientes, estes receberam valores. A valoração é requisito para a aplicação da primeira matriz do QFD (Quality Function Deployment). De acordo com Ogliari (1999), a valoração dos requisitos é realizada pela equipe do projeto de forma sistemática, afim de entender as implicações no projeto. Para esta etapa foi utilizada a matriz de Mudge, onde foram comparados de forma sistemática os requisitos entre si sendo colocados em linha e colunas, que formam uma diagonal no diagrama.

Os requisitos foram classificados em três níveis de importância: pouco importante (1), medianamente importante (3) e muito importante (5), representados pelas letras A, B, e C, respectivamente. Assim, se tem os valores relativos de cada requisito pelo seu somatório, que contabilizou a posição de dominância do requisito. Com isso, foi obtido um *ranking* para os requisitos fossem utilizados na casa da qualidade (QFD).

### 1.2.2.3 - Conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto

Tendo os requisitos dos clientes valorados e identificados a partir de suas necessidades, a próxima etapa foi a conversão das mesmas em requisitos de projeto. Os requisitos são características técnicas mensuráveis com um indicador referencial.

Nesta etapa foi gerada a primeira decisão física do protótipo. Nela, foram reunidos os padrões mensuráveis às características definitivas do protótipo. Para tanto utilizou-se uma adaptação proposta por Fonseca (2000), que segue o método de matriz para definir os requisitos dos clientes, definindo atributos básicos do produto (Tabela 02).

Os atributos básicos foram definidos dentro de oito campos: Geométricos; Ergonômicos; Confiabilidade; Normalização; Segurança; Fabricabilidade; Econômico e de Impacto Ambiental.

Tabela 2- Matriz de apoio ao levantamento da necessidades dos clientes.

Ciclo de vida do produto	Atributos Básicos do Produto							
	<i>Geométricos</i>	<i>Ergonomia</i>	<i>Confiabilidade</i>	<i>Normalização</i>	<i>Segurança</i>	<i>Fabricabilidade</i>	<i>Econômico</i>	<i>Impacto ambiental</i>
<b>Projeto</b>	*Funcionamento simples. *Possuir controle de velocidade e temperatura. * Modularidade de componentes.	*Operação confortável	*Utilização do menor n° possível de componentes.	*Utilizar o maior n° possível de componentes padronizados.	* Seguir normas de segurança de projetos mecânicos.	*Geometria simples dos componentes da máquina.	*Consumir pouca energia. * Adaptar componentes fáceis de comparar.	*Menor quantidade de resíduos possível.
<b>Fabricação</b>	*Componentes fabricados dentro das especificações técnicas.		*Componentes fabricados dentro das especificações técnicas com material adequado.			*Utilizar processos convencionais de fabricação. *Baixa exigência técnica de fabricação.	* Baixo tempo de fabricação. *Reduzir desperdício de materiais.	*Menor quantidade possível de resíduos.

<b>Testes</b>	*Permitir testes em diferentes níveis de funcionamento.		*Realização de testes cíclicos.		*Realização de testes em áreas abertas		*Permitir que os testes sejam realizados com materiais abundantes.	
<b>Utilização</b>	* Controlar a velocidade e temperatura de operação. *De fácil entendimento	*Possuir baixo peso. *Minimizar esforços físicos na operação e no transporte. *Fácil abastecimento do sistema. *Alta mobilidade.	*Apresentar boa durabilidade. *Baixa manutenção.		*Segurança de operação. *Apresentar baixo nível de ruídos		*Apresentar tamanho reduzido. *Baixo custo de operação.	*Utilização em ambiente aberto.

<b>Manutenção</b>	*Funcionamento simples.	*Fácil acesso aos componentes. *Fácil limpeza.	*Facilidade de diagnosticar falhas.	*Utilizar o maior n° possível de componentes padronizados.			*Fácil manutenção. *Baixo custo de manutenção. *Manutenção rápida. *Dispensar treinamento para realização da manutenção.	
<b>Descarte</b>				*Reutilização de produtos padronizados				*Utilizar materiais recicláveis.

Fonte: O autor

Com base na matriz da Tabela 2, foram listadas as necessidades para cada fase do ciclo de vida do produto (Tabela 3)

Tabela 3- Lista de necessidades dos clientes.

Fase do ciclo de vida do produto	Necessidades Levantadas dos clientes	
<i>Projeto</i>	1	Funcionamento simples dos componentes do projeto.
	2	Utilizar menor número possível de componentes.
	3	Possuir controle de velocidade e temperatura.
	4	Operação confortável.
	5	Geometria simples dos componentes da máquina.
	6	Equipamento deve consumir pouca energia.
	7	Utilizar o maior número possível de componentes padronizados.
	8	Seguir normas de segurança de projetos mecânicos.
	9	Modularidade de componentes.
<i>Fabricação</i>	10	Utilizar processos convencionais de fabricação.
	11	Baixa exigência técnica na fabricação.
	12	Menor quantidade possível de resíduos.
	13	Baixo tempo de fabricação
	14	Reduzir desperdício de materiais.
<i>Testes</i>	15	Permitir testes em diferentes níveis de funcionamento
	16	Realizações de testes cíclicos.
	17	Permitir que os testes sejam realizados com materiais abundantes.
<i>Utilização</i>	18	Baixo custo de operação.
	19	Segurança na operação.
	20	Apresentar tamanho reduzido.
	21	Ser de fácil entendimento.
	22	Possuir baixo peso.
	23	Minimizar esforços físicos na operação e no transporte.
	24	Fácil abastecimento do sistema.
	25	Apresentar baixo nível de ruídos.
	26	Alta mobilidade.
	27	Apresentar alta durabilidade.
	28	Baixa manutenção.
<i>Manutenção</i>	29	Controlar a velocidade e temperatura.
	30	Funcionamento simples.
	31	Fácil acesso aos componentes.
	32	Fácil limpeza.
	33	Esforços físicos reduzidos na realização dos reparos.
	34	Facilidade de diagnosticar falhas.

	35	Utilizar o maior número possível de componentes padronizados.
	36	Fácil manutenção.
	37	Baixo custo de manutenção
	38	Manutenção rápida.
	39	Dispensar treinamento para realização da manutenção.
<i>Descarte</i>	40	Reutilização de produtos padronizados
	41	Utilizar materiais recicláveis.

Fonte: O autor.

Com base nas Tabelas 2 e 3 foram identificadas 41 necessidades dos clientes, agrupadas pelas fases do ciclo de vida do produtos. O objetivo deste agrupamento foi verificar: a similaridade das necessidades, eliminar as necessidades iguais e, simplificar as necessidades menos relevantes.

Após a análise das 41 necessidades, estas reduzidas a 14 que possuíam relevância para o projeto, das quais posteriormente foram convertidas em requisitos dos clientes. Para a transformação de necessidades em requisitos, estas foram reescritas em frases curtas compostas pelos verbos ser, estar ou ter, afim de mensurar esses requisitos, que geraram a lista de requisitos dos clientes (Tabela 04).

Tabela 4- Tabela das necessidades em requisitos dos clientes.

Fase do ciclo de vida do produto	Requisitos do clientes	
<i>Projeto</i>	1	Ter controle de temperatura.
	2	Ser de baixo custo.
	3	Ter controle de velocidade
	4	Ter baixo consumo de energia.
	5	Ter alto número de componentes padronizados.
<i>Fabricação</i>	6	Ser fabricado a partir de processos convencionais .
	7	Ter baixo tempo de fabricação.
<i>Testes</i>	8	Ser testado em módulos.
<i>Utilização</i>	9	Ter baixo ruído.
	10	Ser de pequeno porte.
	11	Ser de fácil operação.
	12	Ser móvel.
<i>Manutenção</i>	13	Ser de fácil substituição de componentes.
<i>Descarte</i>	14	Ter materiais reutilizáveis.

Fonte: O autor.



A partir da Tabela 04, a valoração dos requisitos foi realizada na Matriz de Mudage (Tabela 05) e realizado o ranqueamento dos requisitos dos clientes com base nos atributos específicos do projeto (Tabela 06).

Tabela 5- Valoração dos requisitos dos clientes por meio da Matriz de Mudage.

MATRIZ DE MUDGE																
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Soma	%	VC
1	1B	1B	1A	1B	1B	1C	1A	1B	1B	1B	1B	1B	1C	39	24,8%	1
	2	3B	2B	2A	2A	2B	8B	9A	10B	2A	12A	2A	2A	11	7,0%	6
		3	3A	3A	3B	3B	8A	3A	3A	3B	3A	3A	3B	21	13,4%	3
			4	4A	4A	4B	8B	4A	10A	4A	12A	13A	4B	10	6,4%	7
				5	6A	7A	8B	9A	10B	5A	12A	13A	14A	1	0,6%	14
					6	6A	8B	6A	10A	6A	12A	13A	6A	5	3,2%	9
						7	8B	7A	10A	11A	12B	13A	7A	3	1,9%	12
							8	8B	10A	8B	8A	8A	8B	27	17,2%	2
								9	10A	9A	12A	13A	9A	4	2,5%	10
									10	10A	10A	13A	10A	14	8,9%	4
										11	12A	11A	11A	3	1,9%	11
											12	12A	12A	11	7,0%	5
												13	13A	7	4,5%	8
													14	1	0,6%	15
<b>TOTAL</b>														157	100,0%	

Valor da importância relativa		
A	Valor aproximadamente igual	1 pontos
B	Medianamente importante	3 pontos
C	Muito importante	5 pontos

Fonte: O autor

Tabela 6- Matriz de apoio ao levantamento da necessidades dos clientes.

Requisitos dos clientes <i>ranking</i>		Atributos específicos de projeto				
		<i>Geométricos</i>	<i>Energia</i>	<i>Peso</i>	<i>Tamanho</i>	<i>Controle</i>
1	Ter controle de temperatura.		Baixo consumo de energia			Alto controle de temperatura
2	Ser testado em módulos.	Alto número de módulos		Baixo peso		
3	Ter controle de velocidade		Baixo consumo de energia			Alto controle de velocidade
4	Ser de pequeno porte.			Baixo peso	Baixa dimensão	
5	Ser de baixo custo.	Baixo número de peças	Baixo consumo de energia			
6	Ser móvel.	baixo número de peças		Baixo peso	Alto número de módulos	
7	Ter baixo consumo de energia.		Baixa potência de acionamento			Alto controle de ar e gás
8	Ser de fácil substituição de componentes.	Baixo número de peças				

9	Ser fabricado a partir de processos convencionais	Alto número de peças normalizadas				
10	Ter baixo ruído.					Baixa geração de ruído
11	Ser de fácil operação.	Alto número de peças normalizadas		Baixo peso	Alto número de módulos	Alto controle de ar e gás
12	Ter baixo tempo de fabricação.	Alto número de peças normalizadas				
13	Ter materiais reutilizáveis.	Alto número de componentes recicláveis.				
14	Ter alto número de componentes padronizados.	Alto número de peças normalizadas				

Fonte: O autor.

Do cruzamento dos requisitos dos clientes (linhas da matriz) e atributos de projeto (colunas da matriz) definiu-se os cinco atributos: geometria, energia, peso, tamanho e controle. Gerou-se assim uma lista de requisitos de projeto agrupados, com a exclusão dos repetidos e irrelevantes. Assim, ao final da conversão dos requisitos dos clientes em requisitos do projeto, foram selecionados 9 requisitos fundamentais para o sucesso do projeto:

1. Alto número de módulos (n°);
2. Alto número de peças normalizadas (n°);
3. Baixo consumo de energia (kg/glp);
4. Baixa potência de acionamento (kW/h);
5. Baixa dimensão (m<sup>2</sup>);
6. Alto controle de temperatura (C°);
7. Alto controle de velocidade (rpm);
8. Baixa geração de ruído (dB);
9. Alto controle da mistura ar e combustível (Hz/m<sup>3</sup>);

#### 1.2.2.4 - Avaliação dos requisitos dos clientes x requisitos de projeto.

Na avaliação dos requisitos dos clientes x requisitos de projeto usou-se a ferramenta chamada QFD (Quality Function Deployment – Desdobramento da Função Qualidade). Esta metodologia foi criada pelo japonês Yoji Akao, na década de 60, e seu principal objetivo é ilucidar a equipe de desenvolvimento do produto a incorporar as reais necessidades dos clientes

em seus projetos de melhoria, da mesma forma como costuma ser reportado na literatura (AKAO, 1990; HAUSER; CLAUNSIG, 1998). A casa da qualidade como também é conhecida a QFD tem variações em sua utilização.

Neste trabalho foi utilizada a matriz para estabelecer os relacionamentos entre os requisistos (cliente e projeto) formando uma hierarquia dos requisitos de projeto conforme seu valor dentro do projeto, e o telhado da casa da qualidade para identificar o tipo de relacionamento (Fortemente positivo ●, Positivo ○, Negativo ✱, Fortemente negativo ◇). Este relacionamento gera uma pontuação conferida aos requisitos de projeto conforme sua “importância”, e, também, para valorá-los nas ocasiões em que estes requisitos venham a constituir-se critérios de avaliação (Tabela 07).

Tabela 7- Casa da Qualidade - QFD construída para o projeto do protótipo do torrefador de biomassa florestal

Requisito dos clientes	Importância	Requisitos de projeto								
		Alto número de módulos (n°);	Alto número de peças normalizadas (n°);	Alto controle da mistura ar e combustível (Hz/m³)	Baixo consumo de energia (kg/gp);	Baixo potência de acionamento (Kw/h);	Baixa dimensão(m²);	Alto controle de temperatura (C°);	Alto controle de velocidade (rpm);	Baixa geração de ruído (dB);
Ter controle de temperatura.	7	○		●	○		●			
Ter controle da mistura de ar e combustível	5	●				△		△	△	△
Ter controle de velocidade	5	△			△	○		●	△	
Ser testado em módulos.	5	●	△	△		○	△	△		
Ser de baixo custo.	3	△	●	○	●	●	○	○	○	
Ser móvel.	3	●	○			●				
Ter baixo consumo de energia.	3			●	●	●		●		
Ser de fácil substituição de componentes.	3	○	○				△			
Ser fabricado a partir de processos convencionais de fabricação.	1									
Ter baixo ruído.	1									●
Ser de fácil operação.	3		△	△			△	△	△	
Ter baixo tempo de fabricação.	1	○	●				△			
Ter materiais reutilizáveis.	3		○							
Ter alto número de componentes padronizados.	3		●							
<b>Importância Absoluta</b>		158	98	107	80	74	58	112	67	19
<b>Importância Relativa</b>		1	4	3	5	6	8	2	7	9
<b>Dificuldade Técnica</b>										

Fonte: O autor.

Os resultados obtidos na casa da qualidade, indicaram, a ordem de cada requisito como sendo:

1. Ter alto número de módulos;
2. Alto controle de temperatura;
3. Alto controle da mistura ar/combustível;

4. Alto número de peças normalizadas;
5. Baixo consumo de energia;
6. Baixa potência de acionamento;
7. Alto controle de velocidade;
8. Pequenas dimensões, e
9. Baixa geração de ruídos.

#### 1.2.2.5 - Especificações-metas do projeto.

Ao final do projeto informacional, com os resultados obtidos, foram definidas as especificações/metasp do projeto. Informações primordiais para o desenvolvimento técnico do projeto, onde se transforma as necessidades dos clientes em especificações mensuráveis.

Desta forma, foi construída uma tabela (Tabela 08), onde cada requisito de projeto está associado a um valor meta/mensurável a ser atingido, saídas indesejáveis que podem ocorrer no projeto, e comentários. A lista de especificações foi utilizada nas fases seguintes do projeto como norteadores da fabricação e testes do protótipo de torrefação de biomassa

Tabela 8- Especificações/metasp do projeto do protótipo de torrefador de biomassa.

Ordem	Requisito	Unidade	Meta	Saídas indesejáveis	Comentário
1°	Protótipo em módulos	n°	≥ 3 módulos de funcionamento separado.	Não funcionar de forma separada.	O teste poderá ser efetuado por módulos inicialmente.
2°	Controle de temperatura	C°	≥ 2 termopares	Ter apenas um ponto de medição de temperatura.	Termopares instalados na entrada e saída do sistema.
3°	Controle da mistura de ar e combustível	Hz/m <sup>3</sup>	≥ 1 válvulas de vazão de gás e 10 a 60hz para vazão de ar	Controlar apenas ar ou apenas gás.	O teste será efetuado no queimador.
4°	Alto número de peças normalizadas	n°	≤ 20	Ter poucas peças padrão.	Componentes padronizados facilitam a construção e manutenção do equipamento
5°	Consumo de combustível	kg/h	≤ 500g/h	Não exceder o consumo estipulado	O controle de ar contribui para um consumo menor.

6°	Potência de acionamento	CV	Potência máxima requerida $\leq 2$ CV	Utilizar fonte de potência com alto custo e consumo de energia.	Poderá ser utilizado sistema mecânico para melhorar torque se necessário.
7°	Controle de velocidade	rpm	$\geq 2$ rpm	Ter apenas um rpm fixo	Seleção de rpm poderá ser mecânica afim de diminuir custos.
8°	Dimensão do protótipo	m <sup>2</sup>	$\leq 3$ m <sup>2</sup>	Ter um porte superior a 3m <sup>2</sup>	Equipamento de pequeno porte.
9°	Baixo ruído	dB	$\leq 85$ dB	Não exceder o valor estipulado	Isolar acusticamente sistemas móveis se necessário

Fonte: O autor.

O projeto informacional foi finalizado obtendo-se as nove especificações para a confecção do protótipo. Neste momento do trabalho era importante ter dados técnicos dos equipamentos de torrefação para vislumbrar o equipamento tecnicamente a partir das necessidades dos clientes. Sendo dificultoso, pois o desenvolvimento de torrefadores de pequeno porte é pouco explorado. Para tanto, utilizou-se uma metodologia bastante robusta, favorecendo a alimentação por inúmeras fontes atrelada às experiências dos envolvidos no projeto. Assim pode-se observar na tabela 8 que a primeira especificação/meta é realizar o protótipo em módulos, que trouxe neste momento uma segurança técnica para o projeto. Desenvolvê-los e testá-los separadamente, facilita avaliar as adequações necessárias para o melhor desempenho módulos/protótipo. Por fim as especificações/metabol da tabela 8 contém uma síntese para o desenvolvimento das próximas etapas, simplificando em nove requisitos e mensurando os mesmos, afim de atingir suas metas.

### 1.2.3 Projeto Conceitual

O projeto conceitual relaciona-se à busca e criação de concepções para soluções dos problemas do projeto. Aqui o processo de criação deve ser livre, podendo utilizar métodos de criatividade, mas não esquecendo das informações levantadas no projeto informacional. Para representar as soluções dos problemas de projeto, utilizam-se croquis, esboços, esquemáticos que auxiliem na elucidação do problema. Nesta fase visualizam-se fisicamente as soluções do

projeto, tornam-se mais concretas as ideias, e o mundo de possibilidades se abre a fim de solucionar os desafios do projeto.

