



# UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

BRUNO SANTOS SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PRÉ-PROCESSAMENTO  
DO EUCALIPTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

**PEI**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial

SALVADOR  
2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
INDUSTRIAL**

**BRUNO SANTOS SILVA**

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PRÉ-  
PROCESSAMENTO DO EUCALIPTO PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA**

**Orientador 1:**

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

**Orientador 2:**

Prof. Dr. Júlio Augusto da Silva Mendes

Salvador - Bahia

2019

**BRUNO SANTOS SILVA**

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PRÉ-  
PROCESSAMENTO DO EUCALIPTO PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como requisito para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Industrial.

**Orientador 1:**

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

**Orientador 2:**

Prof. Dr. Júlio Augusto da Silva Mendes

Salvador - Bahia  
2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

SILVA, BRUNO SANTOS

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PRÉ-PROCESSAMENTO DO  
EUCALIPTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA / BRUNO SANTOS

SILVA. -- Salvador, 2019.

131 f. : il

Orientador: Ednildo Andrade Torres.

Coorientador: Júlio Augusto da Silva Mendes.

Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) --  
Universidade Federal da Bahia, UFBA, 2019.

1. Biomassa. 2. Torrefação. 3. Briquetagem. 4.  
Transporte. 5. Secagem. I. Torres, Ednildo Andrade.  
II. Mendes, Júlio Augusto da Silva. III. Título.

**“AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO PRÉ-  
PROCESSAMENTO DO EUCALIPTO PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA”.**

**BRUNO SANTOS SILVA**

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Doutor em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil, 1999.

Prof. Dr. Júlio Augusto Mendes da Silva

Doutor em Energia e fluidos, pela Universidade de São Paulo, Brasil, 2013.

Prof. Dr. Jorge José Gomes Martins

Doutor pela University of Birmingham, Inglaterra, 1989.

Prof. Dr. Francisco Gaudêncio Mendonça Freires

Doutor em Engenharia Industrial e gerenciamento, pela Universidade do Porto, Portugal, 2007.

Eng. Msc. Vanderlei Santos de Souza

Gerente na empresa ERB.

Salvador, BA - BRASIL

Julho/ 2019

Dedico este trabalho aos meus melhores amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por tudo que existe.

Aos meus pais e parentes, por tudo que fizeram por mim até hoje.

Aos professores Ednildo Andrade Torres e Júlio Augusto da Silva Mendes pelos ensinamentos, dicas e orientações.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Energia e Gás - LEN, pelo apoio e incentivo constantes, em especial, Airton, Vera, Ane, Maria Cândida, Eduardo, Vitor, José Alexandre, Sara, Marcos, Yamilet e Marcela.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior – brasil (capes) – código de financiamento 001.

*“Se você não mudar de direção, acabará chegando onde quer”.*  
*Lao Tzu*

## RESUMO

A demanda por fontes de energia renováveis vem crescendo devido aos efeitos nocivos do uso dos combustíveis fósseis, que estão destruindo o meio ambiente. A biomassa é uma fonte de energia sustentável, adequada para substituí-los gradualmente e a torrefação, briquetagem e secagem são processos de conversão térmicos e termomecânicos capazes de reduzir o preço da energia gerada. Entre as vantagens desses processos estão o aumento da eficiência da combustão devida às alterações químicas que a torrefação proporciona e à diminuição do excesso de ar necessário causada pela briquetagem. Além disso, o aumento da densidade de energia devida à torrefação reduz os custos de transporte, pois permite que mais energia seja produzida a partir de um mesmo volume de biomassa. E também a produção de um combustível com propriedades mais adequadas para o armazenamento, entre outros. Este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica e econômica desses processos quando usados para converter o eucalipto logo antes do transporte por trens ou caminhões para usinas termelétricas. Os cálculos foram feitos com dados obtidos da literatura como a relação entre a umidade e a massa específica ou o poder calorífico da madeira, entre a umidade e a composição da madeira e a eficiência da caldeira na qual é realizada a combustão, entre outros. Além de dados fornecidos por empresas relacionadas como preços e características de máquinas. Foram avaliados quais processos fornecem menores preços de energia e retornos maiores e mais rápidos do investimento para adquirir as máquinas necessárias por meio do valor presente líquido e do tempo de retorno do investimento. Os conjuntos de processos foram organizados em três rotas de produção. A rota 1, que se resume em picar e secar a madeira, a 2, que se resume em picar, secar e briquetar e a 3 que se resume em picar, secar, torreficar e briquetar. O uso do eucalipto briquetado da rota 2 resulta em preços mais altos para a energia e o uso do eucalipto apenas seco da rota 1 ou torrefado da rota 3 pode resultar em preços mais baixos e maiores e mais rápidos retornos sobre o investimento, dependendo das condições climáticas, da distância entre a termelétrica e a planta de conversão e do modal de transporte utilizado. A variação do custo do vapor gerado, a depender das condições climáticas, em US\$ por tonelada, para o transporte rodoviário e distância de 1 km para as rotas 1, 2 e 3 é de US\$ 81 a US\$ 52, US\$ 85 a US\$ 56 e US\$ 49 a US\$ 55 respectivamente. Para 500 km varia de US\$ 67 a US\$ 93, US\$ 71 a US\$ 98 e US\$ 66 a US\$ 59 respectivamente. Para o transporte ferroviário e distância de 1 km varia de US\$ 79 a US\$ 50, US\$ 84 a US\$ 54 e US\$ 47 a US\$ 53 respectivamente. Para a distância de 500 km varia de US\$ 52 a US\$ 81, US\$ 56 a US\$ 86 e US\$ 55 a US\$ 49 respectivamente.

**Palavras-chave:** Biomassa, Torrefação, Briquetagem, Transporte, Secagem.

## ABSTRACT

The demand for energy sources is increasing due to the harmful effects of using fossil fuels. Biomass is a sustainable energy source suitable for replacing them and torrefaction, briquetting and drying are thermal and thermo mechanical processes capable of reducing the cost of the energy generated with it. Some of the benefits of these processes include the increase in combustion efficiency due to chemical changes caused by torrefaction and the reduction of the required excess air due to briquetting. Besides, the increase in energy density due to torrefaction reduces transportation costs, because it allows more energy to be produced with the same volume of biomass. Also the production of a fuel with properties more suitable for storage, among others. This work aims to evaluate the technical and economical feasibility of these processes when used to convert the eucalyptus right before the transportation by trains or trucks to thermoelectric plants. The calculations were made with data obtained from the literature such as the relationship between moisture content and density or the heating value of the wood, between moisture content and the composition of the wood and the efficiency of the boiler where combustion takes place, among others. Data provided from related companies was also used such as the prices and characteristics of the machines. By calculating the net present values and the times of return on investment we evaluated which processes result in the greatest returns on investment and lower times of return on the investment. The processes were organized into three production routes. Route 1, which can be summarized to chopping and drying the wood, route 2, which can be summarized to chopping, drying and briquetting and route 3 which can be summarized to chopping, drying, torrefying and briquetting. The use of the briquetted eucalyptus from route 2 results in a higher energy cost and the only dried eucalyptus from route 1 or the torrefied eucalyptus from line 3 may result in lower energy costs and greater and faster returns on the investment, depending on the climatic conditions, the distance between the thermoelectric plant and the conversion plant and the mode of transportation used. The variation in the cost of the steam generated, depending on the climatic conditions, in dollars per ton, for road transportation and the distance of 1 km for lines 1,2 and 3 is from US\$ 52 to US\$ 81 , US\$ 85 to US\$ 56 and US\$ 49 to US\$ 55, respectively. For 500 km it is from US\$ 67 to US\$ 93, from US\$ 71 to US\$ 98 and from US\$ 59 to US\$ 66 respectively. For railroad transportation and the distance of 1 km it varies from US\$ 50 to US\$ 79, from US\$ 54 to US\$ 84 and from US\$ 47 to US\$ 53. For a distance of 500 km it varies from US\$ 52 to US\$ 81, from US\$ 56 to US\$ 86 and from US\$ 49 to US\$ 55 respectively.

**Keywords:** Biomass, Torrefaction, Briquetting, Transport, Drying.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Matriz de transporte brasileira em 2016.</i>	20
<i>Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2017.</i>	22
<i>Figura 3 - Malhas ferroviárias em operação no Brasil.</i>	28
<i>Figura 4 - Dados sobre a queima do torçã.</i>	34
<i>Figura 5 - Massa específica de pellets comuns e torrefados em função da temperatura e pressão de compressão (serragem de pinheiro de 0,23 mm torrefada a 280°C por 52 min).</i>	38
<i>Figura 6 - Consumo de energia para produzir pellets em função da pressão de compressão e temperatura da matriz (serragem de pinheiro de 0,23 mm) torrefado a 280°C por 52 min com 29% de perda de massa).</i>	39
<i>Figura 7 - Massa específica de briquetes em função da pressão de compressão.</i>	48
<i>Figura 8 - Rota de produção 1.</i>	60
<i>Figura 9 - Rota de produção 2.</i>	61
<i>Figura 10 - Rota de produção 3.</i>	62
<i>Figura 11 - Pedacos de madeira sendo movidos por uma correia depois de passar por um processo de separação.</i>	63
<i>Figura 12 - Pedacos de madeira sendo manuseados por trator após terem sido picados.</i>	63
<i>Figura 13 - Demanda energética para a secagem da madeira (MJ/%bu) em função do teor inicial de umidade (%bu).</i>	66
<i>Figura 14 - Massa específica da madeira de eucalipto em função do teor de umidade.</i>	68
<i>Figura 15 - Poder calorífico inferior em função do teor de umidade.</i>	81
<i>Figura 16 - Rota de produção 1.</i>	82
<i>Figura 17 - Rota de produção 2.</i>	83
<i>Figura 18 - Rota de produção 3.</i>	89
<i>Figura 19 - Consumo energético para a compressão de pellets comuns e torrefados em função da temperatura da matriz e pressão de compressão (serragem de pinheiro de 0,23 mm torrefada a 280°C por 52 min).</i>	97
<i>Figura 20 - Eficiências da caldeira para os produtos de cada uma das rotas de produção em função do teor de umidade.</i>	99
<i>Figura 21 - Preço do frete em função da distância entre plantas.</i>	100
<i>Figura 22 - Aplicativo Calcular Frete.</i>	101
<i>Figura 23 - Aplicativo Frete Certo.</i>	102
<i>Figura 24 - Custo do vapor em US\$/t.</i>	103
<i>Figura 25 - Custo do vapor por quilômetro.</i>	104
<i>Figura 26 - Tempo de retorno do investimento.</i>	105
<i>Figura 27 - Custo do vapor em US\$/t.</i>	106
<i>Figura 28 - Custo da energia por quilômetro.</i>	106
<i>Figura 29 - Tempo de retorno do investimento.</i>	107
<i>Figura 30 - Custo do vapor.</i>	108
<i>Figura 31 - Custo da energia por quilômetro.</i>	109
<i>Figura 32 - Custo do vapor.</i>	110
<i>Figura 33 - Custo do vapor por quilômetro.</i>	110
<i>Figura 34 - Tempo de retorno do investimento.</i>	111
<i>Figura 35 - VPL para diferentes modais e condições climáticas.</i>	110