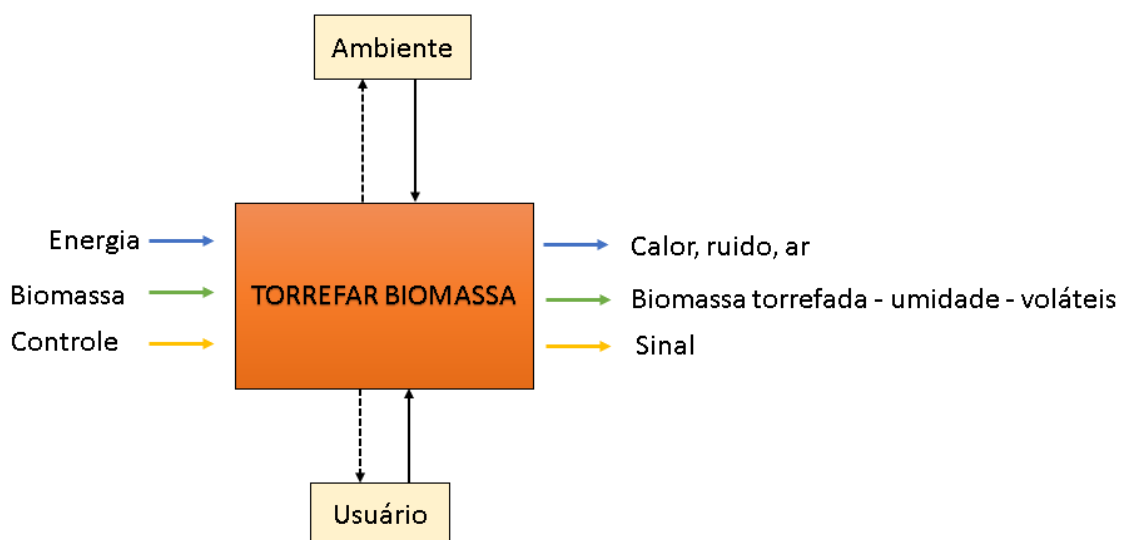
Esta etapa define a função global e a estrutura funcional do projeto, podendo assim, por meio de uma matriz, gerar concepções a partir das especificações definidas no projeto informacional. As atividades foram desenvolvidas a partir das especificações técnicas do projeto e seguiram em direção às concepções físicas do produto, baseando-se na proposta de Pahl e Beitz (1996), seguindo os passos a seguir:

1. Definir a estrutura funcional do produto;
2. Investigar princípios de solução alternativos para cada função do protótipo;
3. Combinar os princípios de solução a ter concepções alternativas;
4. Selecionar as melhores e viáveis concepções.

#### 1.2.3.1 Definição da estrutura funcional do produto

Nesta etapa se determinou a estrutura funcional do produto a ser desenvolvido. Para esta estrutura, foi definida a função global, e a partir dela e as funções secundárias, que servem de subsídio na geração das concepções. A função global do sistema projetado define-se como função essencial. Essa função expressa à síntese do problema, na forma de diagrama (Figura 05).

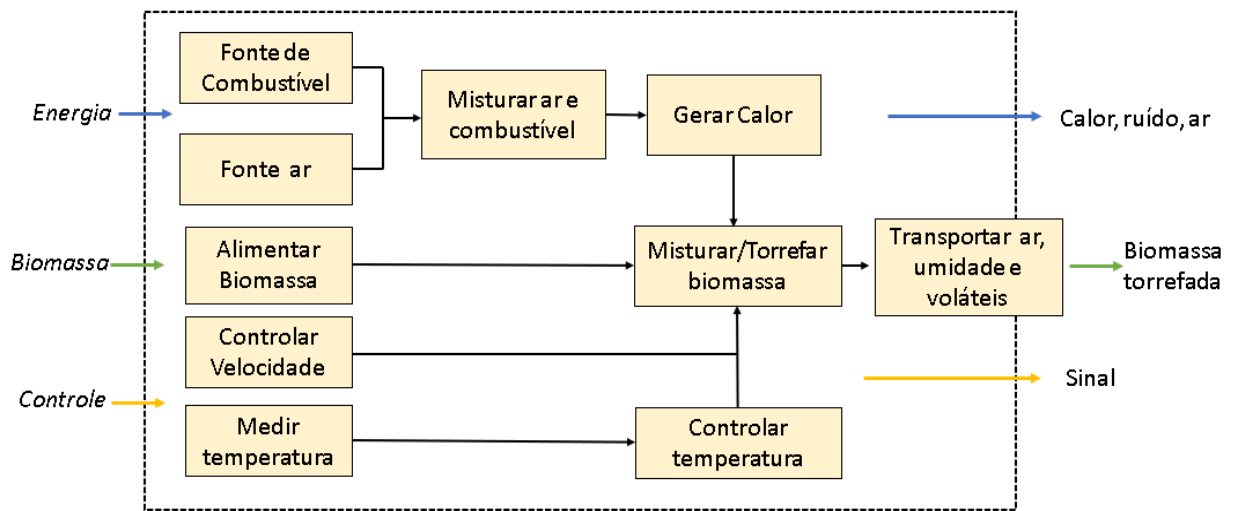
Figura 5- Função Global do projeto de um protótipo de torrefador de biomassa florestal.



Fonte: O autor.

Com a função global clara, é possível desmembrá-la em subfunções para desenvolver os princípios de soluções que devem cumprir tais funções. Estes diagramas nos dão um panorama organizado dos sistemas a serem desenvolvidos, a sequência de acontecimentos com que o protótipo do torrefador deverá funcionar, ajudando a equipe de trabalho a estar sempre alinhada a resolver os mesmos problemas (Figura 06).

Figura 6- Estrutura funcional do protótipo do torrefador de biomassa.



Fonte: O autor.

### 1.2.3.2 Princípios de soluções

Com o fluxo das funções estabelecidas e desenvolvidas a partir dos requisitos do projeto, para cada função apresentada se estabelecem possíveis soluções. Para tanto, foi utilizada a ferramenta do método morfológico para compilar todas as possibilidades que posteriormente geraram as concepções do protótipo para torrefação de biomassa.

O método morfológico, segundo Rozenfeld *et al.* (2006), parte do princípio de desdobrar um problema complexo em partes mais simples, tornando-se mais fácil encontrar a solução para estas partes. Este método auxilia muito a equipe de projeto a encontrar um grande conjunto de alternativas para o produto, por meio de análise sistemática da configuração/forma que o produto terá (Tabela 09).



Tabela 9- Matriz morfológica para solução de problemas do projeto do torrefador de biomassa.

FUNÇÕES		PRINCÍPIOS DE SOLUÇÕES			
		1	2	3	4
1	<i>F1- Fornecer energia/combustível</i>	Eletricidade	Óleo	GLP	Biomassa
2	<i>F2- Fornecer ar</i>	Ventilador	Soprador	Exaustor	Inflador
3	<i>F3- Mistura de ar e combustível</i>	Válvulas manuais	Válvula solenóide	-	-
4	<i>F4- Alimentação de biomassa</i>	Esteira	Manual	Rosca transportadora	Válvula rotativa
5	<i>F5- Controle de velocidade</i>	Inversor de frequência	Polia escalonada	Sistema supervisório	Rotação fixa
6	<i>F6- Medir temperatura</i>	Termopar tipo K	Termopar tipo J	Termopar tipo N	Termopar tipo S
7	<i>F7- Controle de temperatura</i>	Microcontrolador	Sistema supervisório	Termômetro digital	Medidor de temperatura digital
8	<i>F8- Gerar calor</i>	Queimador a gás	Queimador a óleo	Queimador a biomassa	Resistência elétrica
9	<i>F9- Misturar biomassa</i>	Rosca transportadora	Caixa vibratória	Tamboreamento	Misturador V-Y
10	<i>F10- Transportar ar e voláteis</i>	Tubos	Mangueiras	Tubo/mangueira	-

Fonte: O autor.

Desmembradas as funções, a matriz morfológica trouxe princípios de soluções para cada função que o protótipo de torrefação de biomassa deverá executar. Desta forma, foi construída uma imagem física e sequencial das atividades a serem realizadas. A partir dessa matriz (Tabela 09), outra matriz (de concepção) foi gerada com 4 concepções possíveis para o projeto (Tabela 10), organizando cada princípio de solução mais viável e discutido com a equipe de desenvolvimento do projeto. Para definir a melhor concepção para o protótipo se configurou 4 concepções (A, B, C e D) possíveis. Essas, por sua vez foram definidas a partir dos requisitos de projeto descritos no projeto informacional.

Tabela 10- Matriz de concepções gerada a partir da matriz morfológica.

FUNÇÕES		CONCEPÇÕES			
		A	B	C	D
1	<i>F1- Fornecer energia/combustível</i>	eletricidade	GLP	Biomassa	GLP
2	<i>F2- Fornecer ar</i>	ventilador	soprador	Exaustor	ventilador
3	<i>F3- Misturar de ar e combustível</i>	válvula solenóide	válvula solenóide	válvulas manuais	válvulas manuais
4	<i>F4- Alimentação de biomassa</i>	Esteira	manual	rosca transportadora	manual
5	<i>F5- Controle de velocidade</i>	inversor de frequência	polia escalonada	polia escalonada	polia escalonada
6	<i>F6- Medir temperatura</i>	termopar tipo S	termopar tipo S	termopar tipo K	termopar tipo K
7	<i>F7- Controle de temperatura</i>	microcontrolador	medidor de temperatura digital	medidor de temperatura digital	medidor de temperatura digital
8	<i>F8- Gerar calor</i>	resistência elétrica	queimador a gás	queimador a biomassa	queimador a gás
9	<i>F9- Misturar biomassa</i>	rosca transportadora	tamboreamento	rosca transportadora	tamboreamento
10	<i>F10- Transportar ar e voláteis</i>	tubo/mangueira	tubo/mangueira	tubo/mangueira	tubo/mangueira

Fonte: O autor.

### 1.2.3.3 Avaliação das concepções sobre tecnologias disponíveis

A avaliação das concepções comparou cada uma das opções para cada função considerando as tecnologias de fabricação consolidadas, de fácil acesso e baixo custo. Este contexto foi baseado em alguns dos requisitos dos clientes estabelecidos no projeto informacional que são:

Ser de baixo custo.

Ser de fácil substituição de componentes.

Ser fabricado a partir de processos convencionais de fabricação.

Ser de fácil operação.

Ter baixo tempo de fabricação.

Ter materiais reutilizáveis.

Ter alto número de componentes padronizados.

Depois de confrontar as concepções, se entendeu que, a partir dos requisitos listados, nenhuma das concepções seria descartada, pois exigem tecnologias de fabricação consolidadas. Sendo assim, todas teriam viabilidade técnica para fabricação.

#### 1.2.3.4 Matriz de decisão

Mantidas todas as opções, foi utilizado o método conhecido como matriz de Pugh (1991). Esta técnica é uma ferramenta utilizada para comparação de concepções onde se usa uma concepção referência, tendo como principal objetivo identificar dentre todas as soluções listada na matriz, a melhor opção combinada, promovendo melhorias nas concepções já elaboradas. É eficiente para a comparação de concepções onde existe um elevado grau de abstração. Para a escolha da melhor concepção, utilizou-se a matriz de Pugh, com 4 tópicos, conforme Ullman (1997):

- Critérios de avaliação: Escolheu-se como critérios de avaliação, os requisitos de projeto e os seus respectivos pesos (gerados na QFD). A utilização dos pesos, resgata os valores ponderados entre requisitos de clientes e requisitos de projeto, valorados na casa da qualidade, trazendo imparcialidade para avaliação.
- Seleção das concepções: Foram comparadas 4 concepções; A, B, C e D conforme Tabela 11. Sendo que elas passaram por uma avaliação de viabilidade técnica, concluindo-se que se enquadravam aos requisitos desenvolvidos.
- Escore: Como referência de avaliação definiu-se a concepção B de forma aleatória, onde as demais se compararam a ela. Para cada comparação com relação aos requisitos de projeto, as concepções foram julgadas como sendo; “melhor que”, “igual a” e “pior que” a referência, recebendo os escores “+1”, “0” e “-1”, respectivamente.
- Cálculo do escore: Com as concepções comparadas com a referência tem-se: total de escores “+1”, total de escores de “-1”, saldo dos escores e total global. O saldo dos escores foi obtido por meio da diferença entre o número de escores “+” e escores “-”. O total global foi calculado pelo somatório do produto de cada escore pelo peso de cada requisito de projeto conforme Tabela 07 (Casa da qualidade – QFD).

O total global de cada concepção indica um caminho mais próximo do ideal, porém não é absoluto. Em muitos casos cria-se uma nova concepção a partir das melhores soluções encontradas nas combinações entre elas (Tabela 11).

Tabela 11- Comparação das concepções - Matriz pugh.

Requisito de Projeto	Peso (QFD)	Concepções			
		A	B	C	D
Protótipo em módulos	158	0	0	0	0
Controle de temperatura	112	-1	0	0	0
Controle da mistura de ar e combustível	107	0	0	1	1
Alto número de peças normalizada	98	0	0	0	0
Consumo de combustível	80	-1	0	1	0
Potência de acionamento	74	-1	0	-1	1
Controle de velocidade	67	1	0	0	0
Dimensão do protótipo	58	-1	0	-1	0
Baixo ruído	19	0	0	0	0
Total (+)		1	0	2	2
Total (-)		4	0	2	0
Saldo score		-3	0	0	2
Total Global		-257	0	55	181

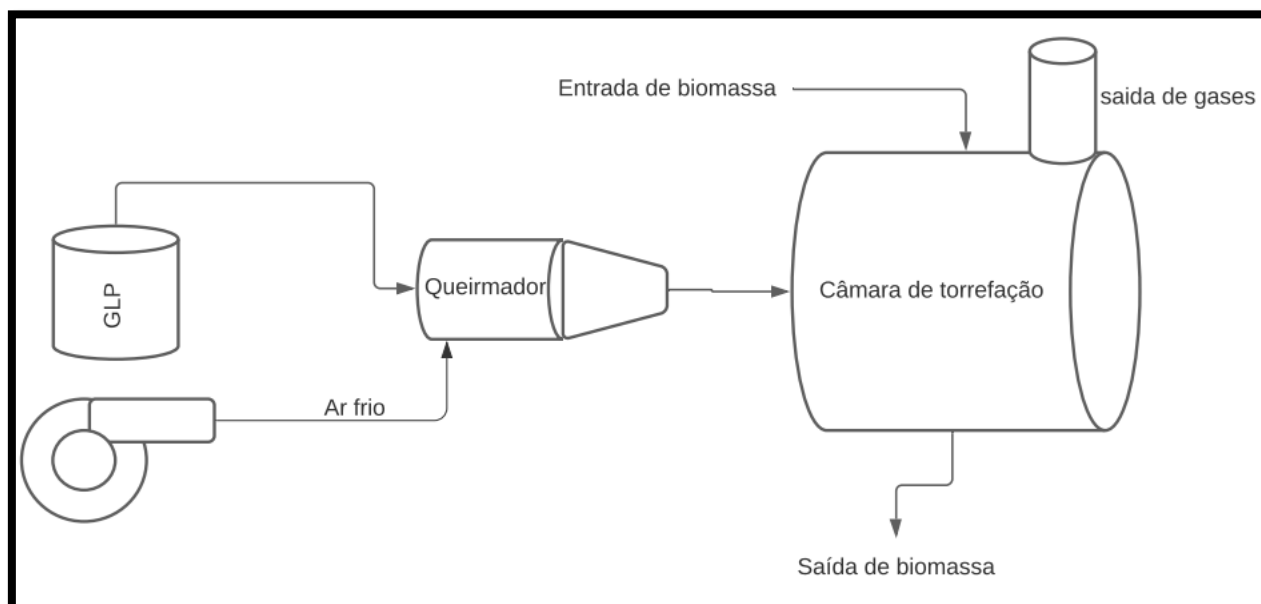
Fonte: O autor.

Como resultado de aplicar-se a matriz de Pugh, se estabeleceu como indicativo que a estrutura da concepção “D” se adequaria mais aos requisitos de projeto, considerando os requisitos de projeto e cliente; o cronograma de desenvolvimento e execução; os recursos técnicos disponíveis; a viabilidade econômica do projeto (Figura 07).

Portanto os itens construtivos do equipamento foram definidos como funções:

- F1- Fornecimento de energia/combustível -GLP
- F2- Fornecimento de ar -ventilador
- F3- Misturar de ar e combustível- válvulas manuais
- F4- Alimentação de biomassa - manual
- F5- Controle de velocidade - polia escalonada
- F6- Medição da temperatura - termopar tipo K
- F7- Controle de temperatura -medidor de temperatura digital
- F8- Geração de calor -queimador a gás
- F9- Mistura de biomassa -tamboramento
- F10- Transporte de ar e voláteis -tubo/mangueira

Figura 7- Croqui esquemático do protótipo de torrefação.



Fonte: O autor.

Com o entendimento do processo de torrefação e suas funcionalidades definidas, a geração da concepção iniciou-se por um croqui esquemático, setorizados e divididos em três módulos (Figura 07):

- **Módulo de Ventilação:** Este módulo é o início do processo, onde acontece a alimentação de ar e combustível GLP (gás liquefeito de petróleo) através de tubos e mangueiras. O controle de ar e combustível é fundamental para o processo de torrefação da biomassa. Portanto são necessárias válvulas para o combustível e controle de vazão de ar.
- **Módulo Queimador:** O módulo queimador é onde se concentra a geração de calor necessária para atingir a temperatura de torrefação que pode chegar até 300°C. No queimador tem-se uma chama controlada através da queima do GLP com a mistura de ar através de um misturador aletado. O ar quente é conduzido por tubulação até a câmara de torrefação.
- **Módulo de Torrefação:** O ar quente vem do módulo do queimador, chegando à câmara de torrefação. A biomassa é alimentada de forma manual na câmara. O processamento da biomassa é realizado por batelada. A câmara tem formato cilíndrico que gira em seu próprio eixo em um sistema de tamboreamento. Para homogeneizar a torrefação utilizou-se 3 pás distribuídas, com 120° entre si, com a função de revolver a biomassa homogeneizando a torrefação.

Com o projeto conceitual concluído, foi definida sua concepção de funcionamento com um croqui (figura 7). Vislumbrando os sistemas e suas funções, nesta etapa o projeto se tornou mais palpável e prazeroso.

#### 1.2.4 Projeto detalhado

Estabelecida a solução conceitual do protótipo de torrefação da biomassa, avançou-se na etapa de metodologia PDP, projeto detalhado. No projeto detalhado, o resultado foi a confecção do protótipo físico, onde foram definidos materiais, formas, processos de fabricação adequado, sistemas e subsistemas.

Para detalhar o projeto utilizou-se o software CAD(Computer Aided Design) 3D Solidworks, onde foram criados os desenhos técnicos dos três módulos e realizada a montagem do protótipo no software antes de executá-lo na prática. Esta ferramenta computacional de CAD da engenharia mecânica facilita e qualifica o projeto mecânico, agilizando e corrigindo o projeto em curso antes de sua confecção.

Na fabricação e montagem foram utilizadas, dentro do possível, as proposições da metodologia do (DFMA - Design for Manufacture and Assembly), disponíveis em Bralla (1986), Bakerjlan (1992), Boothroyd e Dewurst (1994), Pahl e Beitz (1996), Ullman (1997).

Os conceitos de DFMA contribuem para redução de custos na fabricação e montagem. A escolha de componentes de maior simplicidade, normalizados e padronizados contribuem para isso. Componentes reutilizáveis que demandam menos manufatura reduzem o tempo de execução do projeto.

Para a seleção dos materiais a serem utilizados na manufatura, levou-se em conta os seguintes aspectos: resistência mecânica, custo, facilidade de transformação nos processos de usinagem e soldagem e resistência a altas temperaturas. Nas dimensões e formas dos componentes buscou-se adequar aos requisitos, em que a menor dimensão permite maior mobilidade e menor custo. A definição geométrica dos componentes e sistemas foi dinâmica, pois tem-se diversas possibilidades de desenvolver componentes de formas diferentes, mas que atendem as mesmas especificações definidas no projeto conceitual.

Quando definido o protótipo em módulos, na concepção do projeto, facilitou-se o detalhamento e desenvolvimento de forma separada e sequencial. Para executá-los definiu-se os módulos em conjuntos mecânicos:

- Ventilação;
- Queimador;

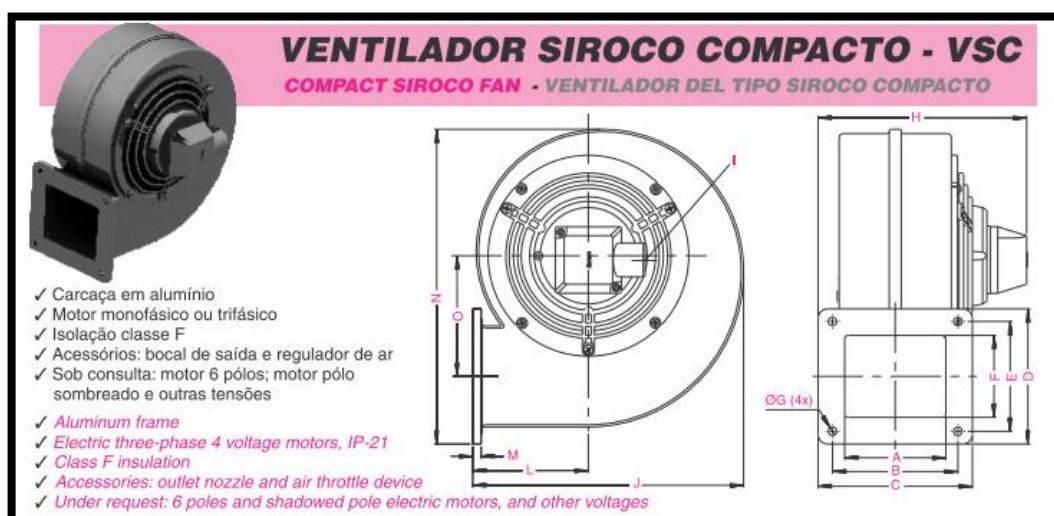
- Câmara de torrefação;

#### 1.2.4.1 Fabricação da Ventilação

Para o desenvolvimento desse sistema utilizou-se o ventilador modelo VSC20, cujas especificações técnicas são apresentadas na Figura 10. O sistema foi configurado com as seguintes características técnicas:

- O desenvolvimento da estrutura foi realizada a partir do ventilador, com perfil “L” de 1”x1/8” com abas iguais em aço-carbono 1020.
- Fixou-se à estrutura, 4 rodízios para facilitar a movimentação e adaptação aos outros módulos.
- Para saída de ar do ventilador foram utilizados tubos para partes rígidas e mangueira onde havia necessidade de flexibilidade na conexão.
- Para o acionamento e controle de vazão de ar do ventilador utilizou-se um inversor de frequência CFW100 (Figura 9). Sua operação é realizada diretamente na interface do equipamento onde a frequência estabelecida em Hz resulta em maior rotação do rotor do ventilador gerando maior ou menos quantidade de ar no sistema. A faixa de frequência estabelecida varia entre, 20 à 66Hz a 220V. Pode-se observar o conjunto de ventilação na Figura 10(A,B).

Figura 8- Especificações técnicas do do ventilador utilizado na construção do torrefador de biomassa.



DIMENSÕES (mm) <i>DIMENSIONS (mm)</i> <i>DIMENSIONES (mm)</i>														
MODELO	A	B	C	D	E	F	ØG	H	I	J	L	M	N	O
VSC-10	56	73	86	94	78	60	6	143	1/2" BSP	170	89	7	184	59
VSC-15	65	88	107	100	80	60	7	160	1/2" BSP	210	113	7	210	71
VSC-20	88	104	128	112	91	68	7	175	1/2" BSP	228	115	7	239	90
VSC-30	104	127	150	150	127	104	9	211	1/2" BSP	276	136	14	300	98
VSC-35	105	155	155	236	212	185	9	211	1/2" BSP	358	136	12	352	117
VSC-40	106	150	174	214	185	143	10	225	1/2" BSP	345	166	12	405	135
VSC-45	106	150	174	214	185	143	10	225	1/2" BSP	345	166	12	405	135
VSC-50	143	175	215	214	175	143	10	527	1/2" BSP	350	165	14	405	135

CARACTERÍSTICAS <i>FEATURES</i> <i>CARACTERÍSTICAS</i>					
60 Hz					
MODELO <i>MODEL</i>	VAZÃO MAX. <i>MAX. FLOWRATE</i> (m³/min)	PRESSÃO MAX. <i>MAX. PRESSURE</i> mm H <sub>2</sub> O	dBA	TENSÃO <i>VOLTAGE</i> (V)	**CV
VSC-10	2,6	28	74	110/220	1/10
2 pólos	2,2	23	74	220/380	1/10
VSC-10	1,3	7	68	110/220	1/35
4 pólos	1,3	7	68	220/380	1/15
VSC-15	7,2	70	71	220/380	1/6
2 pólos	7,2	70	71	110/220	1/6
VSC-20	11	62	87	110/220	1/3
2 pólos	11,2	64	87	220/380	1/3
VSC-20	5,5	15,5	72	110/220	1/20
4 pólos	5,6	15,5	72	220/380	1/20

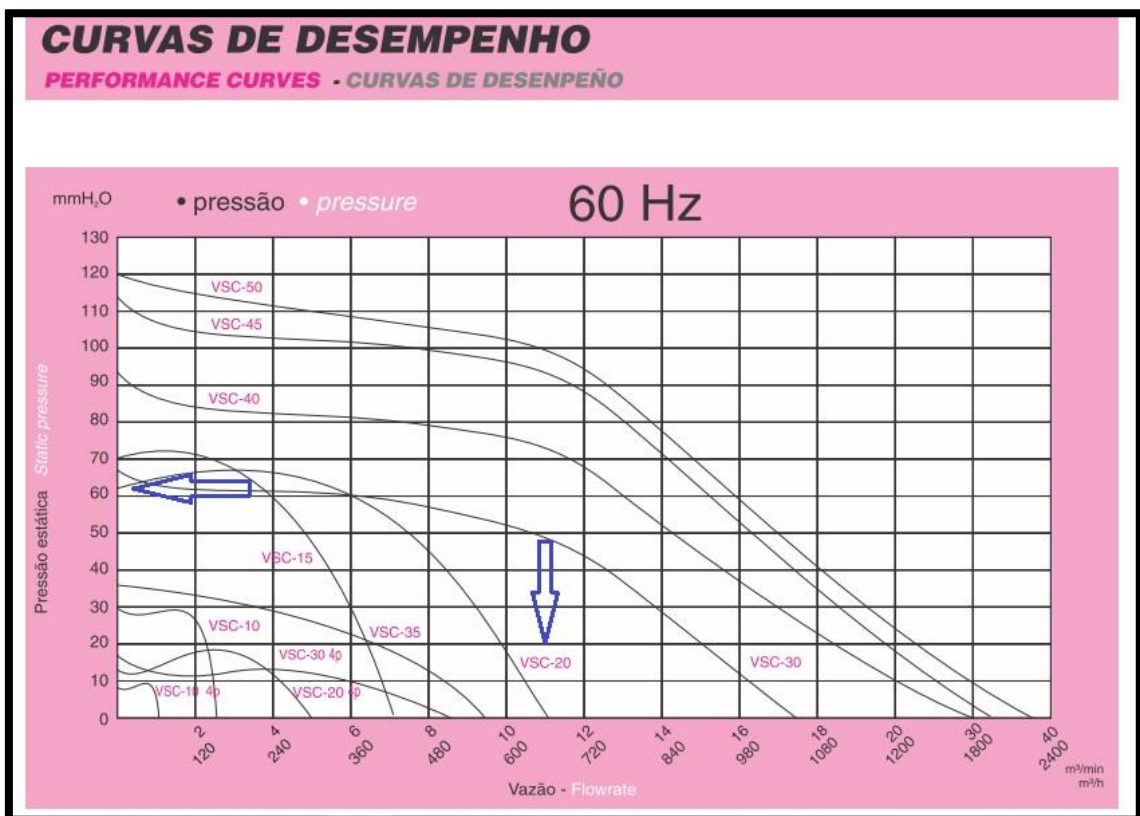
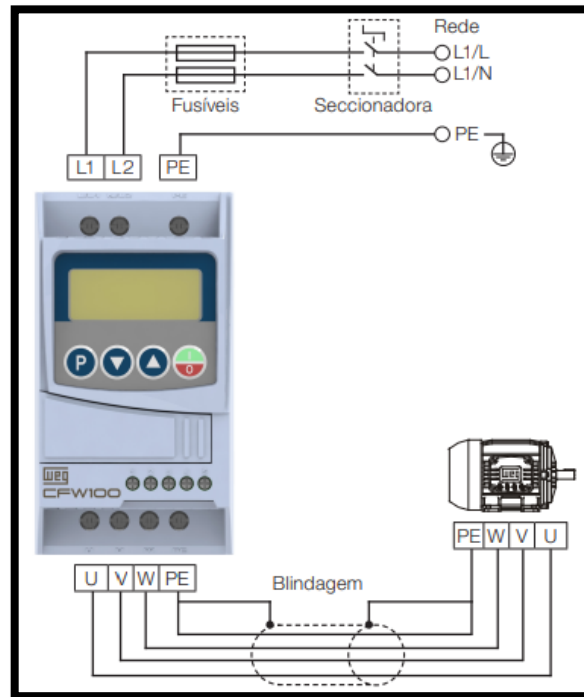


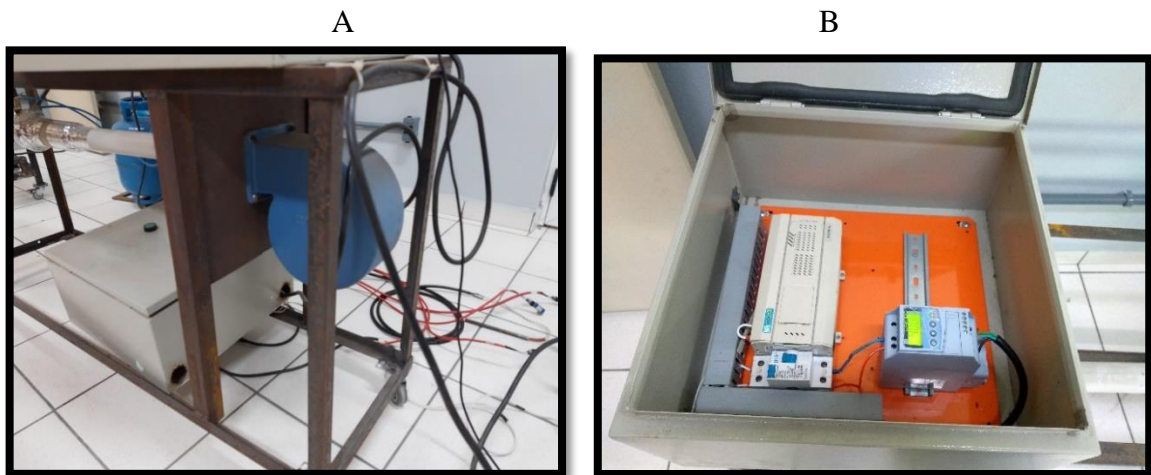


Figura 9- Informações técnicas do inversor de frequência CFW100.



Fonte: Manual WEG 2022.

Figura 10- Conjunto de ventilação do torrefador de biomassa.



Estrutura de perfil "L" com ventilador fixado.

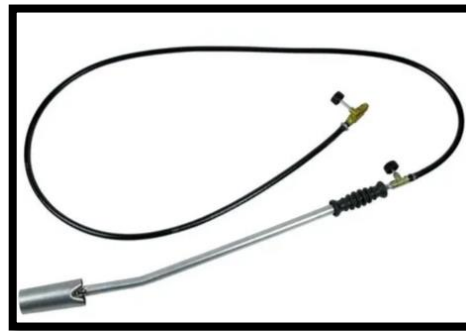
Painel elétrico com inversor de frequência

Fonte: O autor.

#### 1.2.4.2 Fabricação do queimador

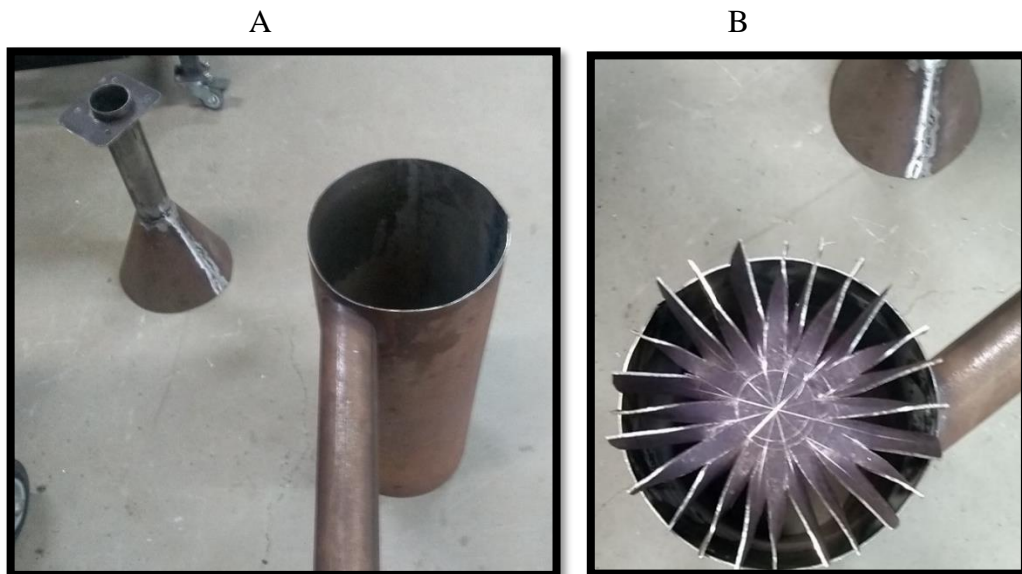
Para o queimador dimensionou-se um sistema capaz de misturar ar e combustível e gerar ar quente suficiente para atingir temperaturas médias acima de 300°C na câmara de torrefação. Para isso utilizou-se um lança chama, equipamento comercial de baixo custo utilizado no meio rural (Figura 11). Para a estrutura do queimador calandrou-se um tubo de chapa de aço-carbono bitola 16 (espessura 1,52mm), junto a ele um tubo de aço soldado na tangente para entrada de ar e um cone de saída para câmara de torrefação. Na parte interna do queimador foi projetado um misturador aletado de ar e combustível para promover melhor a queima do gás GLP. Pode-se observar as Figuras 12 e 13 com as etapas de fabricação do queimador.

Figura 11- Lança-chamas.



Fonte: FERPAM 2022

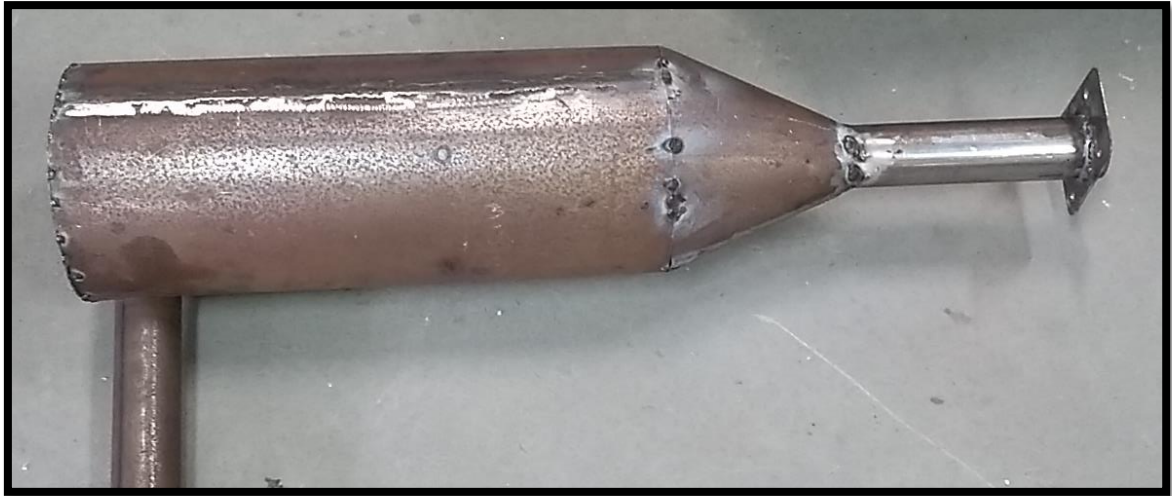
Figura 12- Fabricação do queimador: Tubo calandrado e misturador aletado.



Chapa calandrada e soldada com duto de entrada de ar. Misturador aletado de ar/combustível

Fonte: O autor.

Figura 13- Fabricação do queimador, processo de soldagem com eletrodo revestido.