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Problemas relacionados à biomassa crua.</i>	23
<i>Tabela 2- Poder calorífico superior de diferentes combustíveis.</i>	25
<i>Tabela 3 - Análise elementar de diferentes biomassas em base úmida.</i>	26
<i>Tabela 4 - Análise imediata em base seca de diferentes biomassas.</i>	26
<i>Tabela 5- Aumento da densidade energética devido à compressão da biomassa torrefada.</i>	36
<i>Tabela 6 - Energia requerida pela torrefação.</i>	40
<i>Tabela 7 - Energia requerida na moagem de biomassa torrefada.</i>	42
<i>Tabela 8 - Energia requerida na compressão de biomassa torrefada.</i>	43
<i>Tabela 9 - Densidade aparente de pellets.</i>	45
<i>Tabela 10 - Energia requerida na compressão.</i>	54
<i>Tabela 11 - Energia requerida na secagem.</i>	57
<i>Tabela 12- Composição em base seca da biomassa.</i>	72
<i>Tabela 13- Dados dos pontos da rota de produção 1.</i>	81
<i>Tabela 14- Dados dos pontos da rota de produção 2.</i>	82
<i>Tabela 15- Dados dos pontos da rota de produção 3.</i>	83
<i>Tabela 16 - Exemplos de condições climáticas e teores de umidade de equilíbrio de algumas cidades.</i>	84
<i>Tabela 17- Parâmetros da compressão.</i>	89
<i>Tabela 18- Impostos da empresa transportadora</i>	92
<i>Tabela 19 - Custos do investimento inicial.</i>	94
<i>Tabela 20- Resultados dos exemplos de aplicação real</i>	96
<i>Tabela 21 - Rendimentos mássico e energético de pedaços de pinho torrefados a diferentes temperaturas.</i>	97

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	V
RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 INTRODUÇÃO .....	18
1.1 OBJETIVOS .....	21
1.1.1 Objetivo Geral .....	21
1.1.2 Objetivos Específicos .....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO .....	21
2.2 BIOMASSA .....	22
2.3 O EUCALIPTO .....	24
2.3.1 Poder Calorífico .....	25
2.3.2 Análise elementar e imediata .....	25
2.4 TRANSPORTE DE BIOMASSA .....	26
2.4.1 Transporte ferroviário .....	27
2.4.2 Transporte por embarcação .....	28
2.4.3 Transporte rodoviário .....	29
2.4.4 Contribuições relevantes .....	29
2.5 PROCESSOS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA .....	31
2.5.1 Torrefação .....	31
2.5.2 Compressão .....	42
2.5.3 Secagem .....	53
2.6 ANÁLISE ECONÔMICA .....	58
2.6.1 Fluxo de caixa .....	58
2.6.2 Taxa de juros .....	58
2.6.3 Valor presente líquido .....	59
2.6.4 Tempo de retorno do investimento .....	59
3 METODOLOGIA .....	59
3.1 ROTAS DE PRODUÇÃO .....	59
3.2 TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO .....	63
3.3 HIPÓTESES .....	64
3.4 SECAGEM EM UM SECADOR DE CORREIA .....	65
3.5 CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA .....	67

3.6 TORREFAÇÃO .....	68
3.7 CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	69
3.8 EFICIÊNCIA DA CALDEIRA .....	69
3.9 TRANSPORTE RODOVIÁRIO .....	73
3.10 TRANSPORTE FERROVIÁRIO .....	76
3.11 CÁLCULO DO CUSTO DO VAPOR.....	77
3.12 CÁLCULO DO NÚMERO NECESSÁRIO DE CADA MÁQUINA.....	78
3.13 CÁLCULO DO RETORNO MENSAL .....	78
3.14 CÁLCULO DO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO.....	79
3.15 CÁLCULO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO .....	79
4 EXEMPLOS E DADOS DE PROCESSOS .....	80
4.1 EXEMPLOS DE DADOS DAS ROTAS DE PRODUÇÃO .....	80
4.2 EXEMPLOS DE UMIDADES DE EQUILÍBRIO .....	82
4.3 EXEMPLOS E DADOS DE PROCESSOS DE CONVERSÃO .....	84
4.3.1 Cavaqueamento e Moagem.....	84
4.3.2 Secagem com Cobertura (Shed Drying) .....	84
4.3.3 Torrefação .....	85
4.3.4 Resfriamento .....	85
4.3.5 Briquetagem .....	85
4.3.6 Secagem no Secador de Correias (Belt Drying) .....	86
4.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA .....	87
4.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TORREFAÇÃO .....	87
4.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA COMPRESSÃO.....	87
4.7 TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	89
4.7.1 Impostos da Transportadora .....	91
4.8 TRANSPORTE FERROVIÁRIO .....	91
4.9 ANÁLISE ECONÔMICA.....	92
4.10 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PARA TERMELÉTRICAS REAIS .....	94
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	95
5.1 SECAGEM EM UM SECADOR DE CORREIAS .....	95
5.2 TORREFAÇÃO .....	95
5.3 EFICIÊNCIA DA CALDEIRA.....	96
5.4 TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	97
5.4.1 Preço do frete .....	97
5.4.2 Extremos climáticos .....	100
5.5 TRANSPORTE FERROVIÁRIO .....	106
5.5.1 Extremo Inferior .....	106

5.5.2 Extremo Superior .....	107
5.5.3 Valores presente líquidos .....	110
6 CONCLUSÕES .....	111
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
REFERÊNCIAS .....	113

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

<i>Bu</i>	base úmida;
<i>Bs</i>	base seca;
<i>TU</i>	teor de umidade;
<i>TUE</i>	teor de umidade de equilíbrio;
<i>PCS</i>	poder calorífico superior;
<i>PCI</i>	poder calorífico inferior;
<i>st</i>	metro cúbico estéreo;
<i>EF</i>	eficiência da caldeira;
<i>FR</i>	frete rodoviário;
<i>VPL</i>	valor presente líquido;
<i>TRI</i>	tempo de retorno do investimento;
<i>PEC</i>	custo com uma carga de caminhão de eucalipto;
<i>ETV</i>	energia transportada por viagem;
Vol.%	porcentagem em volume;
p%	porcentagem em massa;
ppm	partes por milhão;
BEN	Balanço Energético Nacional;
BIG	Banco de Informação de Geração;
<i>V<sub>n</sub></i>	valor monetário da biomassa do ponto n;
<i>m<sub>n</sub></i>	fluxo de massa do ponto n;
<i>C<sub>n</sub></i>	custo do processo imediatamente anterior ao ponto n;
<i>MR<sub>n</sub></i>	rendimento em massa do processo imediatamente anterior ao ponto n;
<i>T</i>	temperatura ambiente;
<i>UR</i>	umidade relativa;
<i>EFF</i>	eficiência global do equipamento;
<i>PE</i>	custo do eucalipto após os processos de conversão;
<i>DC</i>	demanda de calor para secagem;
<i>D</i>	massa específica do eucalipto com um teor de umidade de 25% bs;
<i>P</i>	preço do processo de secagem;
<i>R</i>	relação entre a energia necessária para secar madeira de diferentes teores de umidade;
<i>E20</i>	energia necessária para secar madeira de 20% de umidade bu (MJ/%)
<i>E55</i>	energia necessária para secar madeira de 55% de umidade bu (MJ /%);
<i>MS</i>	massa específica;
<i>A1</i>	sólido intermediário;
<i>V1</i>	espécie volátil;
<i>V2</i>	espécie volátil;
<i>A2</i>	sólido torrefado;
<i>k<sub>0x</sub></i>	fator pré-exponencial;
<i>E<sub>a<sub>x</sub></sub></i>	energia de ativação;;
<i>T<sub>a</sub></i>	temperatura ambiente;
<i>CO<sub>2</sub></i>	concentração de dióxido de carbono no gás de combustão seco;
<i>CO</i>	concentração de monóxido de carbono no gás de combustão seco;
<i>λ</i>	excesso de ar;
Vol.%	fração volumétrica;

DPVAT Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre ou por sua Carga a Pessoas Transportadas ou Não;

IPVA	imposto sobre a propriedade de veículos automotores
IPTU	Imposto Predial Territorial Urbano;
FR	preço do frete rodoviário;
CC	custo com combustível mensal da empresa;
CF	total de custos fixos;
NC	número de caminhões da empresa;
CV	total de custos variáveis excetuando o custo com combustível;
OD	custo com outras despesas;
SE	custo com salários e encargos sociais;
ML	margem de lucro;
VC	produto do número de viagens por mês por caminhão (VMC) pelo número de caminhões da empresa transportadora (319);
CP	custo do pedágio;
SCV	soma dos custos variáveis excluindo o pedágio;
CCO	custo com combustível;
EC	rendimento do caminhão cheio;
EV	rendimento do caminhão vazio;
TC	taxa de cambio do dólar;
VMC	viagens por mês por caminhão;
CH	soma das cargas horárias mensais dos dois motoristas;
D	distância entre a termelétrica e a planta de conversão;
V	velocidade média dos caminhões;
TCD	tempo de carga e descarga;
PEC	custo do eucalipto em um caminhão;
PT	custo do eucalipto tratado;
MM	massa máxima que o caminhão em questão é capaz de suportar;
CEV	custo do eucalipto em um vagão de trem;
M	massa máxima de eucalipto que um vagão suporta;
CT	custo total;
FF	custo do frete ferroviário;
EES	Engineering Equation Solver;
CS	custo do vapor em base mássica;
C	custo monetário;
ME	massa de eucalipto;
RM	retorno mensal;
DI	diferença entre os custos do vapor nas rotas;
SF	fluxo de vapor;
I	investimento inicial;
NM	número de meses até que as máquinas se desvalorizem;
$N_x$	número requerido de unidades de uma máquina específica;
MFR	fluxo de massa exigido da máquina;
MMF	fluxo de massa máximo que a máquina suporta;
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres.
$q$	energia disponível na fornalha (kW);
$mcb$	consumo de combustível (kg/s);