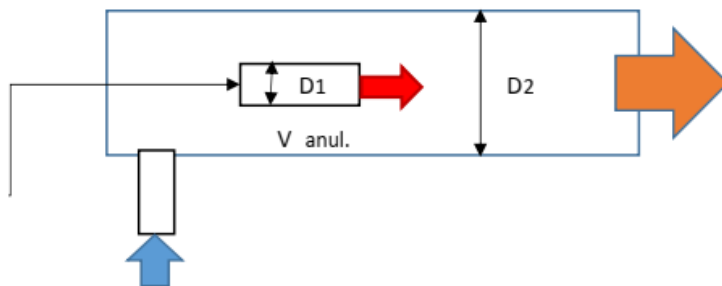


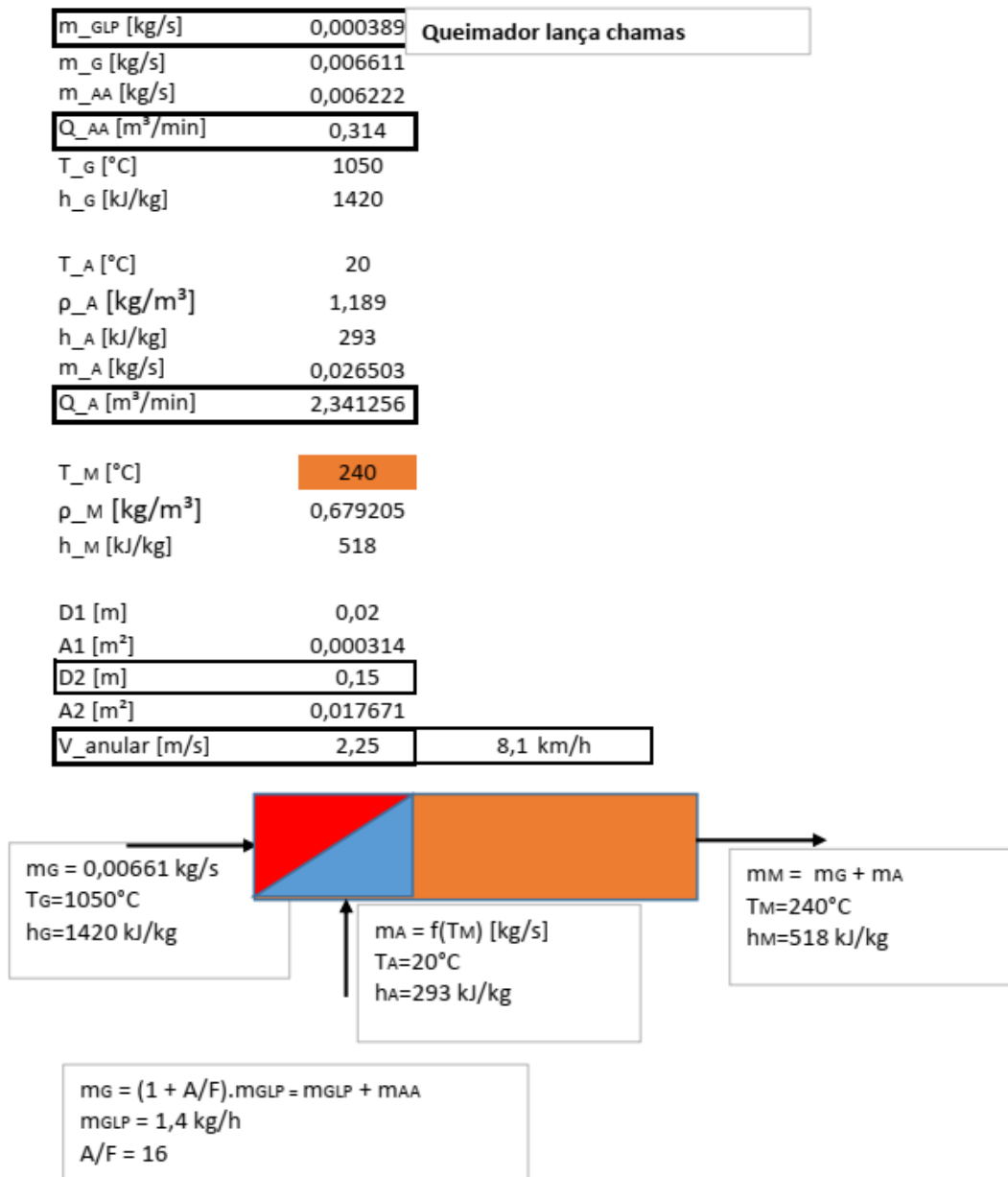
Fonte: O autor.

Para o dimensionamento técnico do queimador definiu-se em  $240^{\circ}\text{C}$  a temperatura média do queimador, já que o processo de torrefação atinge de  $200$  a  $300^{\circ}\text{C}$ , utilizou-se o  $d$ , diâmetro do queimador lança chamas comercial como base para o dimensionamento do queimador detalhado abaixo:

#### Dados

$T_{\text{amb}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	20
$p_{\text{atm}}$ [kPa]	100
$R_{\text{propano}}$ [kJ/kg.K]	0,1886
$\rho_{\text{propano}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,810





#### 1.2.4.3 Fabricação da câmara de torrefação

Último conjunto mecânico do protótipo de torrefação de biomassa, a câmara de torrefação (Figura 14), é onde o processo de torrefação acontece. Definiu-se que o sistema de torrefação adequado aos requisitos seria por batelada, e que alinhado a isso o tamboreamento preenchia as necessidades de misturar a biomassa afim de homogeneizá-la durante a torrefação.

Para este processo criou-se uma estrutura mecânica retangular feita de tubos quadrados de 30 x 2mm de aço-carbono 1020, que alojou um conjunto de mancais auto-compensadores com duas pontas de eixo fixas no tambor (figura 14A). O tambor usado foi reutilizado de uma máquina de lavar roupas, fabricado de aço inoxidável e todo perfurado (figura 14D). O tambor

gira em seu eixo, contendo três pás, fixas a  $120^\circ$  entre si e que revolvem a biomassa no interior do tambor, mantendo a homogeneidade da torrefação.

Para o acionamento do tambor, utilizou-se um motor elétrico monofásico de 2cv de 1700 rotação por minuto, acoplado a um redutor de velocidade com relação de transmissão de 40:1.(figura 14D).Na saída do redutor acoplou-se uma polia VA e assim a transmissão foi realizada tendo outra polia escalonada na entrada do tambor. A polia escalonada gera condições de alterar a velocidade do tambor de torrefação, assim tem-se uma rotação baixa e outra alta (figura 14D).

O tambor de torrefação é envolvido por outro tambor reutilizável fabricado em aço, utilizado para armazenamento de óleo industrial com capacidade de 200litros. Este tambor foi cortado em seu comprimento para adequar-se a dimensão do tambor de torrefação, e bipartido para isolar o tambor de torrefação, mas ao mesmo tempo possibilitar o acesso para alimentar e descarregar a biomassa a cada batelada (figura 14A). Para isso projetou-se uma escotilha no tambor de torrefação (figura 14B).

Um dos principais requisitos para o protótipo é realizar a torrefação na temperatura pretendida que fica entre  $200^\circ\text{C}$  -  $300^\circ\text{C}$ . Para isso instrumentou-se a entrada e a saída da câmara de torrefação com dois termopares tipo K, tendo a média de temperatura sido acatada como temperatura de torrefação, já que ela ocorre dentro do tambor de torrefação (figura 14D).

Por fim, na parte superior do tambor externo projetou-se um chaminé com uma válvula borboleta de acionamento manual capaz de regular a saída de vapores e voláteis oriundos da torrefação.(figura 14A).

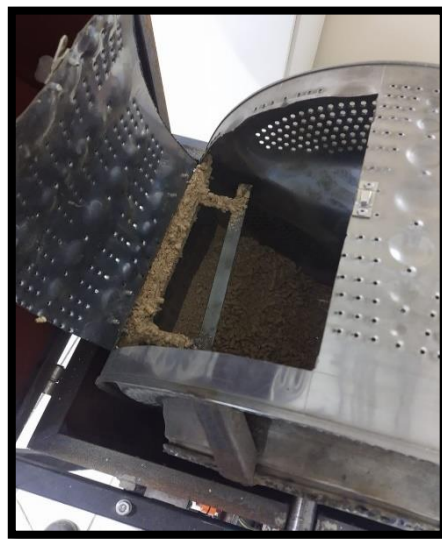
Figura 14- Fabricação da câmara de Torrefação.

A



Tambor protetor da câmara

B



Escotilha da câmara de torrefação

C



Pré-montagem domódulo queimador com câmara de torrefação e ventilação

D



Câmara de torrefação paramentado com termopar e motoredutor.

Fonte: O autor.

Para calcular-se a relação de transmissão do sistema, utilizou-se a equação 1.0, definindo-se que o rpm indicado para o processo de tamboreamento é de 50 à 100 rpm/min, já que sua principal função é garantir a homogeneização da biomassa. Um rpm muito lento gera o efeito cascata e um rpm muito rápido degrada mecanicamente a biomassa.

$$Rt = \frac{n^{polia}}{n^{tambor}} \frac{d^{polia}}{d^{tambor}} \quad (1)$$

Onde:

$Rt$  = relação de transmissão;

$n^{polia}$  = n° de rotações da polia em rpm;

$n^{tambor}$  = n° de rotações do tambor de torrefação em rpm;

$d^{polia}$  = diâmetro da polia em mm;

$d^{tambor}$  = diâmetro do tambor de torrefação em mm.

O motor possui 1700 rpm, acoplado a um redutor de velocidade de 40:1, tem-se 42,5rpm com npolia, o diâmetro da polia é de 70mm. O diâmetro da polia do tambor é de 120mm, aplicando-se a fórmula tem-se 72rpm do tambor.

Utilizou-se a equação 2.0 de (PROVENZA, 1978) para determinar a potência em CV que o motor elétrico precisará para acionar todo o conjunto de transmissão do tambor de torrefação com carga definida de 3kg de biomassa.

$$P = \frac{F \cdot r \cdot n}{71620} \quad (2)$$

Onde:

$P$  = Potência de acionamento em cv;

$F$  = Força atuante no sistema em kgf (peso do tambor + carga de 3kg de biomassa) = 22 kgf;

$r$  = raio do tambor de torrefação em cm = 40;

$n$  = rotação do tambor de torrefação em rpm = 38

Aplicando os valores de força, raio e rpm na equação 2.0 obteve-se a potência de 0,46 CV necessária para o sistema. Porém a potência de entrada, para a potência de saída leva-se em consideração o rendimento do motor elétrico e as perdas de transmissão do sistema. Para essa equação 3.0 foi assumido um rendimento de 65%.

$$\eta = \frac{P_{entrada}}{P_{saída}} \quad (3)$$

Onde:

$\eta$  = Rendimento;

$P_{entrada}$  = potência de entrada em cv;

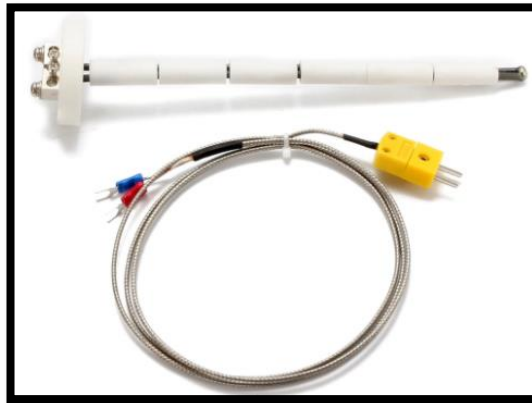
$P_{saída}$  = potência de saída em cv;

Dividindo a potência de entrada de 0,46CV por 0,65 de rendimento, obteve-se a potência de saída de 0,72CV. Então necessita-se de um motor elétrico que atenda essa potência efetiva, como é uma potência fora do padrão utilizou-se um motor monofásico de 1CV para o projeto.

Para extrair os dados em tempo real dos dois termopares tipo K( Figura 15), utilizou-se um medidor de temperatura digital da fabricante Minipa que mede temperatura de forma digital, confiável em tempo real (Figura 16). Os dados são alimentados em planilha eletônica para serem tratados posteriormente.

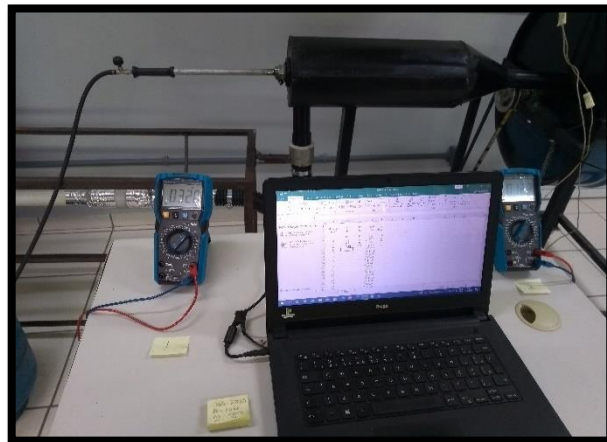


Figura 15- Termopar tipo K cerâmico.



Fonte: Americanas 2022.

Figura 16- Medição de temperatura com medidor digital Minipa.



Fonte: O autor.

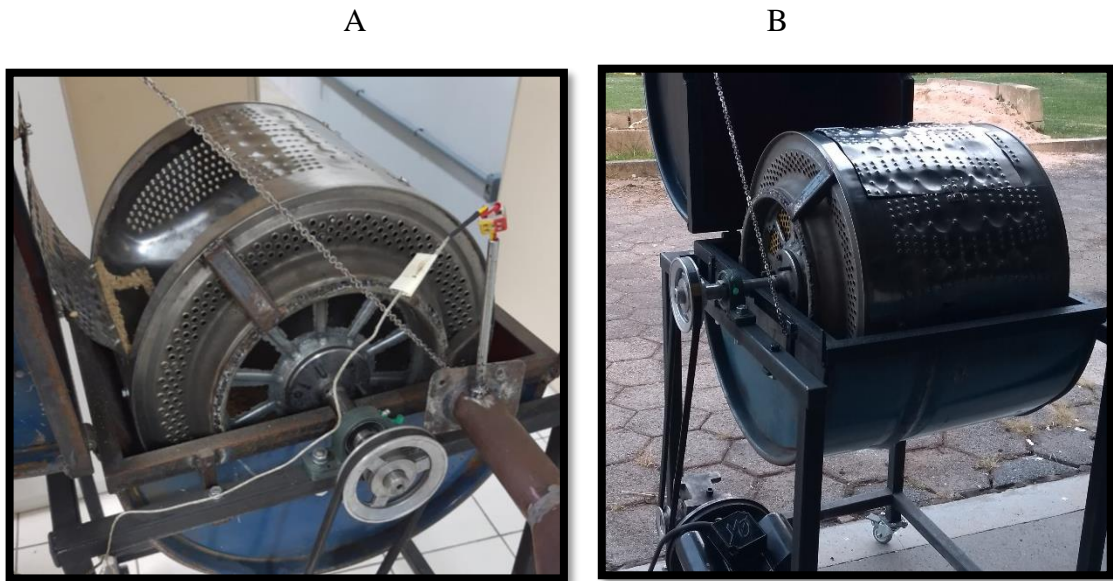
#### 1.2.4.4 Montagem e testes de eficiência

Apresentada a fabricação dos conjuntos mecânicos, concluiu-se a confecção dos três módulos: módulo de ventilação, módulo queimador e módulo de torrefação. A divisão em módulos permitiu a realização dos testes de forma separada, testando cada módulo no cumprimento de sua função.

Para testar o módulo de ventilação ligado ao inversor, foram variadas as frequência de 20 à 66Hz, utilizando o range total de vazão de ar do ventilador. Verificou-se, também, nos teste a existência de vazamentos pela tubulação, e o mesmo foi concertado. O módulo queimador foi testado alimentando-o com o gás GLP e controlando seu fluxo pelas válvulas manuais. Para medir a temperatura de saída utilizou-se o medidor digital de temperatura chegando a uma temperatura de 690°C , mostrando-se eficiente para o torrefador.

Para o testar a câmara de torrefação, partiu-se o motor com 3x mais carga de biomassa que seria utilizado (carga projetada de 3kg). A biomassa utilizada foi o pellets de pinus. Observou-se que no tamboreamento, o pellet estava caindo fora da câmara de torrefação por conta da entrada de ar quente na lateral do tambor ser muito maior que o pellet. Para corrigir este problema foi soldada uma placa perfurada, diminuindo a mistura da biomassa (Figura 17A/B).

Figura 17- Tambor de torrefação com adequação da abertura lateral.



A Câmara do queimado com escotilha aberta

B Câmara de torrefação

Fonte: O autor.

Após os testes e ajustes individuais de cada módulo, o equipamento foi testado de forma integral. O desafio foi estabelecer um protocolo de partida e um protocolo para finalizar o processo de torrefação. No entanto, conseguiu-se consistência à medida que foram realizados com repetição todos os passos de operação. Como exemplo; a frequência de 20hz do ventilador para acender o queimador. O resultado foi satisfatório. Conseguiu-se extrair e controlar as três variáveis mais importantes do processo de torrefação que são:

- Temperatura de torrefação;
- Tempo de residência;
- Taxa de aquecimento.

Pode-se observar as figuras 18 e 19 da montagem geral do protótipo de torrefação a seguir.

Figura 18- Testes de funcionamento do torrefador.



Fonte: O autor.

Figura 19- Testes de funcionamento do torrefador.



Fonte: O autor.

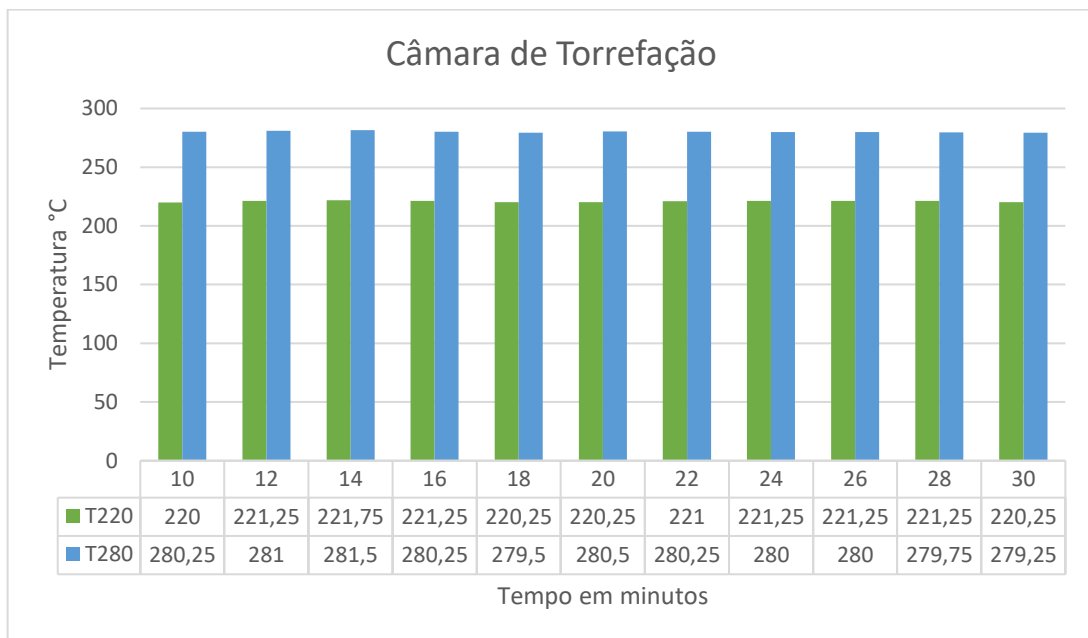
Após a montagem do equipamentos com todos os módulos foram realizados ensaios de torrefação, sendo aplicados 2 tratamentos com variação de temperatura ( $220^{\circ}\text{C}$  e  $280^{\circ}\text{C}$ ), sendo duas repetições para cada tratamento (Tabela 1 do item 1.2.1). A análise do efeito da torrefação nas propriedades dos pellets de madeira será avaliado no Capítulo II, ficando para esta capítulo a análise da eficiência do equipamento no processo de realização da torrefação.