<i>mar</i>	fluxo de ar de combustão (kg/s);
<i>war</i>	umidade do ar (kg/kg ar seco);
<i>Δhcb</i>	entalpia do combustível (kJ/kg);
<i>Δhar</i>	entalpia do ar de combustão (kJ/kg);
<i>Δhvp</i>	entalpia da umidade do ar (kJ/kg).
<i>qq<sub>s</sub></i>	calor perdido com os gases secos (kJ/kg de combustível);
<i>mgs</i>	massa total de gases secos (kg/kg de combustível).;
<i>c<sub>par</sub></i>	calor específico do ar ( $c_{par} = 1,004 \text{ kJ/kg.K}$ ) (Bornakke & Sonntag,
2009);	
<i>T<sub>g</sub></i>	temperatura dos gases na chaminé (K);
<i>T</i>	temperatura de referência (K).
<i>qv</i>	calor perdido com a umidade dos gases (kJ/kg de combustível);
<i>h</i>	teor de hidrogênio do combustível (kg/kg de combustível);
<i>TU</i>	teor de umidade da biomassa (kg/kg de combustível);
<i>war</i>	teor de umidade do ar (kg/ kg de ar seco);
<i>e</i>	coeficiente de excesso de ar;
<i>mar</i>	massa estequiométrica de ar (kg/kg de combustível);
<i>Δhvp</i>	entalpia do vapor na pressão atmosférica (kJ/kg).

## **ESTRUTURA DO TRABALHO**

- No capítulo 1, introdução, são apresentados conceitos importantes e objetivos;
- No capítulo 2, revisão bibliográfica, discorre-se brevemente sobre o setor energético brasileiro, são apresentados o conceito de biomassa, características do eucalipto, vantagens, desvantagens e características dos diferentes modais de transporte, características dos processos de conversão e noções básicas sobre análise de viabilidade econômica;
- No capítulo 3, metodologia, são apresentadas as três rotas de produção, a forma como foi calculada a umidade de equilíbrio, a massa específica da madeira, a eficiência da caldeira, os fretes rodoviário e ferroviário e os indicadores econômicos;
- No capítulo 4, exemplos e dados de processos, são apresentados alguns exemplos como dados das rotas de produção para condições climáticas específicas, umidades de equilíbrio para algumas cidades da Bahia, dados de processos de conversão, entre outros.
- No capítulo 5, resultados e discussões, são apresentados o custo da secagem em secador de correia, resultados e comparações relativos à torrefação, à eficiência da caldeira e preços de frete rodoviário. São apresentados também em gráficos o custo do vapor gerado, o valor presente líquido e o tempo de retorno do investimento, todos em função da distância de transporte para os dois modais analisados e os dois extremos climáticos escolhidos;
- No capítulo 6, conclusões, são apresentadas as conclusões obtidas com a análise dos resultados;
- No capítulo 7, sugestões para trabalhos futuros, são dadas sugestões sobre como complementar este trabalho;

## 1 INTRODUÇÃO

Os problemas causados pelas mudanças climáticas nas últimas décadas e necessidade de diversificação da matriz energética são motivos para a demanda por fontes de energia renováveis estar aumentando. Um exemplo dessas fontes são as biomassas lignocelulósicas, como os resíduos florestais e a madeira de eucalipto, que são uma mistura de polímeros naturais de carboidratos como celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de outras substâncias (Abraf, 2013).

A indústria de processamento de madeira e da colheita florestal gera aproximadamente 41 milhões de toneladas de resíduos madeireiros capazes de gerar cerca de 1,7 GW/ano de energia. Com o projeto de lei 3.529/2012 ficou instituída a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, a qual estabelece a obrigatoriedade da contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional. A sanção desta lei tornará inevitável o uso de biomassa para gerar energia elétrica e a parcela das fontes renováveis será ainda maior (Abraf, 2013).

De acordo com Rochedo et al. (2016), as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas a energia e processos vão aumentar com o tempo no Brasil. O caso brasileiro é emblemático devido às perspectivas de captura de carbono em instalações de processamento de biomassa. A necessidade de indústrias de baixo carbono devida ao Acordo de Paris que foi assinado por 195 países vai, segundo Grisotto (2017), proporcionar ao Brasil a chance de se tornar o maior exportador mundial de serviços ambientais como venda de créditos de carbono.

As biomassas lignocelulósicas são compostas de substâncias baseadas em carbono e podem causar uma grande redução nas emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, porque todo o carbono liberado em sua combustão pode ser reabsorvido no processo de fotossíntese. No entanto, o uso deste tipo de biomassa apresenta problemas devidos à sua alta umidade, baixa densidade de energia, baixa mobilidade, natureza higroscópica e heterogeneidade (Bach; Skreiberg, 2016).

O processo de torrefação é uma maneira de minimizar esses problemas. De acordo com Basu (2013), este consiste em uma pirólise suave geralmente na faixa de temperatura de 230 a 300°C na ausência de oxigênio atmosférico. Este pré-tratamento aumenta a densidade de energia, reduz a razão de oxigênio para carbono e a natureza higroscópica do combustível, de modo que as propriedades da biomassa se aproximam das do carvão. Além disso, provoca a despolimerização da hemicelulose e, como resultado, a biomassa torna-se frágil e a sua

moabilidade é melhorada. Outro processo utilizado para melhorar as propriedades da biomassa é a compressão que pode ocorrer como peletização, briquetagem e outros. Consiste em aplicar uma força mecânica para comprimir a biomassa em partículas sólidas de tamanho uniforme, como pellets e briquetes (Chen et al., 2015). O processo de secagem também é muito útil para diminuir o teor de umidade da biomassa e consiste em aquecer a biomassa para evaporar a água presente nela. Pode ocorrer de diferentes formas como em forno, ao ar ou com a proteção de uma cobertura.

Aplicando esses processos, o preço do transporte de biomassa das plantas de conversão para usinas de energia é reduzido, pois o aumento da densidade energética possibilita que mais energia na forma de biomassa seja transportada em um mesmo volume. Além disso, a eficiência das caldeiras aumenta devido à diminuição da umidade, maior homogeneização e diminuição do excesso de ar necessário (Hansen; Jein, 2009).

De acordo com Phanphanich (2010), combustíveis fósseis como o carvão têm suprido cada vez mais a geração de eletricidade e calor no mundo. Como consequência, entre 1990 e 2007 houve um aumento de aproximadamente 38% na emissão mundial de CO<sub>2</sub> (IEA, 2009). Previsões indicam que um mínimo de 15% da energia mundial total terá que ser constituída por energia renovável até 2030, devido à crescente demanda de energia e também será necessário diminuir as emissões de substâncias como os gases de efeito estufa. A biomassa, que é uma fonte de energia renovável, precisa ser melhorada econômica e ambientalmente para o suprir a demanda global de energia.

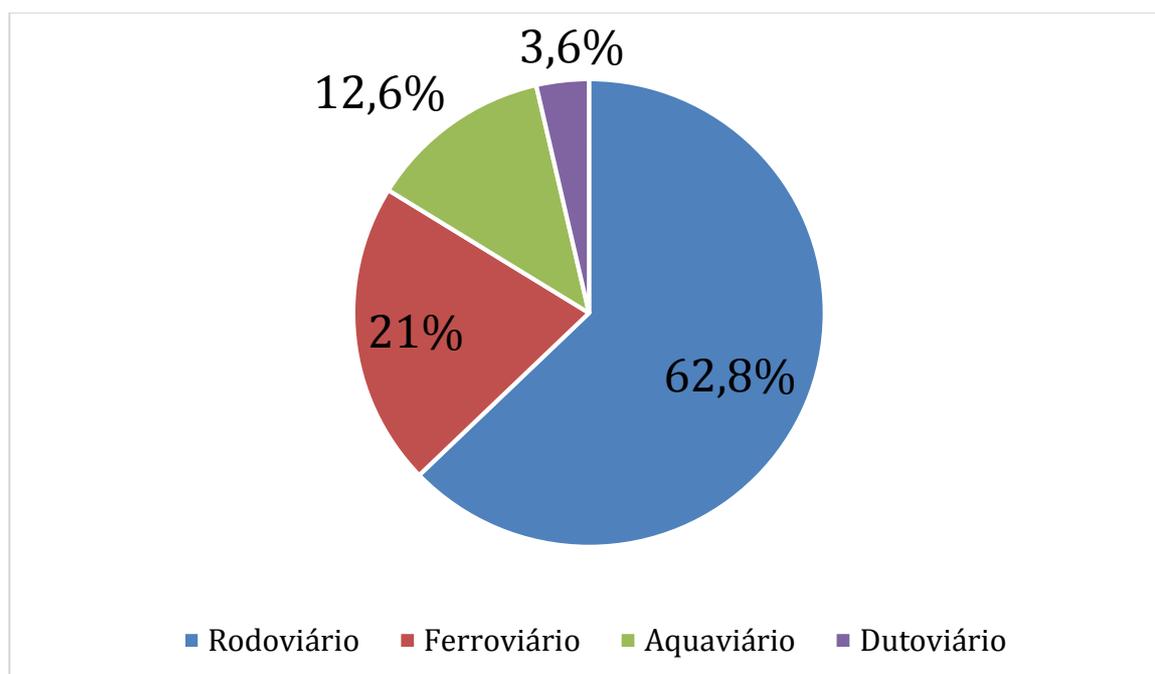
A combustão da biomassa é usada atualmente na geração de eletricidade e calor (Phanphanich, 2010) e pellets e briquetes são as formas de biomassa compactada mais frequentemente usadas. O principal uso dos briquetes é para substituir a lenha em fogões domésticos carregados manualmente e pellets, devido à sua boa fluidez, teor de água uniforme, tamanho de grão e composição química são utilizados largamente em caldeiras e fogões carregados automaticamente. Segundo Phanphanich (2010), em torno de 55% do uso global de madeira está em países em desenvolvimento. Os 45% restantes são utilizados como matéria-prima industrial; Contudo, 40% dessa quantidade são resíduos de processos primários e secundários usados na produção de energia. Estima-se que 99% da área florestal mundial seja constituída por biomassa lenhosa o que equivale a cerca de 109 t/ha ou 420 Gt (FAO, 2001).

O eucalipto, uma das principais espécies de madeira usadas no Brasil para a produção de energia, é uma planta originada na Austrália e na Indonésia que encontrou condições de clima e solo favoráveis no Brasil, onde cresce mais rápido do que em outros países e possui alta

produtividade (Abraf, 2011). Existem cerca de 5,1 milhões de hectares de floresta de eucalipto no Brasil (Abraf, 2013), dos quais 1,8 milhões são cultivados pelo setor de papel e celulose (Abraf, 2011).

Entre os vários modais de transporte no país caminhões são frequentemente utilizados no transporte de produtos agrícolas, embora o custo por tonelada e quilômetro seja maior quando comparado ao transporte por trens e barcos. O principal motivo para isso é a alta extensão e acessibilidade da rede rodoviária (Gonzales et al., 2013). A matriz de transporte brasileira é constituída por redes rodoviárias, que representam 62,7%, seguido por ferrovias com 21,7%, canais/rios com 3,8% e vias aéreas com 0,1% (Ilos, 2017). A Figura 1 ilustra essa distribuição.

Figura 1 - Matriz de transporte brasileira em 2016.



Fonte: Ilos (2017).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os benefícios técnicos e econômicos do uso de processos térmicos e termomecânicos como a torrefação, a secagem e a briquetagem de eucalipto para transporte e posterior geração de energia térmica em caldeiras em condições típicas do Brasil

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

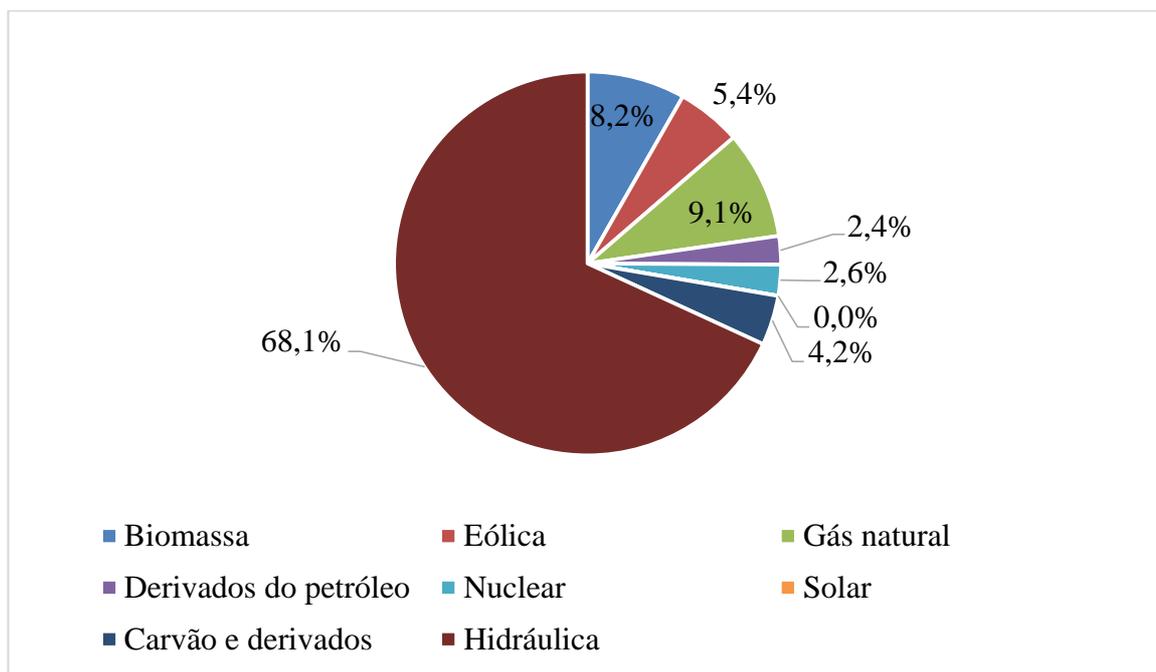
- Determinar qual o conjunto de processos mais adequado para diferentes condições climáticas e distancias entre a planta de conversão e a planta de geração de energia;
- Avaliar os efeitos termodinâmicos que os processos causam na combustão do eucalipto;
- Avaliar as diferenças entre os modais ferroviário e rodoviário no transporte do eucalipto pré-processado para as plantas termoelétricas;
- Determinar qual conjunto de processos de conversão é mais economicamente vantajoso por meio de indicadores como o tempo de retorno do investimento e o valor presente líquido.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

A oferta interna de energia elétrica por fonte em 2017 está ilustrada na Figura 2:

Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2017.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018).

Observa-se que a energia elétrica no Brasil é fornecida majoritariamente por fontes renováveis e a parcela da biomassa não é desprezível.

De acordo com o Banco de Informação de Geração – BIG (ANEEL, 2016), o Brasil possuía no momento da publicação um total de 4447 empreendimentos em operação, totalizando quase 142 GW de potência instalada.

## 2.2 BIOMASSA

De acordo com Silva (2013), biomassa é qualquer matéria orgânica disponível em base renovável ou recorrente, incluindo dejetos de animais, plantas, plantas aquáticas, resíduos agroflorestais e urbanos e outros resíduos usados para produção industrial de energia, químicos, materiais e combustíveis.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos problemas relacionados à biomassa em seu estado natural quando usada para gerar energia.

Tabela 1 - Problemas relacionados à biomassa crua.

<b>Problema</b>	<b>Consequências</b>
<b>Alta umidade</b>	Reduz o poder calorífico;
	Requer etapa de secagem que demanda muita energia;
	Aumenta os custos de armazenagem e transporte;
	Aumenta os riscos de degradação biológica;
	Aumenta a corrosão por causa da condensação da água no gás de combustão.
<b>Baixas densidade e densidade energética</b>	Aumenta os custos de armazenagem e transporte;
	Requer alta capacidade de alimentação.
<b>Moabilidade ruim</b>	Aumenta a energia requerida para a moagem;
	Partículas maiores.
<b>Natureza higroscópica</b>	Absorve umidade durante o armazenamento;
	Aumenta os riscos de degradação biológica.
	Reduz o poder calorífico e densidade energética;
	Reduz a estabilidade térmica.

<b>Alto teor de metais alcalinos</b>	Tornam os problemas relacionados às cinzas mais sérios.
<b>Heterogeneidade</b>	Grande variação nas propriedades.

Fonte: Bach; Skreiberg (2016)

Existem muitas formas de converter biomassa em energia térmica ou outras formas de combustíveis como as termoquímicas (combustão, gaseificação, pirólise), biológicas (digestão anaeróbica, fermentação) ou química (esterificação). Entre estas, a combustão direta e a co-combustão com carvão são, atualmente, as tecnologias dominantes, as quais contribuem com mais de 90% da produção global de bioenergia (Bach; Skreiberg, 2016).

### 2.3 O EUCALIPTO

O Eucalipto é uma árvore proveniente da Austrália e da Indonésia e pertence ao gênero *Eucalyptus* no qual existem mais de 600 espécies. Esta árvore encontrou condições de solo e clima para se desenvolver no Brasil, que a permitem crescer mais rápido que nos outros países e ter uma alta produtividade. As florestas de eucalipto têm cerca de 5,1 milhões de hectares no Brasil e 1,8 milhões são cultivados pela indústria de papel e celulose (Abraf, 2013). Devido a esses números e ao seu potencial energético a madeira de eucalipto foi escolhida como a biomassa a ser analisada.

O uso de madeira para produção energética no Brasil pode ser resumido em dois processos nos quais um resulta em carvão vegetal por meio da carbonização e o outro no consumo direto por meio da combustão. A produção desses dois tipos de energia a partir da madeira é devida à sua composição. O eucalipto possui em geral um alto poder calorífico, esta propriedade é diretamente relacionada à sua constituição química e ao seu rendimento energético. Os teores de substâncias minerais, celuloses, hemiceluloses, lignina e extrativos variam de acordo com a espécie. Outro fator relevante é a densidade da madeira, pois esta é um índice de sua qualidade já que está relacionado com a produção de massa seca, propriedades físico-mecânicas e com a qualidade dos produtos (Revista da Madeira, 2013).

### 2.3.1 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico é a quantidade de energia liberada por unidade de massa na oxidação de um determinado combustível. Pode ser determinado utilizando uma bomba calorimétrica. Para a medição deste valor, considera-se o calor latente de condensação para todo o vapor de água formado pela combustão do hidrogênio presente no combustível para o PCS (poder calorífico superior) e ao desconsiderar-se este calor latente, tem-se o PCI (poder calorífico inferior) do combustível (LOPES, 2002). A Tabela 2 compara o PCS do eucalipto com o do carvão e de outra espécie de madeira, o Pinus.

Tabela 2- Poder calorífico superior de diferentes combustíveis.

<b>Biomassa</b>	<b>Poder Calorífico Superior (kJ/kg)</b>
<b>Pinus<sup>1</sup></b>	20.020
<b>Eucalipto<sup>2</sup></b>	20.054
<b>Carvão<sup>3</sup></b>	30.900

Fontes: (1 = LORA et. Al (1997), 2 = Quirino et al. (2005), 3 = LOPES (2002))

### 2.3.2 ANÁLISE ELEMENTAR E IMEDIATA

A análise elementar é um procedimento que permite a identificação, em porcentagens, da quantidade de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, assim como enxofre, cloro e bromo, em compostos orgânicos e inorgânicos, que podem ser líquidos ou sólidos. Para o eucalipto, os principais elementos a se determinar são o carbono, hidrogênio e oxigênio.

A análise elementar da madeira tem mostrado, para diferentes espécies, uma uniformidade em sua composição. A Tabela 3 apresenta a composição elementar de diferentes biomassas (Barrichelo, 1978).

Tabela 3 - Análise elementar de diferentes biomassas em base úmida.