Durante o processo de torrefação, a temperatura média foi de  $220,8^{\circ}\text{C}$  para T220 e  $280,2^{\circ}\text{C}$ , para T280 com taxa de aquecimento de  $15,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e 20 minutos de tempo de residência. A temperatura dentro da câmara de torrefação, no decorrer do tempo de residência

de 20 minutos, foi medida a cada 2 minutos. Para obter o valor médio, foi calculada a média de temperatura entre o termopar 1 e termopar 2 (T1 e T2). O T1 foi instalado na entrada da câmara do torrefador e T2 na saída.

Durante o tempo da torrefação a variação da temperatura dentro da câmara foi inferior a 2°C, tanto para o tratamento de 220°C, quanto para o tratamento de 280°C (Figura 20). Do ponto de vista experimental esta variação foi pequena, demonstrando a eficiência do equipamento em manter a temperatura determinada para a análise.

Figura 20- Variação da temperatura e tempo de torrefação ao longo da torrefação dos pellets de madeira



Fonte: O autor.

O protótipo, foi operado de forma manual, interferindo no processo principalmente no módulo queimador (mistura ar e combustível), a fim de garantir os parâmetros estabelecidos de tempo e temperatura.

No aspecto visual, houve nítida diferença de coloração do pellet *in natura* mais claro (Figura 21A) e o torrefado (Figura 21B) com tom mais escuro, obtido na torrefação com temperatura de 280°C.

Figura 21- Pellets in natura x Pellets torrefado.

A

B

*Pellets in natura.**Pellets torrefados à 280°C.*

Fonte: O autor.

Como o objetivo deste trabalho envolveu o desenvolvimento do equipamento de torrefação de biomassa, o seu desempenho operacional ou eficiência precisava ser avaliada. Ou seja, a razão entre a quantidade de energia gasta para processar uma determinada massa de biomassa e a energia, de fato, envolvida no processo de torrefação precisava ser determinada.

#### 1.2.4.5 Análise de Eficiência Térmica

A eficiência de um equipamento de torrefação é um parâmetro pouco estudado e, por isso, é difícil encontrar dados na literatura a seu respeito. Dado que o processo de torrefação de biomassa implica em centenas ou milhares de reações químicas endotérmicas e exotérmicas, determinar a quantidade de energia absorvida neste processo constitui a principal dificuldade para se determinar um método de cálculo de eficiência.

Tal dificuldade é a razão pela qual não existe um consenso sobre qual a técnica correta de se calcular a eficiência de um processo de torrefação. Contudo, é possível e desejável a proposição de métodos alternativos, indiretos e aproximados para o cálculo da eficiência. Tais métodos, ainda que aproximados, podem ser utilizados para a comparação de desempenho entre diferentes equipamentos e, portanto, constituir-se num parâmetro adequado para o monitoramento de uma evolução tecnológica. No presente trabalho, dois métodos de cálculo de eficiência foram propostos, baseados nas seguintes questões: Quais foram os pontos mais

eficientes do torrefador? Quais foram os problemas encontrados? Quais são os pontos positivos e negativos do sistema?.

### Método 1

Este método baseia-se na hipótese de que toda a perda de massa durante a torrefação deve-se à perda de umidade. Ou seja, assume-se que toda a parcela de massa relativa aos voláteis e gases é umidade. Desta forma, considerando que a variação de massa é umidade evaporada, torna-se possível calcular, ainda que de forma aproximada, a quantidade de energia absorvida no processo de torrefação. Então, conforme este método, a eficiência ( $\eta$ ) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\eta = \frac{\text{energia absorvida}}{\text{energia total gasta}} \quad (4)$$

sendo que,

$$\text{energia absorvida} = Q_{s1} + Q_{lat} + Q_{s2} \quad (5)$$

onde  $Q_{s1}$  [kJ] é o calor sensível para elevar a temperatura da biomassa da temperatura ambiente ( $T_a$ ) até a temperatura de vaporização na pressão atmosférica ( $T_{vap}=100^\circ\text{C}$ ) e que é calculada, portanto,

$$Q_{s1} = \Delta m * cp * (T_{vap} - T_a) \quad (6)$$

onde  $\Delta m$  é a variação de massa, considerada em sua totalidade como água e  $cp$  é o calor específico da água ( $cp = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$ ).

$Q_{s2}$  [kJ] é o calor sensível para elevar a temperatura da biomassa da temperatura de vaporização na pressão atmosférica ( $T_{vap}=100^\circ\text{C}$ ) até a temperatura de torrefação ( $T_{torr}$ ) e que é calculada pela equação 07,

$$Q_{s2} = \Delta m * cp * (T_{torr} - T_{vap}) \quad (7)$$

E  $Q_{lat}$  é o calor latente de vaporização à pressão atmosférica calculado portanto

$$Q_{lat} = \Delta m * h_{lv} - \text{Equação 8.0}$$

onde  $h_{lv}$  é a entalpia de vaporização da água ( $h_{lv} = 2257 \text{ kJ/kg}$ ).

Já a energia total gasta no processo é a soma das energias do GLP ( $Q_{GLP}$ ), do ventilador ( $Q_{vent}$ ) e do motoredutor ( $Q_{mot}$ ) consumidas ao longo do período total do processo,  $\Delta t$ .

$$\text{energia total gasta} = Q_{GLP} + Q_{vent} + Q_{mot} \quad (9)$$

Sendo que,

$$Q_{GLP} = m_{GLP} * PCI_{GLP} \quad (10)$$

onde  $m_{GLP}$  é a massa de GLP consumida e  $PCI_{GLP}$  é o poder calorífico inferior do GLP ( $PCI_{GLP} = 44000 \text{ kJ/kg}$ ).

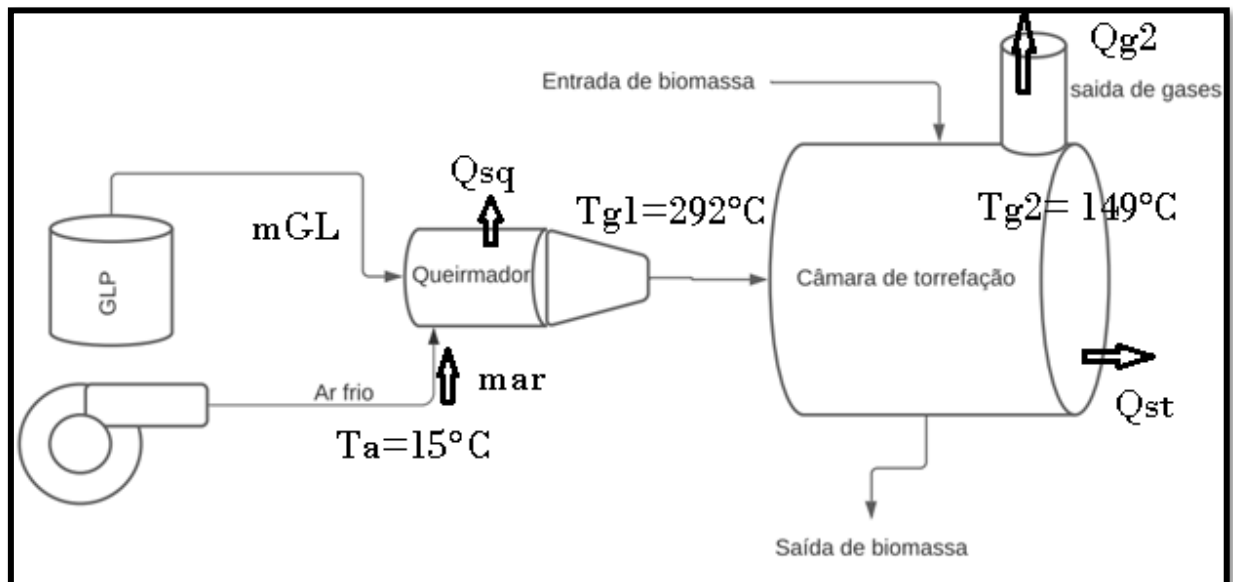
$$Q_{vent} = W_{vent} * \Delta t \quad (11)$$

onde  $W_{vent}$  é a potência efetiva do ventilador e

$$Q_{mot} = W_{mot} * \Delta t \quad (12)$$

onde  $W_{mot}$  é a potência efetiva do moto-redutor.

Figura 22- Esquema do projeto do queimador/misturador e dados de entrada



Fonte: O autor.

## Método 2

Já no método 2, a eficiência é calculada com base no somatório ( $\Sigma$ ) das perdas de calor que atravessam as fronteiras do equipamento, conforme a equação

$$\eta = \frac{\text{energia total gasta} - \Sigma \text{perdas de calor}}{\text{energia total gasta}} \quad (13)$$

A energia total gasta é calculada exatamente como no método 1.

$$\Sigma \text{perdas de calor} = Q_{SQ} + Q_{ST} + Q_{g2} \quad (14)$$

onde  $Q_{SQ}$  [kW] é a perda de calor ocorrida pela superfície do queimador,  $Q_{ST}$  [kW] é a perda de calor ocorrida pela superfície do tambor de torrefação e  $Q_{g2}$  [kW] é a perda de calor carregada com os gases de exaustão na saída do tambor de torrefação.

Os parâmetros  $Q_{SQ}$  e  $Q_{ST}$  são calculados por meio do modelo de resfriamento de parede, comumente usados em análises de transferência de calor por convecção.

$$Q_{SQ} = h_{SQ} * A_{SQ} * (T_{SQ} - T_a) \quad (15)$$

onde  $h_{SQ}$  [W/m<sup>2</sup>.K] é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural da superfície do queimador,  $A_{SQ}$  [m<sup>2</sup>] é a área superficial do queimador e  $T_{SQ}$  a temperatura superficial média da carcaça do queimador.

$$Q_{ST} = h_{ST} * A_{ST} * (T_{ST} - T_a) \quad (16)$$

onde  $h_{ST}$  [W/m<sup>2</sup>.K] é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural da superfície do tambor torrefador,  $A_{ST}$  [m<sup>2</sup>] é a área superficial do tambor torrefador e  $T_{ST}$  a temperatura superficial média da carcaça do tambor.

$$Q_{g2} = m_g * cp_g * (T_{g2} - T_a) \quad (17)$$

onde  $m_g$  [kg/s] é a vazão mássica dos gases,  $cp_g$  é o calor específico dos gases ( $cp_g = cp_{ar} = 1,007$  kJ/kg.K) e  $T_{g2}$  é a temperatura dos gases de exaustão na saída do tambor.

Porém, antes de se proceder com os modelos apresentados acima, é preciso, ainda, fazer algumas considerações sobre alguns parâmetros e cálculos preliminares.

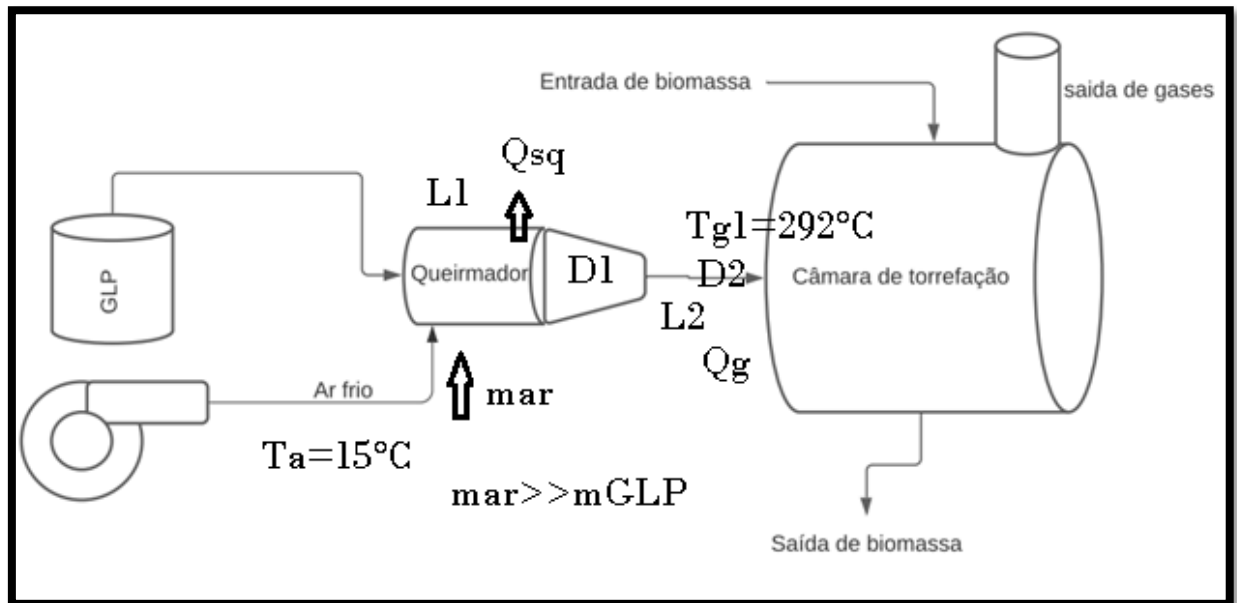
A primeira consideração a ser feita é sobre a vazão mássica dos gases quentes,  $m_g$ . Esta vazão é igual a soma da vazão mássica do ar de alimentação mais a vazão mássica do GLP consumido ao longo do processo. Ao longo dos experimentos realizados observou-se que a vazão de GLP é da ordem de  $10^{-4}$  kg/s, enquanto que a vazão de ar é da ordem de  $10^{-2}$  kg/s. Ou seja, como  $m_{GLP} \ll m_{ar}$ , então,  $m_g \sim m_{ar}$ . Isso implica que, além da vazão de ar poder ser



considerada como a vazão dos gases, também é possível assumir que as propriedades termo físicas dos gases são, aproximadamente, iguais as do ar.

A vazão mássica de ar será aqui avaliada por meio de um balanço de energia sobre o queimador.

Figura 23- Esquema do projeto do queimador/misturador e dados de entrada



Fonte: O autor.

Partindo-se da equação da 1ª Lei da termodinâmica e simplificando-a para o caso do esquema mostrado acima obtém-se a seguinte equação

$$q_{GLP} = q_{SQ} + q_{g1} \quad (18)$$

onde,  $q_{GLP}$  é a potência térmica liberada na queima do GLP, ou seja, é a potência térmica ou taxa de calor que entra no queimador. Ainda

$$q_{GLP} = \frac{m_{GLP}}{\Delta t} * PCI_{GLP} \quad (19)$$

onde  $m_{GLP}$  [kg/s] é massa de GLP consumida ao longo do experimento,  $\Delta t$  [s] é o período de tempo do experimento e  $PCI_{GLP}$  [kJ/kg] é o poder calorífico inferior do GLP.

O calor perdido pela superfície do queimador,  $q_{SQ}$ , já foi apresentado acima.

E  $q_{g1}$  [kW] representa a potência térmica que sai do queimador carregado pelos gases de combustão e é modelada pela seguinte equação,

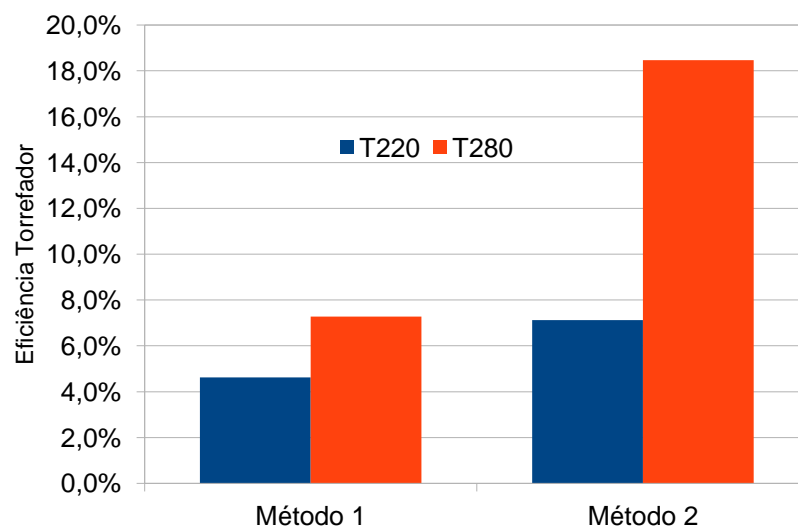
$$q_{g1} = m_g * cp_g * (T_{g1} - T_a) \quad (20)$$

Desta forma, aplicando-se as equações. 15, 19 e 20 dentro da equação 18 e resolvendo-a para  $m_g$ , obtêm-se a vazão mássica de ar. Uma vez que se conhece  $m_g$  é possível resolver a equação 17 e, por fim, resolver a equação 13 que fornece a eficiência do torrefador por meio deste segundo método de cálculo.

É importante, ainda, se fazer uma consideração a respeito dos coeficientes de transferência de calor  $h_{SQ}$  e  $h_{ST}$ . Como os experimentos foram realizados dentro do laboratório, sem correntes de ar, considerou-se que os processos de transferência de calor por convecção nas superfícies do queimador e do tambor podem ser enquadrados como convecção natural. Fazendo uma avaliação do coeficiente de transferência de calor por convecção natural combinado à parcela relativa à radiação de calor nas superfícies mencionadas, encontra-se um coeficiente com valor aproximado de  $h_{SQ} = h_{ST} \sim 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . As áreas das superfícies do queimador e do tambor,  $A_{SQ}$  e  $A_{ST}$ , são calculadas com base na geometria cilíndrica.

Aplicando os dois métodos, chegou-se aos resultados da eficiência do torrefador para cada temperatura testada nos tratamentos T220(220°C) e T280(280°C). No método 1 tem-se: 4,6% e 7,1% para 220°C e 280°C respectivamente, e o método 2 tem-se: 7,3% e 18,5% para 220°C e 280°C respectivamente. Na figura 24 pode-se observar os resultados entre métodos.

Figura 24- Gráfico da eficiência do protótipo de torefação de biomassa para temperaturas de operação de 220° e 280°C .



Fonte: O autor

Foi possível observar que o torrefador teve melhor eficiência em maior temperatura. Isso se justifica porque a energia total gasta para entrar em regime é muito próxima de ambas as

temperaturas. O consumo de energia elétrica e de gás GLP é pouco significativo, já a energia absorvida para cada tratamento é maior quando comparados a perda de massa (método1).

### **1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A trajetória do capítulo foi atender o objetivo específico: Desenvolver, fabricar e avaliar a eficiência de um protótipo para torrefação de biomassa florestal. Neste desenvolvimento além do desafio técnico e intelectual, houve o de gerir os recursos: de tempo, econômicos e tecnológicos.

A metodologia PDP foi de grande auxílio, contribuindo para um curso definido e planejado do projeto, sem grandes reviravoltas, norteando a utilização desses recursos. Utilizou-se em alguns componentes do protótipo materiais reutilizáveis, como tambor de óleo de 200 litros, cesto inoxidável de máquina de lavar roupas, diminuindo o custo e dando novo uso a essas materias.

Contudo a proposta do capítulo, foi ousada, haja vista que desenvolver, fabricar e testar um equipamento específico é um grande desafio, mas o ganho de conhecimento e a contribuição científica são muito compensadores.

#### **1.3.1 Quanto à metodologia do projeto**

A metodologia do PDP utilizada no capítulo fez com que o trabalho tomasse corpo, trazendo consistência a cada etapa. Isso por se tratar de uma metodologia amplamente consolidada e difundida na engenharia mecânica. A metodologia é: de aplicação ampla, de vários níveis hierárquicos de uma empresa, com várias ferramentas para a mesma etapa. Isso exigiu uma interpretação e adaptação da metodologia ao projeto, sendo de fundamental importância para o resultado final.

Desta forma, a metodologia se tornou muito adequada ao projeto, com uma avaliação muito positiva. A fase mais difícil do projeto foi a inicial, a qual compreende o projeto informacional e conceitual, pois foi onde as primeiras decisões foram tomadas e onde se tinha menos informações técnicas sobre elas. O projeto detalhado na fase final foi o mais empolgante, pois era mais visível, prático, foi onde se fabricou e testou o protótipo.

Por fim, no contexto geral, a metodologia oportuniza muitas possibilidades. Cabe aos envolvidos do projeto decidir e adaptar as melhores opções para seu projeto. Uma recomendação é o envolvimento do maior número possível de especialistas em cada etapa do método, aumentando a assertividade das decisões.

### **1.3.2 Quanto ao projeto conceitual**

No projeto conceitual, a criatividade foi posta à prova. O conhecimento tácito da equipe de projeto também foi fundamental, porque a partir das especificações geradas no projeto informacional, definiu-se as funções do protótipo, e assim, a cada uma delas criou-se soluções. Dentre as soluções possíveis se decidiu pelas mais adequadas, sendo os principais critérios: os econômicos, tempo de execução e recursos tecnológicos disponíveis.

Portanto, gerou-se uma concepção, um conceito do protótipo de torrefação juntando todas as funções em uma única função global. Essa etapa ficou marcada pela forma de adequação das funções necessárias com os recursos disponíveis, buscando-se a melhor relação de custo x benefício.

### **1.3.2 Quanto ao detalhamento do projeto**

O projeto detalhado, foi onde tudo tomou forma, a fabricação propriamente dita se concretizou. O protótipo de torrefação foi construído com a seguinte especificação técnica:

- Sistema de funcionamento por batelada;
- Câmara de torrefação por tamboreamento;
- Capacidade de carregamento de 3Kg;
- Acionamento da câmara de torrefação com motor elétrico de 1CV e redutor 40:1;
- Queimador a gás GLP;
- Válvula de regulagem manual de gás;
- Medição de temperatura com dois termopares cerâmico tipo K;
- Medidor digital de temperatura;
- Ventilador elétrico de 245W;
- Controle e acionamento do ventilador por inversor de frequência CFW100;
- Alimentação manual por escotilhas;
- Controle de tempo e temperatura operado manualmente;

Observou-se nos testes de funcionamento que a fabricação realizada em módulos separados (módulo de ventilação, módulo queimador e módulo de torrefação), foi um ponto positivo do projeto. Primeiramente, os testes foram ajustados em separado, garantindo o desempenho adequado de cada módulo e, permitindo a realização dos ajustes necessários. O conjunto mecânico do protótipo se mostrou robusto com pleno funcionamento e nenhuma avaria ao longo de sua utilização sendo composto de: conjunto de mancais, estrutura tubular, sistemas de abertura e fechamento, misturadores de biomassa e mistura de gás/ar. Outro ponto positivo foi sua mobilidade que foi obtida com a instalação de rodízios em cada módulo, facilitando assim o deslocamento do protótipo.

Já os pontos negativos do protótipo foram: operação de controle de temperatura e tempo manual; aquisição de dados manual, e queimador a gás GLP. À primeira vista, a escolha do queimador por gás GLP que se trata de um combustível fóssil, conceitualmente vem na contramão da proposta do projeto, mas foi fundamental nesta pesquisa para que se tivesse um nível ideal de controle da chama do queimador, pois a temperatura no processo de torrefação é o principal parâmetro de controle do processo, além da taxa de aquecimento e tempo de residência que estão diretamente ligados ao conjunto queimador.

Portanto, a escolha do combustível por gás GLP foi apropriada para o projeto, sem inviabilizar a possibilidade de melhoria do sistema, por meio do desenvolvimento de um queimador que utilize a própria biomassa torrefada, tornando assim o torrefador alto sustentável em energia térmica. Os controles: de tempo, temperatura e taxa de aquecimento também sugerem uma automatização, garantindo um melhor desempenho e confiabilidade de operação.

Por fim, o detalhamento do projeto teve êxito no desenvolvimento das especificações dos sistemas do protótipo, atendendo o objetivo proposto.

### **1.3.3 Quanto à eficiência do torrefador**

Como já mencionado anteriormente, a avaliação da eficiência parte de algumas definições aproximadas, o que trás incertezas de medições comuns a todos os métodos. O desenvolvimento de métodos alternativos para sistemas de torrefação são fundamentais para o avanço do desenvolvimento futuro, conhecendo seu comportamento e aprimorando seu desempenho.

Por fim, a eficiência do protótipo pelas suas características físicas derivadas de sua aplicação foi boa, mas ao mesmo tempo oportuniza melhorias futuras, como a utilização de isolamento térmico do protótipo afim de minimizar a perda de calor, substituir o combustível do queimador GLP, utilizando a própria biomassa torrefada no equipamento.

## CAPÍTULO 2

### 2.AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA PROCESSADA NO PROTÓTIPO DE TORREFAÇÃO.

#### 2.1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas vivenciamos um período de grande industrialização, no Brasil e nos demais países. Este crescimento acentuado só foi possível, primeiramente, pelo aumento da capacidade de fornecimento de energia, independentemente de sua origem. No entanto, o sentimento de que vale a pena crescer a qualquer custo parece ter sido alterado, e, atualmente, já podemos notar preocupações reais quanto à necessidade de um crescimento sustentável, que se faça valer dos recursos naturais sem impactar demasiadamente o meio ambiente (SEGURA, 2012).

Assim, a bioenergia, obtida por meio da conversão da biomassa, matéria vegetal gerada por meio da fotossíntese, e seus derivados tais como: produtos florestais e agrícolas, resíduos animais, resíduos orgânicos industriais e urbanos, vem sendo explorada pelo mercado brasileiro, para produção de energia limpa (SILVA *et al.*, 2017).

No entanto, o uso da biomassa *in natura* pode dificultar a produção de energia, pois na grande maioria dos casos, sua densidade é baixa e o teor de umidade é elevado. Assim, a compactação do material, aumenta sua densidade, resistência mecânica, poder calorífico e valor comercial (FERNANDEZ *et al.*, 2017).

Neste contexto, a compactação dos resíduos é uma maneira eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa, pois adensa os resíduos da biomassa em uma forma definida, convertendo-a em um material de maior valor comercial. O processo de compactação é recomendado, pois aumenta a densidade, minimiza a grande variedade de formas e granulometria dos resíduos lignocelulósicos (FERNANDEZ *et al.*, 2017).

Os *pellets* e briquetes são bons exemplos do processos de densificação da biomassa, que transformam fisicamente o material lignocelulósico particulado em um biocombustível sólido. Os *pellets* foram criados visando à demanda por um novo tipo de combustível compactado, com facilidade de armazenamento e transporte, alta densidade energética, e principalmente na queima em modernos equipamentos (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

Atrelado a isso, as vantagens da compactação de biomassa pode ser intensificada pelo processo de torrefação que submete o material lignocelulósico a temperaturas de 200- 300C°, o processo termoquímico degrada principalmente as hemiceluloses e permite a concentração do

carbono, aumentando, assim, o poder calorífico do combustível. Salienta-se, que a torrefação torna-se viável, pois seu transporte, manuseio e armazenagem é facilitado pela compactação da biomassa (FELFLI *et al.*, 2000).

Contudo, a peletização aliada com a torrefação da biomassa melhorara a eficiência energética dos pellets em equipamentos industriais. Desta forma, unir os dois processos de transformação de resíduos em energia pode ser uma grande vantagem para que o biocombustível sólido produzido seja competitivo frente aos combustíveis não renováveis que atualmente têm maior participação no setor industrial (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

Considerando que o Brasil possui abundância e diversidade de biomassa, o desenvolvimento de um protótipo de torrefação têm o desafio técnico de elevar a qualidade da biomassa, aumentando seu poder calorífico, por meio do uso de um equipamento de baixo custo e acessível, tanto a pequenos como médios produtores e usuários da biomassa energética. Além disso, as propriedades físico-químicas da biomassa torreficada, tais como durabilidade, homogeneidade, comportamento hidrofóbico, e atividade biológica, também serão melhoradas.

Portanto, o objetivo deste capítulo foi avaliar a qualidade da biomassa torrefada no protótipo, por meio da caracterização física e energética da biomassa, quando submetida a diferentes temperaturas de torrefação.

## **2.2 METODOLOGIA**

Na torrefação da biomassa, foi utilizado *pellet Pinus* de 6 mm de diâmetro, que foi peneirado com peneira NBR 3,35 mm para separação dos finos, antes do processo de torrefação. Os pellets foram produzidos no Laboratório de Energia de Biomassa da Universidade do Estado de Santa Catarina, utilizando maravalha de *Pinus* oriunda de uma indústria de portas da região.

O processo de torrefação no protótipo foi realizado por batelada com carregamento de 3kg *pellets de Pinus sp*, tempo de residência de 20 minutos e taxa de aquecimento de 15,5°C/min. Foram realizados o total de 2 tratamentos, com 2 repetições cada (Tabela 12).



Tabela 12- Delineamento experimental dos ensaios de torrefação de pellets de Pinus em um protótipo de torrefador.

<b>Dados de Avaliação</b>				
Biomassa	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Tempo de residência	Tempo total
<i>Pinus sp.</i>	<i>in natura</i> (Testemunha)	X	X	X
	220,8 (T1)	15,5°C/min	20min	30min
	280,2 (T2)	15,5°C/min	20min	34min

Fonte: O autor.

O processo de torrefação iniciou-se em temperatura ambiente e com umidade dos pellets de 8%, na base úmida. A torrefação foi realizada em ambiente atmosférico, sem secagem do material, assim avaliou-se os resultados em condições naturais com a influência do oxigênio, se aproximando de uma aplicação com maior viabilidade em sistemas de pequeno porte para geração de energia, não havendo controle sobre a concentração de ar na câmara de torrefação. Estabeleceu-se um protocolo de operação para o protótipo obedecendo três principais variáveis do processo: temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento.

Antes do processo de torrefação (na testemunha) e após cada tratamento realizado (T1 e T2), as propriedades físicas e energéticas dos pellets foram analisadas (Tabela 13).

Tabela 13- Análises das propriedades físicas e energeticas realizadas nos pellets de Pinus antes e após o processo de torrefação

Análises Laboratoriais			
Propriedades	Análise	Norma	Repetição
<i>Físicas</i>	Perda de massa	Descrita no texto	100g
	Densidade aparente unitária	EN 16127 (CEN, 2012)	100g
	Umidade	NBR 14929 (ABNT,2017)	4
	Umidade de equilíbrio	Descrita no texto	5
<i>Energéticas</i>	Densidade a granel	Descrita no texto	6
	Poder calorífico superior e líquido	DIN 51900 (DIN2000)	4
	Análise imediata	ASTM 1762 (ASTM, 2007)	3
	Análise termogravimétrica (TGA)	Descrita no texto	3
	Densidade energética	Descrita no texto	-

Fonte: autor.

Após a torrefação dos *pellets*, para determinar a perda de massa, a densidade aparente unitária e teor de umidade foram selecionados aleatoriamente 100 pellets de cada tratamento, mensuradas as dimensões de cada pellet (comprimento e diâmetro) com a utilização de um paquímetro digital, a fim de calcular o volume inicial de cada pellet. Para determinar a massa, o material foi pesado em balança analítica de precisão 0,0001 g. Para a determinação da perda de massa se utilizou a Equação 04:

$$Pm = \left( \frac{dt-df}{dt} \right) * 100 \quad (21)$$

Onde:

$Pm$  = Perda de massa (%);

$dt$  = densidade *in natura* (testemunha) kg/m<sup>3</sup>;

$df$  = densidade final torrefado kg/m<sup>3</sup>;

Após a peletização e após a torrefação, os pellets foram acondicionados em câmara climatizada em recipientes plásticos fechados em condições de 22°C e 65% de umidade relativa do ar.

Para a determinação da densidade a granel dos pellets, foi utilizado um recipientes com volume de 250 cm<sup>3</sup>, sendo realizadas seis repetições de cada tratamento. Após o preenchimento do recipiente até a marca do volume, adotou-se o procedimento de 10 giros com ¼ de volta sentido horário e anti-horário, a fim de acomodar-se as partículas até o preenchimento do volume do recipiente. Cada repetição foi pesada em balança de precisão de 0,001 g e estabelecida a relação entre massa e volume para o cálculo da densidade a granel dos pellets.

A densidade energética unitária e a granel dos pellets foi calculada com base na densidade e poder calorífico dos pellets conforme equações 22 e 23 respectivamente:

$$DEu = DAu \times PCS \quad (22)$$

Onde:

$DEu$  = densidade energética unitária (kcal/m<sup>3</sup>);

$DAu$  = densidade aparente unitária (kg/m<sup>3</sup>);

$PCS$  = Poder calorífico superior (kcal/kg);

$$DEg = Dg \times PCS \quad (23)$$

Onde:

$DEg$  = densidade energética a granel (kcal/m<sup>3</sup>);

$Dg$  = densidade a granel (kg/m<sup>3</sup>);

$PCS$  = Poder calorífico superior (kcal/kg);

Foi realizada a análise da umidade de equilíbrio, pois o processo de torrefação sugere como vantagem a redução de higroscopicidade da madeira (HAKKOU *et al.* 2006; VAN DER STELT *et al.*, 2011). Para esta análise foram realizadas cinco repetições para cada tratamento.

A análise de dessorção e adsorção de umidade foi conduzido em câmara climatizada, com condições controladas: temperatura 22°C e umidade relativa do ar de 65%. Cada repetição consistiu em uma massa de 30 g ± 0,2 g de pellets, colocada em uma placa de petri.

Cada repetição foi pesada em balança analítica de precisão de 0,0001g, antes de ser colocada na câmara climatizada, e a cada 24 horas por dez dias consecutivos, quando foi possível constatar que a massa das amostras estava constante. O experimento foi extendido até o décimo quinto dia, quando as amostras foram submetidas a determinação da umidade final, em estufa a  $103 \pm 2$  °C.

A análise da composição química imediata foi realizada em balança termogravimétrica, com temperatura de 900°C para a determinação do teor de voláteis e 700°C para o teor de cinzas.

Para realização das análises termogravimétricas foi utilizada uma balança termogravimétrica modelo TGA 2000 (Automatic Multiple Sample Termogravimetric Analyser), marca NAVAS Instruments, com capacidade para análise de 19 amostras de forma simultânea, sendo três repetições para cada tratamento. O ensaio foi realizado com ar atmosférico. A taxa de aquecimento utilizada foi de 20°C/min, desde a temperatura ambiente até 1000°C. Com os dados dos ensaios foram construídas as curvas termogravimétricas (TG) para a perda de massa em função da temperatura e a curva da derivada primeira da perda de massa (DTG) para avaliar a velocidade de perda de massa.

Os resultados finais foram apresentados na forma de gráficos cuja abscissa é referente a temperatura (T) e a ordenada, massa (M), sendo muitas vezes difícil extrair o ponto exato da perda de massa, pois não é sempre abrupta, mas sim, suave em muitos casos. Portanto, a prática encontrada é a sobreposição da curva de DTG no mesmo gráfico, que representa a derivada da primeira curva, ou seja,  $dM/dT$ , sendo considerada a temperatura de eliminação do pico.

Para a análise estatística foi considerado um delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos e variação no número de repetições dependendo da análise realizada. Para a comparação múltipla das médias utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância. Para estabelecer o nível de correlação entre a densidade da unidade dos pellets x densidade energética da unidade, densidade a granel x densidade energética a granel e poder calorífico superior x densidade energética da unidade ou densidade energética a granel foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Pearson e aplicado o Teste de significância a um nível de probabilidade de 0,05.

### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A perda de massa média dos *pellets* foi de 5,7% e 9,9% nas temperaturas de 220°C e 280°C, respectivamente. Protásio *et al.* (2015) encontraram uma perda de massa de 2,4% e 7,8% dos pellets de *Pinus* sp. torrefados a 220 °C e 250 °C, respectivamente. Peng *et al.* (2014) encontraram perda de 21,6% de massa para pellets de *Pinus* sp. torreficados a 270 °C. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho foram intermediários aos trabalhos publicados.

É importante ressaltar que alguns aspectos diferem entre os experimentos: tempo de residência, temperatura, equipamento, ambiente de torrefação, taxa de aquecimento, e que cada um deles bem como o conjunto experimental influenciam nos resultados obtidos na torrefação. O tempo de residência influencia principalmente na degradação das hemiceluloses, parte da biomassa mais reativa durante a torrefação, enquanto a celulose apresenta limitada perda de massa quando se utiliza tempos de reação curtos (menores que 30 minutos) (BERGMAN *et al.*, 2005).

Na tabela 14 encontram-se os resultados da influência da torrefação nas dimensões e densidade unitárias dos pellets.