<b>Biomassa</b>	<b>Teor do elemento químico (% da massa)</b>			
	<b>H</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>
<b>Madeira não-resinosa</b>	6,4	50,8	0,4	41,8
<b>Casca não-resinosa</b>	6	51,2	0,4	34,8
<b>Madeira resinosa</b>	6,3	52,9	0,1	39,7
<b>Casca resinosa</b>	5,9	53,1	0,2	37,9

Fonte: Arola (1976).

A análise imediata fornece as frações em massa de cinzas, umidade, voláteis e carbono fixo de uma amostra de biomassa como mostra a Tabela 4 para diferentes biomassas.

Tabela 4 - Análise imediata em base seca de diferentes biomassas.

<b>Espécie</b>	<b>Voláteis (%)</b>	<b>Carbono fixo (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>
<b>Eucalipto</b>	96,80	2,96	0,23
<b>Algaroba</b>	96,48	1,65	1,87

Fonte: Junior et al. (2015)

## 2.4 TRANSPORTE DE BIOMASSA

De acordo com Gonzales et al. (2013), todos os tipos de energia de base biológica enfrentam desafios relacionados ao transporte devido principalmente às características físicas da biomassa em seu estado natural. Assim, o uso do transporte de alta capacidade para longas distâncias se torna uma opção relevante para investigação. Além disso, o uso de barcaças e trens não impactam o tráfego nas comunidades ao redor da planta e, conseqüentemente, não trazem desafios relacionados ao tráfego e a segurança.

#### 2.4.1 TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Espera-se que o transporte ferroviário seja o modo escolhido para o transporte de longa distância e alto volume de biomassa, pois os custos de transporte ferroviário são mais baixos do que os custos de transporte rodoviário para estas condições (Gonzales, 2013). Além disso, a rede ferroviária é maior e de mais fácil acesso do que as embarcações. No entanto, a capacidade limitada da rede de transporte ferroviário é uma grande desvantagem, principalmente devido ao elevado custo de investimento necessário para construir e manter rotas de trem (CBO, 2006).

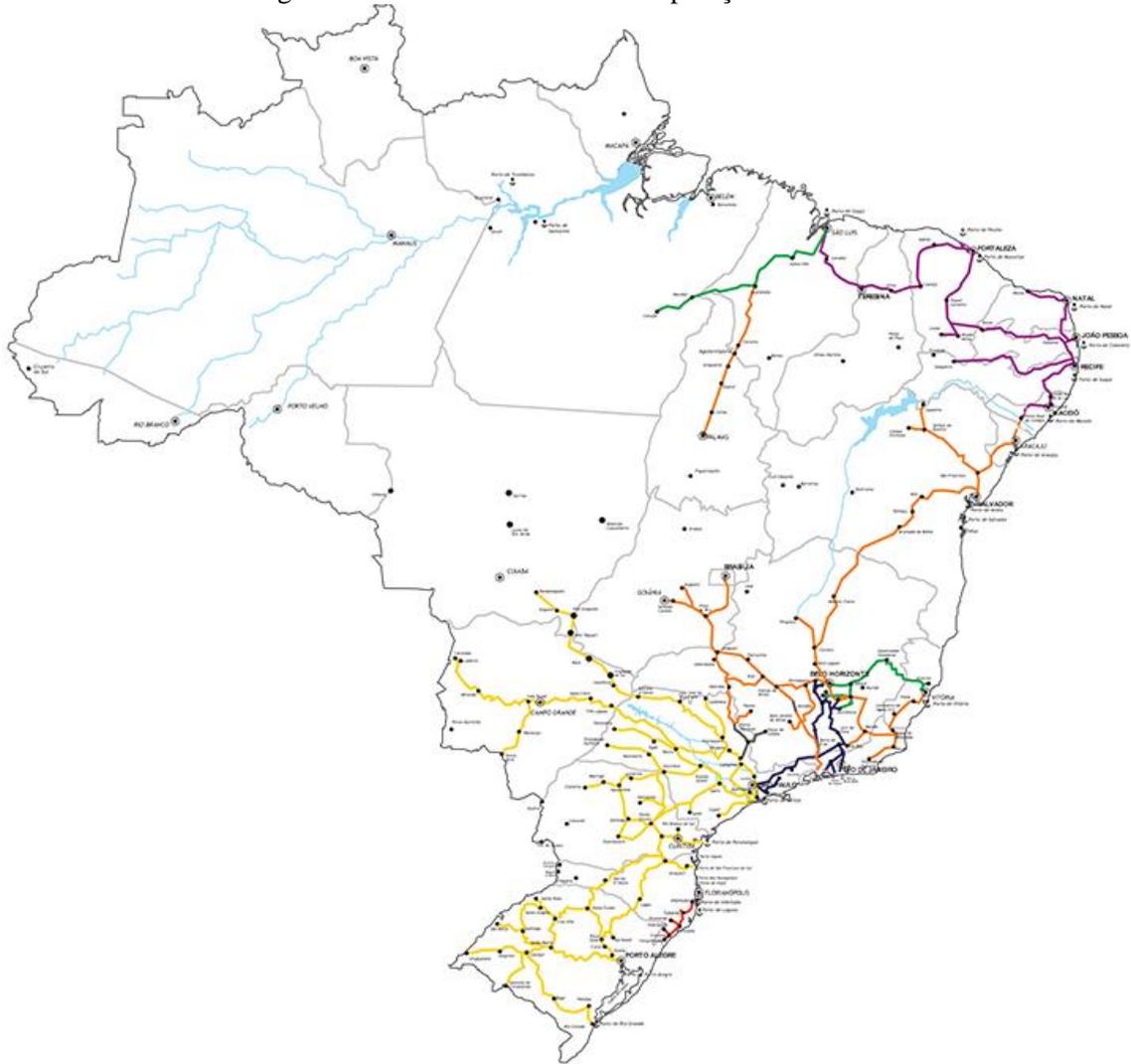
Grãos nos EUA são enviados para os mercados interno e externo por meio de barcaça, ferrovias e rodovias. Embarcações são o meio de transporte com o melhor custo-benefício (Gonzales, 2013). Assim, se disponível, barcaça é um forte concorrente para o transporte de longa distância de grãos. Nos Estados Unidos, o tamanho das redes ferroviárias e seu fácil acesso torna o transporte ferroviário preferível às embarcações para carregamentos de longas distâncias e grandes volumes.

No Brasil, o transporte ferroviário foi colocado em segundo plano em termos de investimentos a partir da década de 50 (Gomes; Menelau, 2012). Os governantes não deram a devida atenção à importância do setor para o escoamento de cargas de baixo valor agregado por longas distâncias, apesar de o Brasil ser um grande exportador de produtos primários e possuir uma vasta extensão territorial. A priorização do transporte rodoviário no Brasil como principal modal para escoamento da produção nacional foi impulsionada pelo alto custo para construção de ferrovias. As rodovias passaram a ser o principal modal de transporte no território brasileiro. Fatores econômicos e políticos também tiveram influência na priorização do transporte rodoviário no Brasil.

Foi com investimentos dos próprios fazendeiros ou via capital de empresas inglesas que surgiram as primeiras estradas de ferro que ligavam as fazendas de café em direção ao porto de Santos. A atividade cafeeira no século passado foi fundamental para a ampliação da malha ferroviária nacional e para sua concentração na região Sudeste.

A Figura 3 mostra o mapa com as malhas ferroviárias em operação no Brasil.

Figura 3 - Malhas ferroviárias em operação no Brasil.



Fonte: ANTF (2018).

#### 2.4.2 TRANSPORTE POR EMBARCAÇÃO

Tipicamente, embarcações movem-se em grupos chamados reboques (*tows*), que são puxados pelo barco de reboque (Gonzales, 2013). O tamanho de um reboque é impactado pelo número de bloqueios ao longo do rio. Por exemplo, no rio Mississipi inferior, no qual não há bloqueios, entre 30 e 40 embarcações são comumente levadas por um único barco de reboque. A massa da carga em uma embarcação depende da profundidade do rio. Seu tempo de viagem da origem até o destino depende do número de bloqueios ao longo do caminho, da massa da carga e, principalmente, da potência do barco de reboque. Os principais custos associados ao barco de reboque são de depreciação, diários de operação, administrativos, de portos e custos relacionados à tripulação, como salários, comida e transporte. Os custos principais relacionados às embarcações são de depreciação e administrativos.

O transporte por embarcações não foi analisado neste trabalho, pois no Brasil boa parte dos rios não é adequado para o transporte de cargas. De acordo com Nexo Jornal (2018), entre as 12 bacias que fazem parte da malha hidrográfica brasileira existem hidrovias capacitadas para o transporte de carga apenas na metade.

#### 2.4.3 TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Caminhões são muitas vezes utilizados para transportar produtos agrícolas, apesar do fato de que o custo por tonelada e por quilometro percorrido por caminhão é maior em comparação com o transporte ferroviário e o naval. As principais razões para a utilização de caminhões são a alta acessibilidade e a grande e de alta capacidade rede de transporte. Diferente de barcaças e trens, a infraestrutura rodoviária é maior e alcança muitas áreas remotas onde os produtos agrícolas são cultivados (Gonzales, 2013). Os modais rodoviário e ferroviário correspondem a aproximadamente 80% do volume de cargas transportadas no País (Gomes; Menelau, 2012). Entre os problemas das rodovias brasileiras estão um péssimo estado de conservação, o que aumenta custos e piora as condições de segurança e os baixos preços cobrados pelos transportadores autônomos acarretam uma maior dificuldade na utilização de outros modos de transportes e na sua integração, o que causa consequências negativas para a sociedade.

#### 2.4.4 CONTRIBUIÇÕES RELEVANTES

Entre algumas contribuições relacionadas ao assunto estão Manzone et al. (2013) que fez uma análise do consumo energético e custos de diferentes veículos usados no transporte de biomassa. Os resultados mostraram que para rotas curtas (menores que 25 km) o tempo de viagem foi aproximadamente o mesmo para todos os tipos de veículos. A maior produtividade foi obtida com trailers de alta capacidade (35 m<sup>3</sup>), o que evidencia a importância do tamanho da carga mesmo para pequenas distâncias. No transporte de longas distâncias, caminhões tiveram a maior velocidade média (42 km/h), enquanto comboios rurais tiveram a menor (24 km/h).