Tabela 14- Dimensões e densidade unitária dos pellets de *Pinus* em função do processo e temperatura de torrefação

<i>Tratamento</i>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa(g)</b>	<b>Densidade da unidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>in natura</i>	6,38 a	18,40 a	589,35 a	0,718 a	1217,35 a
220,8°C	6,25 b	12,76 c	391,53 b	0,450 b	1147,73 b
280,2°C	6,18 c	13,53 b	405,44 b	0,444 b	1096,26 c
CV (%)	2,06	15,72	15,79	17,10	3,51

Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%)

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

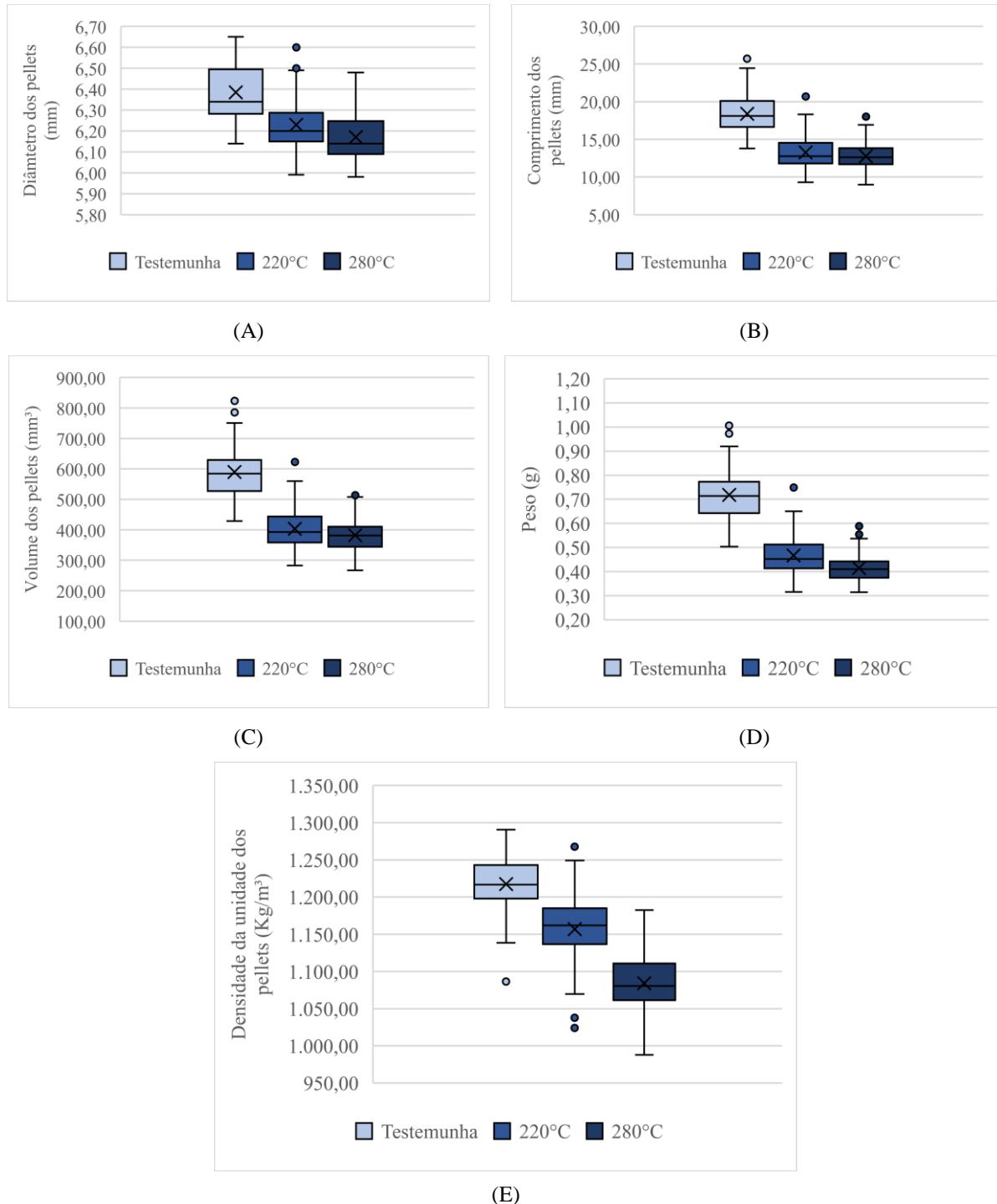
Fonte: O autor

A temperatura de torrefação reduziu significativamente o diâmetro dos pellets, o volume, massa e densidade da unidade dos pellets. Para o diâmetro e densidade da unidade, a temperatura foi inversamente proporcional às dimensões, ou seja, quanto maior a temperatura, menores foram as medidas obtidas.

As variações observadas entre as medidas obtidas para comprimento, massa e volume também foram menores entre os pellets que foram submetidos à torrefação (Figura 25),

indicando que este tratamento térmico contribui para a homogeneização das dimensões dos compactados.

Figura 25- Amplitude das dimensões e densidade unitária dos pellets de Pinus em função da temperatura de torrefação.

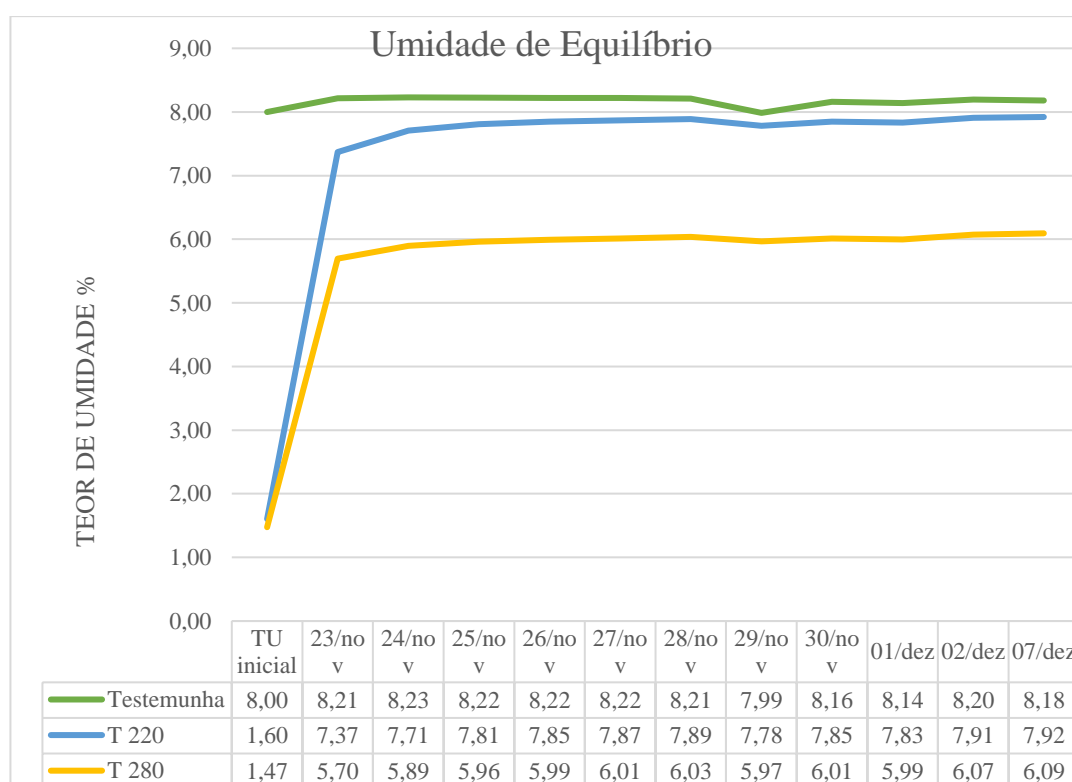


Fonte: O autor

Na análise da umidade de equilíbrio observou-se que os pellets torrefados chegaram ao equilíbrio com umidade inferior aos *pellets in natura* (testemunha). Da mesma forma que para as dimensões, quanto maior a temperatura, menor foi a umidade de equilíbrio final dos pellets.

O tratamento de 280°C atingiu o equilíbrio com 25% menos de umidade que a testemunha, evidenciando a redução da higroscopicidade dos pellets torrefados. O resultado é importante em todo contexto energético, pois melhora as condições de armazenamento e transporte dos *pellets* torrefados. A Figura 26 demonstra o comportamento ao longo do tempo da umidade em cada tratamento e testemunha.

Figura 26- Variação da umidade de equilíbrio dos pellets de Pinus em câmara climatizada em função da torrefação



Fonte: O autor

No entanto, para uma análise mais apurada da influência da torrefação na qualidade energéticas dos pellets, a umidade dos pellets antes e após o processo de torrefação foram analisadas de forma conjunta com o poder calorífico dos pellets (Tabela 15).

Tabela 15- Relação em entre o teor de umidade e o potencial energético dos pellets até umidade de equilíbrio dos pellets antes e após o processo de torrefação.

Tratamento	Poder calorífico superior (Kcal/kg)	Teor de umidade inicial <sup>1</sup>	Poder calorífico líquido inicial (Kcal/kg)	Teor de umidade de equilíbrio (UE - %) <sup>2</sup>	Poder calorífico líquido na UE (Kcal/kg)
<i>in natura</i>	4936 a	8,00 a	4195 c	8,18 a	4185 b
220,8°C	4844 b	1,61 b	4438 b	7,92 b	4115 b
280,2°C	4946 a	1,47 b	4546 a	6,09 c	4304 a
CV(%)	1,13	10,51	1,42	3,11	1,46

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%). UE: Umidade de equilíbrio. 1: teor de umidade inicial na testemunha é o teor de umidade, antes do processo de torrefação; Teor de umidade nas temperaturas de torrefação é o teor de umidade após torrefação, antes da colocação em câmara climatizada. 2: Teor de umidade dos tratamentos após estabilização da umidade em câmara climatizada (T= 22°C e UR= 65%).

Fonte: O autor

O poder calorífico superior dos pellets torrefados à temperatura de 280°C foi estatisticamente semelhante aos pellets *in natura*, e 220°C foi inferior ao pellet não tratado termicamente, indicando que a torrefação não contribui para o aumento do poder calorífico dos compactados. Esperava-se um ganho acima de 300kcal/kg, de diferença para que do ponto de vista prático energético tivesse relevância (BRAND, 2010).

O experimento foi realizado em ambiente atmosférico, sem utilização de reatores isolando parte do oxigênio, ou câmaras com gases inertes. Portanto, a condição atmosférica pode ter interferido em uma menor concentração do carbono e maior concentração de oxigênio, o que influencia no poder calorífico superior (PROTÁSIO *et al.*, 2015)

A torrefação ocorre sob atmosfera inerte para evitar a combustão e a interação adicional dos voláteis oriundos do processo com o vapor, ar ou outro gás da atmosfera de trabalho (NEVES *et al.*, 2011). No entanto, a pesquisa teve um viés de aplicação prática, afim de avançar no desenvolvimento do processo de torrefação para uso em sistemas de geração de energia de pequeno porte, atrelado a uma mini planta de geração de energia.

No entanto, a umidade teve uma redução significativa dos *pellets* torrefados em relação ao *in natura*, mais de 80%. A hemicelulose é a primeira molécula a se degradar na torrefação em temperatura de (220 - 315 °C) (PRINS *et al.*, 2006; YANG *et al.*, 2007) e são elas também as principais responsáveis pela adsorção de água (PRINS *et al.*, 2006). Para fins energéticos, a



redução de água no biocombustível é essencial, pois reflete diretamente no poder calorífico líquido.

Neste contexto, quanto maior a temperatura de torrefação, maior foi o poder calorífico líquido obtido para os pellets (Tabela 15) logo após o processo de torrefação. Após o ensaio de estabilização da umidade (umidade de equilíbrio), o poder calorífico líquido foi significativamente maior somente para a temperatura de 280°C, indicando que o ganho energético ocorre somente se o uso do pellet torrefado for imediatamente posterior à torrefação.

A outra estratégia de análise do potencial energético da torrefação foi o cálculo da densidade energética dos pellets, tanto das unidades de pellets como em relação a sua densidade a granel (Tabela 16).

Tabela 16- Densidade energética dos pellets de Pinus submetidos a diferentes temperaturas de torrefação

Tratamento	Poder calorífico superior (Kcal/kg)	Densidade da unidade (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade energética da unidade (Gcal/m <sup>3</sup> )	Densidade energética a granel (Gcal/m <sup>3</sup> )
<i>in natura</i>	4936 a	1217,35 a	701,85 a	6,01 a	3,46 a
220,8°C	4844 b	1147,73 b	699,14 a	5,56 b	3,39 b
280,2°C	4946 a	1096,26 c	663,02 b	5,42 c	3,28 c
CV(%)	1,13	3,51	1,03	1,13	1,12

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

Fonte: O autor

A densidade unitária aparente e energética foram superiores nos *pellets in natura*, devido à perda de massa dos *pellets* submetidos a temperaturas de 220 e 280°C, além do poder calorífico superior ter valores muito próximos entre os tratamentos. Tanto para a densidade energética unitária quanto a granel, quanto maior a temperatura de torrefação, menor foi a densidade energética.

A correlação entre a densidade do compactado e a densidade energética foi significativa somente para a densidade da unidade, onde o  $r = 0,98$ , para o coeficiente de Pearson. Já a correlação entre a densidade a granel e a densidade energética, apesar de ser  $r = 0,93$ , não significativa ( $\alpha=0,05$ ).

A densidade energética é um parâmetro importante para o biocombustível na geração de energia, ela representa a quantidade de energia liberada na queima completa em dado volume do combustível. Densificar resíduos agroflorestais, concentra sua a energia, transformando

materiais de baixa densidade em combustíveis com alto valor energético com menor volume, contribuindo para logística energética e uso desses resíduos como fonte de energia (BRAND, 2010).

O *pellet in natura* teve um valor superior de densidade energética, muito mais em função da perda de massa e redução das dimensões ocorrida na torrefação, que afetou o volume e por consequência a densidade dos compactados, do que das alterações ocorridas no poder calorífico dos compactados.

Faria *et al.* (2016) obtiveram 1150 kg/m<sup>3</sup> de densidade aparente unitária para *pellets* de madeira de eucalipto. Valores próximos aos *pellets* de *pinus* encontrados neste trabalho.

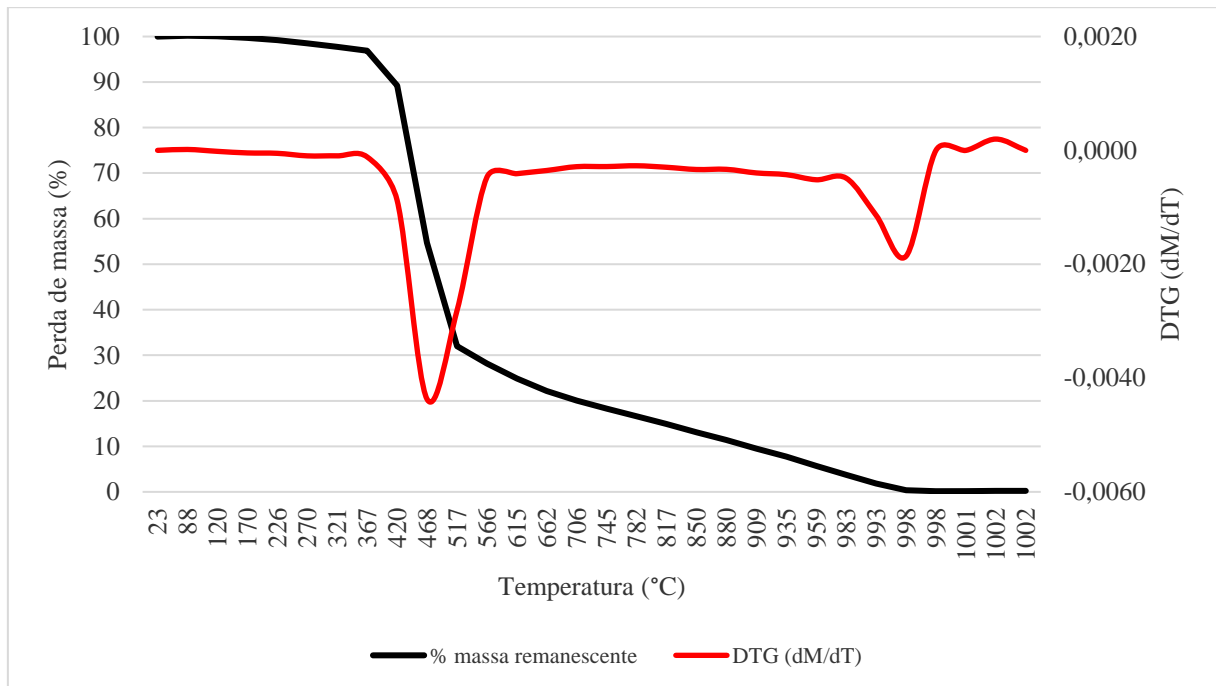
No mesmo viés, a densidade a granel é outro parâmetro importante se tratando de transporte do biocombustível. É desejável obter maiores valores de densidade a granel, pois custos de transportes viabilizam sua utilização em larga escala. Quanto mais denso for o biocombustível mais energia por volume transportado (STELTE *et al.*, 2011).

A densidade a granel dos pellets torrefados a 220°C foi similar aos não torrefados, enquanto o tratamento com 280°C foi significativamente menor. Peng *et al.* (2014) em pesquisa sobre efeito da torrefação de *pellets* de madeira observaram uma redução de 40% da densidade a granel após torrefação dos *pellets*, reduzindo de 630 kg m<sup>-3</sup> para 380 kg m<sup>-3</sup>. A redução da densidade a granel foi de 1% e 6% para os *pellets* torrefado para 220°C e 280°C, respectivamente.

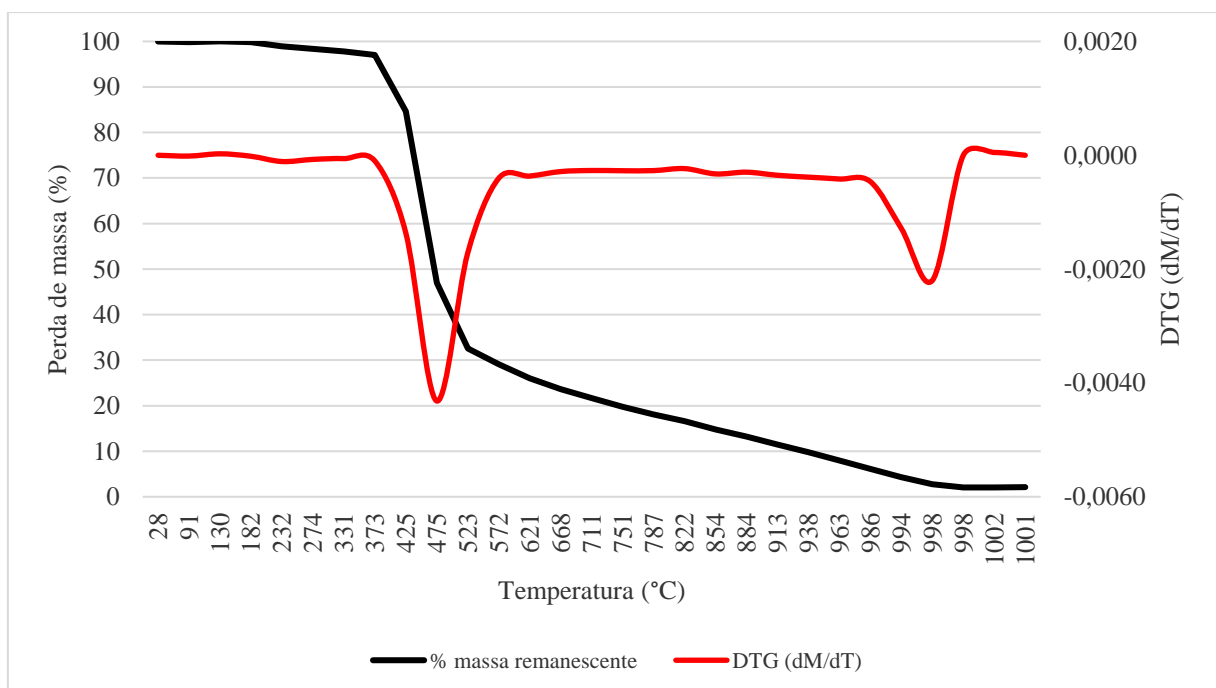
Protásio *et al.* (2015) encontraram para densidade energética a granel 3,07 Gcal m<sup>-3</sup>, para *pellets* de *Pinus sp in natura*, e 3,27 Gcal m<sup>-3</sup> para o pellet torrefado a 280°C. O comportamento neste trabalho foi o oposto. A explicação deste fenômeno pode estar no tempo de residência da torrefação ou nas variáveis experimentais aplicadas a cada estudo.

O comportamento médio de degradação térmica (Tg e DTG) dos pellets *in natura* e que passaram pelo processo de torrefação está apresentada graficamente na Figura 27.

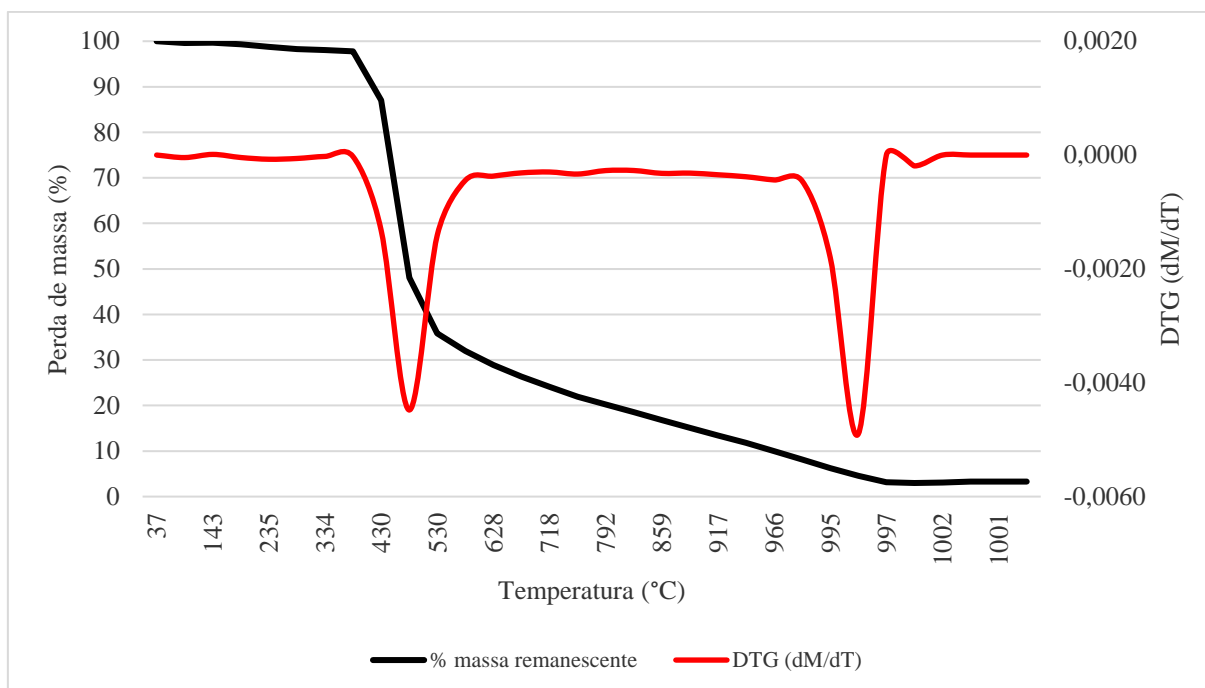
Figura 27- Comportamento da perda de massa (Tg) e velocidade da perda de massa (DTG) dos pellets de Pinus em função da temperatura de torrefação.



(A) Pellets de *Pinus in natura*



(B) Pellets de *Pinus* torrefados em temperatura de 220°C



(C) Pellets de *Pinus* torrefados em temperatura de 280°C

Fonte: O autor

As variações observadas nas temperaturas de pico da degradação térmica (Tabela 17), indicam as principais variações no comportamento térmico foram observadas na temperatura de início de perda de massa (IPM), no ponto de emissão e ignição dos voláteis (PEI) e na temperatura de início de degradação do carbono fixo (DCF). Os pellets *in natura* iniciaram a perda de massa em temperatura maior, em comparação com os pellets torrefados, a emissão e ignição dos voláteis ocorreu em temperatura maior para os pellets tratados com 280°C em comparação com os outros tratamentos, bem como a temperatura de início a degradação do carbono fixo foi maior, quanto maior foi a temperatura de torrefação.

Quanto à temperatura na qual a velocidade de perda de massa é maior (DTG) (Tabela 17), foram indicadas as duas temperaturas dos picos mais importantes dos gráficos (P1 e P2). O P1 ocorreu em todos os casos durante a queima dos voláteis, havendo diferença significativa entre os tratamentos, ocorrendo em maior temperatura, quanto maior a temperatura de torrefação. O P2 ocorreu no final do processo de degradação térmica, onde já estava ocorrendo à estabilização da massa, sendo que neste ponto os três tratamentos tiveram o pico em temperaturas similares.

Tabela 17- Temperaturas de degradação térmica dos pellets em função da temperatura de torrefação.

Tratamento	Temperatura (°C)						DTG (P1)	DTG (P2)
	IPM	PEI	PQV	DCF	EM			
Testemunha	200 a	368 b	446 a	518 c	1002 a		470 c	1000 a
220°C	136 b	375 b	439 a	524 b	1002 a		477 b	998 a
280°C	96 b	388 a	447 a	534 a	1002 a		484 a	998 a
CV	27,72	1,00	6,33	0,58	0,09		0,54	0,10

Legenda: IPM: Ponto de início de perda de massa; PEI: Ponto de emissão e ignição dos voláteis; PQV: Ponto de início de queima dos voláteis; DCF: Ponto de início de degradação do carbono fixo; EM: estabilização da massa remanescente; DTG: Temperatura de maior velocidade de perda de massa; P1: ponto 1; P2: ponto 2.

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

Fonte: O autor

Com relação aos percentuais médios da massa remanescente em cada temperatura de pico (TG) (Tabela 18), as variações entre os tratamentos ocorreram no início da perda de massa (IPM) e no início da degradação do carbono fixo (DCF). No início da perda de massa, os pellets tratados com 280°C perderam mais massa, porém tinham mais massa remanescente na temperatura em que se iniciou a degradação do carbono fixo dos pellets.

Tabela 18- Massa remanescente nos principais pontos de perda de massa, na degradação térmica dos pellets em função da temperatura de torrefação.

Tratamento	Massa remanescente (%)				
	IPM	PEI	PQV	DCF	EM
Testemunha	99,78 a	97,40 a	72,74 a	32,04 b	0,47 a
220°C	99,76 a	97,07 a	75,64 a	32,02 b	1,41 a
280°C	99,42 b	97,72 a	76,01 a	34,68 a	2,41 a
CV	0,14	0,58	26,63	3,53	48,73

Legenda: IPM: Ponto de início de perda de massa; PEI: Ponto de emissão e ignição dos voláteis; PQV: Ponto de início de queima dos voláteis; DCF: Ponto de início de degradação do carbono

fixo; EM: estabilização da massa remanescente; DTG: Temperatura de maior velocidade de perda de massa; P1: ponto 1; P2: ponto 2.

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

Fonte: O autor

Além da degradação térmica, a composição química imediata dos pellets, antes e após a torrefação (Tabela 19) variou em função da temperatura de torrefação empregada.

Tabela 19- Composição química imediata dos pellets em função da temperatura de torrefação.

<i>Tratamento</i>	<b>Materiais voláteis (%)</b>	<b>Teor de Cinzas (%)</b>	<b>Carbono fixo (%)</b>
<i>in natura</i>	78,19 a	1,08 b	20,73 b
220,8°C	77,33 a	1,38 a	21,29 b
280,2°C	75,74 b	1,29 a	22,97 a
CV (%)	0,82	8,84	2,96

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

Fonte: O autor

Os pellets tratados termicamente a 280° C tiveram maior teor de carbono fixo e menor teor de voláteis em comparação com a menor temperatura de torrefação e com os pellets *in natura*, indicando que a temperatura de torrefação afetou a composição química imediata dos pellets. Deseja-se um menor teor de cinzas nos biocombustíveis, pois segundo (TAN; LAGERKVIST, 2011; BUSTAMANTE-GARCÍA *et al.*, 2013) os óxidos minerais diminuem o valor calórico e aumentam a corrosão dos equipamentos destinados à conversão energética em biocombustíveis sólidos.

Os *pellet in natura* e tratados em temperatura de 220°C, tiveram maior teor de voláteis e menores temperaturas de ignição dos voláteis. Os voláteis tendem a acelerar a ignição (MOON *et al.*, 2013), enquanto, combustíveis com maiores teores de carbono fixo tendem a queimar mais lentamente, apresentam maior estabilidade térmica e temperatura de ignição superior.

## 2.4 CONCLUSÕES

O processo de torrefação tornou as dimensões dos pellets mais homogêneas, sendo que o aumento da temperatura de torrefação reduziu o diâmetro e densidade unitária dos pellets.

A torrefação tornou os pellets hidrofóbicos, e o aumento da temperatura de torrefação reduziu a umidade de equilíbrio dos pellets.

A torrefação não aumentou o poder calorífico dos pellets e reduziu a densidade energética dos mesmos, principalmente por sua influência nas dimensões dos pellets.

A composição química imediata dos pellets foi alterada pela torrefação, sendo que na temperatura de 280°C, houve redução do teor de voláteis a aumento do teor de carbono fixo. Além disso, este tratamento térmico afetou o comportamento da degradação térmica dos pellets, tanto em termos de temperatura, massa remanescente em cada etapa da perda de massa e também nas temperaturas de maior velocidade de perda de massa.

De forma geral, as propriedades físicas dos pellets e o comportamento térmico de degradação foram afetados de forma mais intensa que o potencial energético deste biocombustível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAO, Y. **Quality Function Deployment Integrating Customer Requirements into Product Design**. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, Norwalk, Connecticut, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM, D 1762 e 84: **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14929: **Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa**. Rio de Janeiro: ABNT. 2003.

BAKERJIAN, R. **Tool Manufacturing Engineers Handbook**. Society of Manufacturing Engineers, Vol. 6 4th ed..1992.

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.G.G.J. “**Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass**”, Report ECN-C--05-026, ECN, Petten, 2005.

BOOTHROYD, G.; DEWURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. New York: Marcel Dekker inc.. 1994.

BRALLA, J. G, **Handbook of product design for manufacturing**. A practical guide to low-cost production. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

BRAND, M. A.; OLIVEIRA, L. C.; MARTINS, S. A.; LACERDA, S. R.; JUNIOR, L. S. **Potencialidade de uso de biomassa de florestas nativas sob manejo sustentável para geração de energia**. V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. Belém – PA. 2009.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.



BRITO, J. O. **Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto**. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. Anais... São Paulo: SBS/SBEF, 1993. p.774.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F. **Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln**. Industrial Crops and Products, Washington, US, v. 42, p. 169–174, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.04.034.

CORTEZ, L. A., LORA E. S., ALYARZA, J. A. C. **Biomassa para energia**. Campinas -SP p.734 Editora Unicamp, 2008.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN, DIN 51900: 1e3, **Testing of Solid and Liquid Fuels**. Determining the Gross Calorific Value of Solid and Liquid Fuels Using the Bomb Calorimeter, and Calculation of Net Calorific Value e Part 1-3. Berlin, 2000

**EPE, Empresa de pesquisa energética**, 2022. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acessado em 15 Fevereiro de 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e CEN. EN 16127. **Solid Biofuels. Determination of length and diameter of pellets**. Brussels, 2012, p. 10.

FARIA, W.S.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A. de C.O.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JR, J.B. **Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica**. Coffee Science, Lavras, v.11, n.1, p. 137-147, 2016.

FELFLI, Félix E. Fonseca; LUENGO, Carlos A.; SOLER, Pedro Beaton. **Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas**. Revista Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural. 2000.

FERNANDEZ, B. O.; GONÇALVES, B. F.; *et al.* **Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa.** Revista Virtual de Química, 2017, v.9.

**FERPAM, 2022.** Disponível em:

<https://www.ferpam.com.br/macarico-lanca-chama-kombat-01-reg-cacula.html> Acessado em 15 de fevereiro de 2022.

FERREIRA, M. G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual.** 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FONSECA, A.J.H. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional.** 2000. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) CTC/EMC. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GIRARD, P., SHAH, **Recent developments on torrefied woods na alternative to charcoal for reducing deforestation.** REUR Tech.Ser.20 (1991) 101-114.

HAKKOU, M.; PÉTRISANS, M.; GERARGIN, P.; ZOULALIAN, A. **Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood.** Polymer Degradation and stability, v. 91, p. 393-397, 2006.

HAUSER, J.R.; CLAUNSIG. **The House of Quality, Harvard Business Review**, may/jun, 1998.

HUBKA, V.; EDER, E.W. **Theory of Technical Systems.** London: Springer Verlag. 1988.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2021.** São Paulo: IBA; 2021.

**IBRAM- Industria brasileira de máquinas Ltda, 2022.** Disponível em:

[https://www.ibram.ind.br/ventilador\\_siroco\\_compacto\\_vsc.php](https://www.ibram.ind.br/ventilador_siroco_compacto_vsc.php) Acessado em 15 de fevereiro de 2022.

**IEE- Instituto de energia e ambiente, 2022.** Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/conceituando-biomassa#:~:text=Assim%2C%20do%20ponto%20de%20vista,utilizado%20para%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia>. Acessado dia 15 de fevereiro de 2022.

IEA – International Energy Agency, 2022. **Electricity Market Report: França 2022.**

**INPI, Instituto Nacional de Propriedade Industrial.** Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br> Acessado em Julho de 2021.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products.** Biomass & Bioenergy, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. **Pirólise e Torrefação da biomassa.** In: Biomassa para energia. C. 10, P. 333-351, 2006.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. **Characterization and prediction of biomass pyrolysis products.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 37, p. 611-630, 2011.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. **Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading.** Fuel, 91 (1) 147-154, 2011.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. **Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks.** Experimental Thermal and Fluid Science, Amsterdam, v. 47, p. 232–240, 2013. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; OLIVEIRA, E. B. de. **Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais.** In: OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de (Ed.). Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. Cap. 1.

OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. 1999. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PAO, H.; FU, H. **Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil**. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p.381-392, 2013.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 1996. 544 p.

PENG, J.; WANG, J.; BI, T. X.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S.; PENG, H.; JIA, D. **Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets**. *Fuel Processing Technology*, v. 129, p. 168-173, 2014. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.09.010.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. **Torrefaction of wood: part 2. analysis of products**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, London, v. 77, p. 35-40, 2006. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.01.001.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; DE SIQUEIRA, H. F.; DE MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. **Caracterização energética de pellets in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 35, n. 84, p. 435–442, 2015. DOI: 10.4336/2015.pfb.35.84.843. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/843>. Acesso em: 11 abr. 2022.

PROVENZA, F. **Projetista de máquinas**. 6. ed. São Paulo: Pro-Tec, 1978. 438 p.

PUGH, S. **Total Design Integrated Methods for Successful Product Engineering**. England: Adison Wesley Publishing Company, 1991.

REIS, C. A. F. *et al.* **Diagnóstico do setor de florestas plantadas no estado de Goiás**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015 p 139.

REIS, C. A. F. *et al.* **Cenário do setor de florestas plantadas no estado de Goiás.** Colombo, PR:EMBRAPA Florestas, 2017, 79 p.

RODRIGUES, T.O., **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos.** 2009. 82f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROBERTS, J. J. *et al.* **Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source** in the party of General Pueyrredón, Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 568–583, 2015.

ROOZENBURG, N. F. M.; EEKELS, J. **Product design: fundamentals and methods.** Chichester: John Wiley & Sons, 1995. 408 p.

ROSILLO-CALLE, F. e BEZZON, G **Produção e Uso Industrial de Carvão Vegetal.** In ROSILLO-CALE, BAJAY E ROTHMAN (org) “Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira”. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2005.

ROUSSET, P.; MACEDO, L. ; COMMANDRÉ, J.-M. ; MOREIRA, A. . **Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (Print)*, v. 96, p. 86-91, 2012.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo.** São Paulo: Saraiva, 2006..

SEGURA, Matheus Lini. **A evolução da matriz energética brasileira: O papel dos biocombustíveis e outras fontes alternativas.** 2012. <https://carollinasalle.jusbrasil.com.br/artigos/122363205/a-evolucao-da-matriz-energetica-brasileira-o-papel-dos-biocombustiveis-e-outras-fontes-alternativas> Acesso em: 29 jul. 2021.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. **Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva**. Revista *Árvore*, v. 34, n. 6, p. 1091-1099, 2010.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. **Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions**. *Fuel*, London, v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.05.011.

SILVA, A. G. **Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido**. 2013, 135p. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia. Instituto de Química. Salvador-BA.

SILVA, J. W. F., Carneiro, R. A. F., & Matos, J. M. L. 2017. **Da biomassa residual ao briquete: viabilidade técnica para produção de briquetes na microrregião de dourados-MS**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(4). <https://doi.org/10.5380/rber.v6i4.46401>

TAN, Z.; LAGERKVIST, A. **Phosphorous recovery from the biomass ash: a review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.05.016.

**Termopar Cerâmico Bloco K Isolador Sonda 11G Alta Temperatura 2372**, Americanas 2022. Disponível em:<https://www.americanas.com.br/produto/1525296060> . Acessado em 15 de fevereiro de 2022.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. **A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application**. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

ULLMAN, D.G. **The Mechanical Design Process**. Singapore: McGraw-Hill Inc. 2nd ed..1997.

VAN DER STELT, M.J.C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J. **Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review.** Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 3748 – 3762, 2011.

VÁVROVÁ, K.; KNÁPEK, J.; WEGER, J. **Modeling of biomass potential from agricultural land for energy utilization using high resolution spatial data with regard to food security scenarios.** Renewable And Sustainable Energy Reviews, v. 35, p. 436-444, 2014.

VDI 2221. **Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte.**1985.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** Fuel, London, v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, 2007. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. **A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues.** Renewable Energy, v. 36, n. 11, p. 3133-3140, 2011.

**WEG motores, 2022.** Disponível em:

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h3f/h25/WEG-CFW100-user-manual-10005750207-en-es-pt.pdf> Acessado em 15 de fevereiro de 2022.