Hahn et al. (2012) desenvolveu um sistema de cronograma para caminhões eficiente para a obtenção de soluções próximas da ótima para problemas de transporte de média escala (até 100 caminhões). Esse sistema foi feito a partir de um modelo usando um algoritmo

heurístico de emparelhamento para otimizar o transporte de biomassa de madeira de serrarias para plantas de conversão ou portos para exportação no Oregon ocidental (EUA).

Golecha et al. (2015) desenvolveu um modelo de transporte de biomassa no qual a densidade de produção e a rede de estradas variam com o raio do transporte, a partir do qual derivou uma fórmula para determinar o custo de transporte da biomassa, a qual representa mais precisamente mudanças no custo de transporte com a capacidade da planta de conversão. A fórmula pode ser usada para avaliar localidades e oportunidades de investimento em produção de biocombustível de larga escala.

Gonzales et al. (2013) fez uma análise de regressão que indicou que os custos de transporte de biomassa densificada são impactados pela distância de transporte, volume de carga, modo de transporte usado, destino, entre outros. Para carregamentos originados das porções centro-oeste e sudeste dos Estados Unidos, o transporte via barcaça, se disponível, é o modo de transporte mais barato. Se não estiver disponível, então trem é o modo mais barato para distâncias maiores do que 161 km. Para distâncias menores, caminhão é o modo mais barato para biomassa densificada.

Miao et al. (2013) apresenta um resumo dos custos e processos envolvidos com a colheita de biomassa lignocelulósica, processamento e entrega a plantas de biocombustível. Alguns trabalhos recentes apresentam modelos de planejamento de localização de instalações e transporte para a rota de suprimento de biocombustíveis (Eksioglu et al., 2009; Parker et al., 2010; Bai et al., 2011; Kim et al., 2011; Papapostolou et al., 2011). Outros trabalhos apresentam modelos estocásticos de locação-transporte para identificar os efeitos da incerteza no desempenho da rota de suprimentos de biocombustíveis (Cundiff et al., 1997; Huang et al., 2010; Kim et al., 2011; Chen e Fan, 2012).

Modelos de otimização multi-objetivo também foram propostos para identificar os impactos da produção de bio-combustíveis em termos de custos, sociedade e meio ambiente (Zamboni et al., 2009; Mele et al., 2009; You e Wang, 2011; You et al., 2012; Miao et al., 2012). Alguns trabalhos analisam o custo de transporte por caminhão para biomassa densificada quando na forma de pellets, pacotes e cubs (Badger and Fransham, 2006; Rogers and Brammer, 2009). Outros estudos analisam o transporte por meio de dutos de biomassa lignocelulósica (Searcy et al., 2007; Ileleji et al., 2010; Judd et al., 2011).

O transporte ferroviário de biomassa é discutido em; Searcy et al., (2007); Sokhansanj et al. (2009), Ileleji et al. (2010), Judd et al. (2011). Esses estudos discutem principalmente

custos de combustível baseados em distâncias e carregamentos/descarregamentos por tonelada de biomassa. Entretanto, variáveis como propriedades da ferrovia, volume do carregamento, tipo de ferrovia, entre outros, não são levados em consideração. Gonzales et al. (2013) fornece uma análise de custo para biomassa densificada usando dados publicamente disponíveis. Gardbro (2014) fez uma modelagem econômica e técnica da rota de abastecimento de biomassa torrefada.

## 2.5 PROCESSOS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA

Atualmente, muitas são as tecnologias de conversão de biomassa, entre as quais as mais conhecidas são a combustão direta, craqueamento, digestão anaeróbica, fermentação, gaseificação, hidrólise, liquefação, pirólise e transesterificação. Cada uma dessas tecnologias está associada a um produto final. A combustão direta, por exemplo, tem como principal finalidade a produção de calor, enquanto que a digestão anaeróbica é responsável pelo biogás e a gaseificação pelo gás de síntese, etc (Almeida, 2014).

### 2.5.1 TORREFAÇÃO

Segundo Basu (2013), torrefação é um processo de pirólise suave que se desenvolve em temperaturas geralmente entre 230 e 300°C na ausência de oxigênio atmosférico. Esse pré-tratamento térmico da biomassa melhora sua densidade energética. Além disso, a degradação biológica da biomassa é reduzida (Silva et al., 2017) e a eficiência da combustão aumenta devido à diminuição da umidade e do TUE (teor de umidade de equilíbrio). O TUE é definido como o ponto no qual a madeira para de absorver a umidade ou liberar umidade para o ar circundante. Neste ponto, diz-se que o material atingiu o equilíbrio com a atmosfera (Delmhorst, 2018). Durante esse processo a biomassa é seca e parcialmente desvolatilizada, diminuindo sua massa enquanto boa parte do seu conteúdo energético é preservado.

Algumas propriedades inerentes da biomassa crua como o alto teor de umidade, degradação biológica, alteração de propriedades físico-químicas durante o armazenamento e dificuldade de moagem, limitam o seu uso na indústria. A torrefação tem sido proposta como um processo de tratamento térmico da biomassa (Arias et al., 2008) que ajuda a superar esses problemas, além de reduzir a energia requerida para a peletização (Kiel, 2008). Tem como objetivo a eliminação do oxigênio sob a forma de gases de baixo valor calorífico como, por

exemplo, CO<sub>2</sub>, água e alguns ácidos orgânicos (Pimchuai et al., 2010; Medic et al., 2012; Prins et al., 2006). A torrefação modifica a estrutura da biomassa, tornando-a mais frágil e quebradiça. Isso é causado pela despolimerização da hemicelulose. Como resultado, o processo de redução de tamanho se torna mais fácil, diminuindo seu consumo energético e o custo do manuseio (Basu, 2010). Fazendo uma analogia, a hemicelulose é como o cimento do concreto armado e a celulose é como as barras de aço. Os fios de microfibrilas (celulose) são suportados pela hemicelulose. A decomposição de hemicelulose durante a torrefação é como o derretimento do cimento do concreto armado. Assim, processos de moagem de biomassa consomem menos energia após a torrefação. Durante a torrefação, a perda de massa da biomassa é devida principalmente à decomposição dos seus constituintes de hemicelulose. Esta se decompõe principalmente dentro da faixa de temperatura de 150 a 280°C.

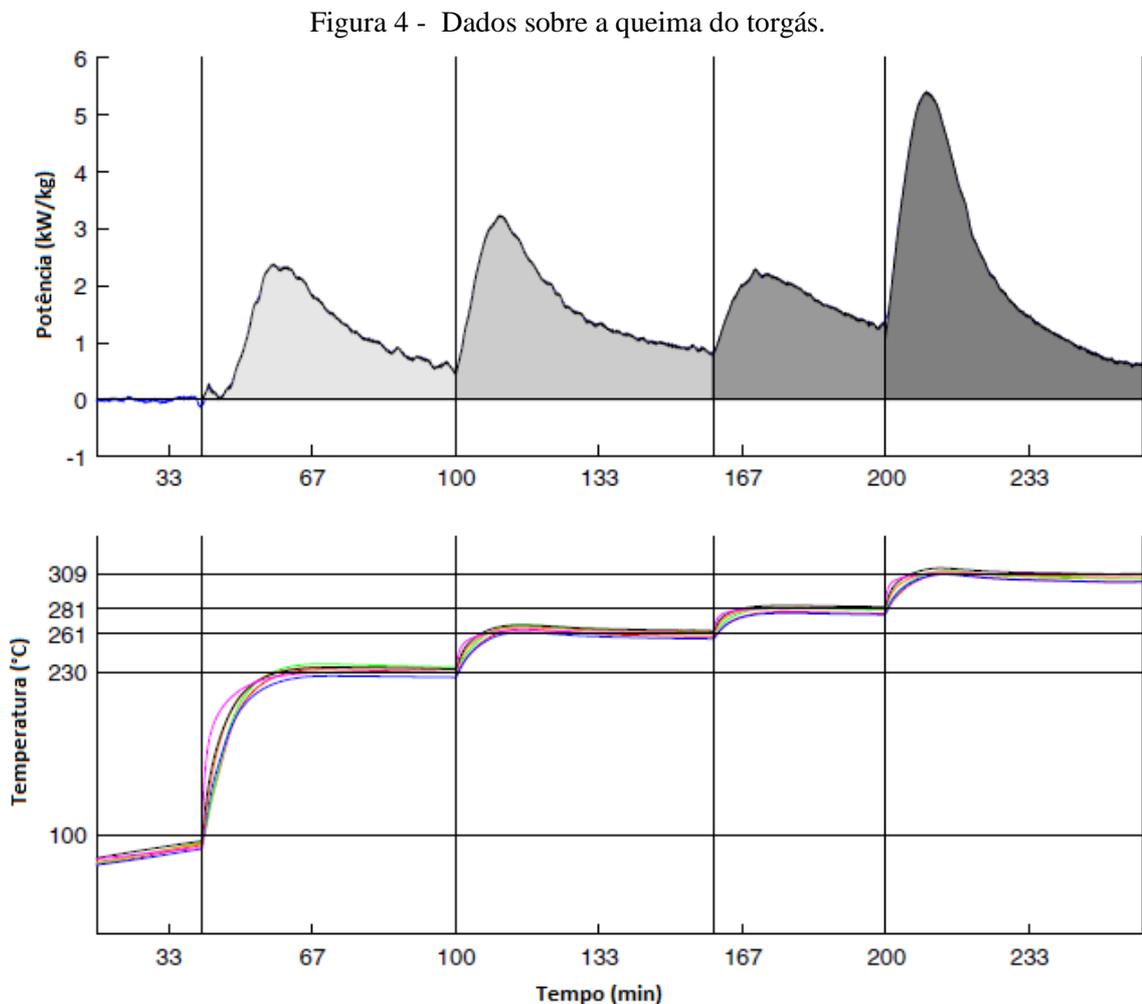
Lignina, o componente aglutinante da biomassa, começa a amolecer acima de sua temperatura de amolecimento vítreo (em torno de 130°C), o que ajuda na compressão da biomassa torrefada. Ao contrário da hemicelulose, a celulose apresenta uma desvolatilização e carbonização limitadas e isso também não começa abaixo de 250°C. Em temperaturas mais baixas (<160°C), à medida que a biomassa seca, são liberados H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>. Acima de 180°C, a reação torna-se exotérmica, liberando gás com pequenos valores de aquecimento. O estágio inicial (<250°C) envolve despolimerização da hemicelulose, levando a uma estrutura de poliaçúcares alterada e rearranjada (Bergman et al., 2005a). A qual, em temperaturas mais elevadas (250-300°C), formam carvão (*char*), CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

A propriedade higroscópica da biomassa é parcialmente perdida na torrefação devido à destruição de grupos OH por meio da desidratação, que previne a formação de ligações de hidrogênio. De acordo com Peng et al. (2013), o teor de umidade das amostras torrefadas nos seus experimentos foi muito baixo comparado com os 10% de umidade da matéria-prima, e o aumento da perda de massa causou uma redução no teor dos componentes voláteis. A densidade aparente, ou seja, o quociente da massa pelo volume ocupado sem subtrair espaços vazios, de amostras torrefadas foi menor do que a das matérias-primas, pois a perda de massa da torrefação ocorreu dentro das partículas com pouca variação em suas dimensões externas.

Ácidos acéticos e o monóxido de carbono liberados na torrefação podem ser responsáveis pelo fornecimento de calor para o próprio processo de torrefação quando são queimados. Em princípio, a potência térmica produzida é mais do que suficiente para fornecer todo o calor necessário tanto para o aquecimento como para o próprio processo de torrefação (Bergman et al., 2005; Prins et al., 2006; Kiel et al., 2008; James, 2016; Koppejan et al., 2012). Se as perdas

térmicas forem suficientemente baixas, uma quantidade substancial do calor restante também pode ser usada para secar a biomassa antes do aquecimento (Z.C. et al., 2017).

A reciclagem compreende a re-pressurização dos gases gerados na torrefação (torgás) para compensar a queda de pressão no circuito reciclado e o aquecimento deste gás para fornecer a demanda de calor necessária no reator de torrefação. A Figura 4 mostra os resultados de um experimento realizado por Z.C. et al., (2017). A potência produzida pelo torgás é relacionada com a temperatura do processo e a biomassa é movida dentro de um reator com um gradiente de temperatura. O gráfico inferior mostra as curvas de temperatura da amostra de biomassa quando ocorre o deslizamento por meio do reator e no superior, a produção de calor devido à combustão do torgás é mostrada.



Fonte: Adaptado de Z.C. et al. (2017).

Segundo Schorr et al. (2012), a torrefação vem sendo desenvolvida por mais de 60 fornecedores de tecnologia, desenvolvedores e instituições de conhecimento devido ao seu potencial econômico. A maior parte dos projetos em implantação estão sendo realizados na América do Norte e Europa.

O processo de torrefação da empresa estadunidense Earthcare envolve um tambor rotativo com um pequeno ângulo de inclinação positiva (Koppejan et al., 2012). O tambor roda dentro de uma concha isolada através da qual os gases quentes fluem por meio de uma corrente de ar induzida. A temperatura de torrefação é mantida dentro do reator de torrefação sem fluxo de ar dentro do reator, o que garante um ambiente com escassez de oxigênio. A biomassa sofre desvolatilização e pequena quantidade de perda de massa devido aos voláteis liberados. Estes são transportados de volta para o queimador de biomassa onde são incinerados (Koppejan et al., 2012). Os gases quentes que fornecem calor ao reator por meio de condução são transportados para o secador, minimizando a perda de calor e melhorando a eficiência do processo. A biomassa torrefada é então transferida para o estágio de resfriamento hermético. O refrigerador consiste em um transportador de parafusos mantido dentro de um revestimento de água circulando continuamente. A água a temperatura ambiente circula por meio do revestimento. Uma vez que a biomassa torrefada é arrefecida até a temperatura desejada, ocorre a entrada em uma unidade de compressão para aumentar sua densidade aparente em 50% a 75%. O tamanho e a forma do produto comprimido podem ser adaptados às necessidades de transporte e armazenamento.

#### *2.5.1.A Combinação da torrefação com a compressão*

Segundo Phanphanich (2010), combustíveis torrefados podem ser melhor manuseados quando comprimidos, devido ao aumento da fluidez e da densidade. O material comprimido também passa a ter uma melhor eficiência de combustão devido ao alto poder calorífico e menor umidade. Segundo Nimlos et al. (2003), por ser hidrofóbica, a biomassa torrefada pode beneficiar muito a produção de pellets. Na Tabela 5 estão expostos valores de variação da densidade energética devido à compressão de biomassa torrefada segundo diversos autores.

Tabela 5 - Aumento da densidade energética devido à compressão da biomassa torrefada.

Densidade energética em kWh/st**	Poder calorífico líquido do produto em MJ/kg	Aumento em GJ/m <sup>3</sup>	Aumento em porcentagem *	Autor
***	***	18	20	Lipinsky (2002)
***	***	13 a 17	30 a 80	Kiel (2008)
***	19 a 22	***	***	Bergman (2005)
4200 a 5100	***	De 1000 a 19000 kWh/st	***	Obernberger and Thek (2010)

\*Em relação aos pellets de madeira convencionais.

\*\* st é uma medida de volume equivalente a 1 m<sup>3</sup>, mas considera os espaços vazios entre os pedaços do material.

\*\*\* Informação não disponível.

De acordo com Phanphanich (2010), para peletizar a biomassa torrefada foi preciso a aplicação de uma pressão significativamente maior para alcançar uma alta densidade comparado com a biomassa não tratada resultando em um aumento na energia consumida na compressão.

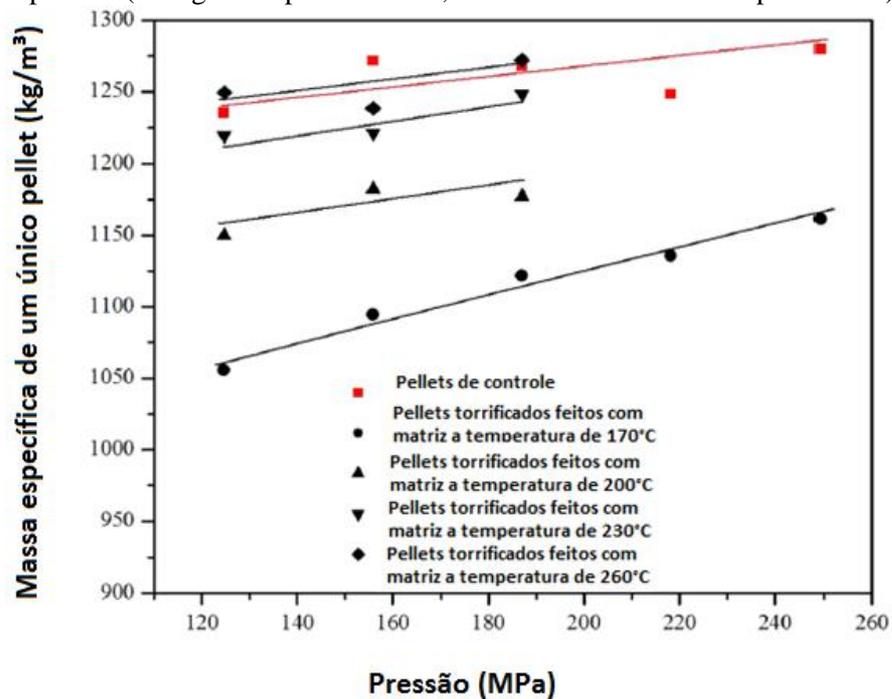
Segundo Bergman (2005), a combinação de torrefação e peletização (TOP Pellets) tem várias vantagens e, um exemplo, é a maior eficiência térmica (96-98,5%). Entre algumas aplicações de produtos torrefados comprimidos estão a combustão de pequena escala (caldeiras e fogões de pellets), produção de eletricidade e geração de calor na produção de combustíveis de transporte via gaseificação de fluxo retido e usinas elétricas de co-queima de larga escala ou usinas dedicadas à queima de biomassa (Phanphanich, 2010).

Segundo Reed (2002), pellets torrefados, em geral, têm densidade mais alta do que pellets comuns. Segundo Peng et al. (2013), a densidade de um pellet torrefado depende das condições de compressão e de torrefação. Devido à remoção de umidade e voláteis das matérias-primas, as amostras torrefadas são mais difíceis de serem comprimidas em pellets fortes sob as mesmas condições de compressão do que as que são usadas para fazer pellets comuns.

De acordo com Ghiasi et al. (2014), apesar de que comumente os pedaços de madeira são primeiro torrefados e posteriormente comprimidos, foi demonstrado em seu trabalho que era mais energeticamente eficiente comprimir primeiro e depois torrificar-los. No entanto, o uso de um ligante no esquema de processo convencional pode reduzir significativamente a energia consumida, resultando em pellets com maior resistência a quebra, durabilidade e densidade. Entretanto, o ligante compromete algumas outras qualidades dos pellets produzidos e o esquema de comprimir primeiro sem o uso de ligantes e depois torrificar é superior em termos de sua alta estabilidade em água, melhor poder calorífico, maior teor de carbono e menor teor de umidade. Portanto, torrificar após a peletização parece ser uma estratégia promissora para obter pellets de madeira torrefados com razoáveis propriedades de transporte e alto potencial em diferentes aplicações.

A Figura 5 mostra a relação entre a densidade de um pellet, a temperatura e a pressão de compressão. A densidade do pellet torrefado aumenta com o aumento da temperatura da matriz e a pressão de compressão e foi mais sensível à temperatura da matriz. Com o aumento da severidade da torrefação, a massa específica dos pellets torrefados diminui (Peng et al., 2013). Segundo Phanphanich (2010), em seus experimentos, a temperatura de torrefação afetou negativamente a densidade dos pellets, uma vez que a madeira não tratada alcançou a densidade máxima, enquanto a densidade dos pellets diminuiu com o aumento da temperatura de torrefação.

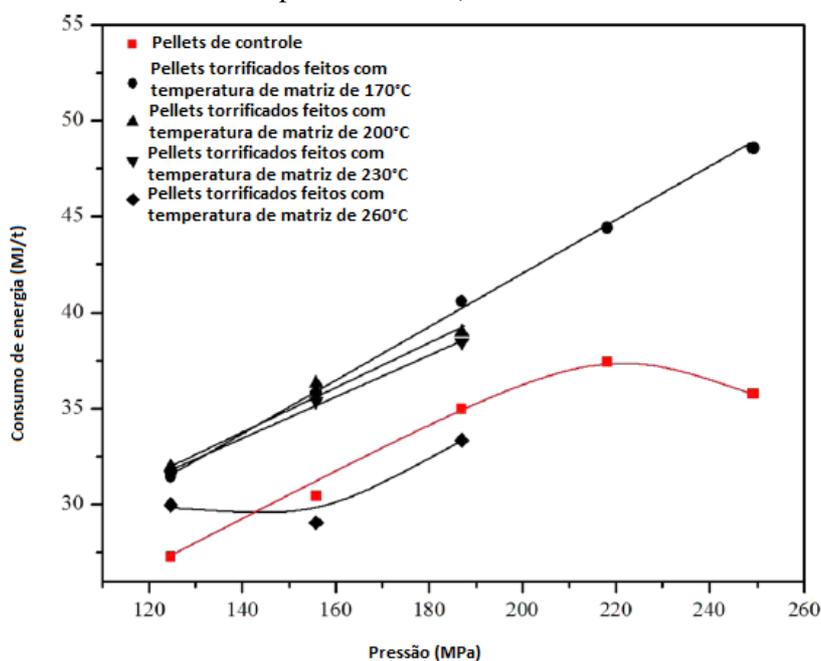
Figura 5 - Massa específica de pellets comuns e torrefados em função da temperatura e pressão de compressão (serragem de pinheiro de 0,23 mm torrefada a 280°C por 52 min).



Fonte: Adaptado de Peng et al. (2013).

A Figura 6 mostra a relação entre a energia necessária para produzir um pellet, a temperatura e a pressão de compressão. Observa-se que a energia requerida aumenta com o aumento da pressão e da temperatura da matriz.

Figura 6 - Consumo de energia para produzir pellets em função da pressão de compressão e temperatura da matriz (serragem de pinheiro de 0,23 mm) torrefado a 280°C por 52 min com 29% de perda de massa).



Fonte: Adaptado de Peng et al. (2013).

### 2.5.1.B Fatores de influência na torrefação

#### 2.5.1.B.a Temperatura

Um estudo sobre torrefação de briquetes de madeira concluiu que a temperatura teve um efeito maior sobre os produtos do que o tempo de residência (Felfli et al., 2005). A qualidade do produto de torrefação sofre uma influência dominante da temperatura. De acordo com Peng et al. (2013), Zanzi (2004) e Strandberg et al. (2015), com o aumento da temperatura de torrefação e tempo de residência a densidade aparente, rendimento energético, teor de hidrogênio e teor de oxigênio diminuíram, mas a perda de massa, densidade real do material, poder calorífico superior e teor de carbono aumentaram. Baseado nas três principais propriedades da qualidade dos pellets torrefados investigados, aparentemente uma condição de torrefação adequada é uma temperatura de 250 a 300°C com uma perda de massa de cerca de 30%. Bergman (2005) selecionou uma temperatura de torrefação de 280°C e 17,5 min de tempo de reação para melhor moabilidade, qualidade do gás combustível e alta eficiência térmica.

### 2.5.1.B.b Tempo de residência

Repellin (2010) relatou que apenas o tempo de duração de até 20 min teve um efeito significativo na energia de moagem e redução de tamanho das partículas da madeira torrefada, aumentando para 40 e 60 min de duração a melhoria não variou. Segundo Pimchua et al., (2009), para tempos de residência de 15, 30 e 45 min o aumento no PCS é de 22,35; 24,96 e 25,51 respectivamente.

### 2.5.1.C Energia requerida pela torrefação

A Tabela 6 mostra a energia requerida pela torrefação segundo diferentes autores.

Tabela 6 - Energia requerida pela torrefação.

<b>Matéria- prima</b>	<b>Energia requerida</b>	<b>Tempo de residência (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Autor</b>
*	87 +- 449 kJ	30	250	Prins et al. (2006)
*	124 +- 400 kJ	10	300	Prins et al. (2006)
Pedaços de madeira	545 kJ/kg	*	*	Ghiasi et al. (2014)
Pellets de madeira	523 kJ/kg	*	*	Ghiasi et al. (2014)
*	234 kJ/kg	*	*	Michel (2015)

\* Informação não disponível.

Segundo Michel (2015), a energia potencial térmica e química total disponível no torgás é aproximadamente 2% maior do que a necessária para secagem e torrefação de biomassa com um teor de umidade inicial de 35%. Seu resultado foi que o PCS do torgás é de 13,3 MJ por kg de massa seca perdida da biomassa. A máquina de torrefação Torre Tech da empresa estadunidense Agritech, na qual os cálculos desse trabalho foram baseados, é capaz de processar pedaços de madeira com até 40% de umidade (bu) sem adição de energia externa e possivelmente material de até 55% de umidade (bu), mas o uso de gás adicional é necessário (James, 2016).

#### *2.5.1.D Efeito na moagem*

A Tabela 7 mostra a energia requerida na moagem de biomassa torrefada segundo diversos autores.

Tabela 7 - Energia requerida na moagem de biomassa torrefada.

Porcentagem de redução *	Energia requerida sem torrefação (kJ/kg)	Energia requerida com torrefação (kJ/kg)	Tempo de residência da torrefação (min)	Temperatura de torrefação (°C)	Fonte
**	856,8	82,8	**	**	Phanphanich (2010)
**	292	39	**	**	Ghiasi et al. (2014)
**	**	231,372	**	200	Li (2014)
**	**	61,56	**	300	Li (2014)
57	**	**	**	225	Phanphanich (2010)
70	**	**	**	250	Phanphanich (2010)
78	**	**	**	275	Phanphanich (2010)
90	**	**	**	300	Phanphanich (2010)

\*Porcentagem de redução na energia requerida na moagem devida à torrefação.

\*\* Informação não disponível.

A torrefação permite um aumento na capacidade de redução de tamanho de 2-6,5 vezes (Bergman et al., 2005; Ouwens e Küpers, 2003; Persson et al., 2007). A temperatura de torrefação de 240°C e tempo de residência de 30 min resultam nas melhores propriedades de moagem da madeira de eucalipto e apresenta uma perda de massa de 20% e rendimento energético de 90% (Arias et al., 2008).

### 2.5.1.E Efeito na compressão

A Tabela 8 mostra uma comparação relacionada à energia requerida na compressão de biomassa torrefada.

Tabela 8 - Energia requerida na compressão de biomassa torrefada.

Porcentagem *	Obervação	Energia requerida sem torrefação	Energia requerida com torrefação	Autor
15	Processo de peletização	757 kJ/kg	1164 kJ/kg	Ghiasi et al. (2014)
<2	Processo de peletização com ligante		461 kJ/kg	Ghiasi et al. (2014)

\*Porcentagem de material que deixou de ser peletizado.

### 2.5.2 COMPRESSÃO

A compressão é outro processo usado para melhorar as propriedades da biomassa que aumenta a densidade de energia volumétrica. Consiste na aplicação de uma força mecânica para comprimir a biomassa transformando-a em partículas sólidas de tamanho uniforme. Os objetivos deste processo são aumentar a densidade dos 40-200 kg/m<sup>3</sup> iniciais aos 600-1400 kg/m<sup>3</sup> finais, facilitar estocagem e manuseio, reduzir o custo de transporte e diminuir a umidade (Chen et al., 2015, Di Giacomo & Taglieri, 2009, Li & Liu (2000), Sokhansanj et al. (2005)). Segundo Chen et al. (2015), não existe um processo comercial para compressão de biomassa torrefada, entretanto alguns trabalhos sobre o tema fornecem informações importantes como Phanphanich (2010), que afirmou que a densidade de pellets torrefados poderia atingir 1032 kg/m<sup>3</sup> quando a amostra torrefada foi pré-condicionada a uma umidade de 3,5 a 10,5% em massa.

De acordo com Peng et. al (2013), amostras torrefadas pré-condicionadas a em torno de 10% de umidade poderiam resultar em pellets de alta qualidade. Entretanto, a densidade do pellet torrefado feito de amostras pré-condicionadas torrefadas ainda era menor do que a dos

pellets de controle feitos de amostras de pó de serra não tratadas (Phanphanich, 2010; Peng et al., 2013). Pyle (1976) sugeriu que uma temperatura da matriz de 93°C poderia ser usada para fazer pellets torrefados duráveis sem nenhum agregador, enquanto Verhoeff et al. (2011) afirmou que pellets torrefados com densidade maior que a dos pellets de controle poderiam ser obtidos com o uso de uma forma a 260°C para comprimir pó de serra torrefado preparado a 280°C.

Segundo Chen et al. (2015), tem se percebido que o custo total que inclui produção, transporte e logística pode ser menor do que o custo dos pellets regulares, US\$ 5,36/GJ para pellets torrefados versus US\$ 6,61/GJ para pellets regulares produzidos na Europa ou US\$ 7,67/GJ para pellets torrefados versus US\$ 8,68/GJ para pellets regulares canadenses vendidos no mercado europeu. Correções monetárias foram feitas de acordo com UOL (2019), com 1 euro valendo 1,14 dólares.

De acordo com Peng et al. (2013), lignina é um ligante natural na compressão de biomassa. Segundo Phanphanich (2010), a peletização da madeira é o pré-processamento mais promissor comercialmente, fornecendo uma solução de curto prazo para a crise energética. Os benefícios da compressão são significativos para resíduos de madeira, pois estes são bem heterogêneos e esse processo melhora a uniformidade no tamanho, forma e distribuição de componentes.

#### *2.5.2.A Produtos da compressão*

##### *2.5.2.A.a Balas (bales)*

É um método tradicional de compressão comumente usado em colheitas. As balas podem ser quadradas, retangulares ou redondas, dependendo do tipo de máquina usada. As dimensões das balas redondas variam de 1,2 m x 1,5 m a 1,5 m x 1,5 m. Grandes faixas retangulares geralmente medem 0,9 m x 0,9 m x 1,8 m de comprimento. Balas redondas são mais baratas para produzir, no entanto, grandes balas quadradas são geralmente mais densas e fáceis de manusear e transportar (Clarke et al., 2011).

### 2.5.2.A.b Pellets

A Tabela 9 reúne informações de diferentes autores sobre a densidade aparente de pellets de biomassa.

Tabela 9 - Densidade aparente de pellets.

<b>Densidade aparente</b>	<b>Autor(es)</b>
365 a 950 kg/m <sup>3</sup>	Mani et al (2006); Sokhansanj and Fenton (2006); Theerarattananoon et al. (2011)
500 a 650 kg/m <sup>3</sup>	Peng et al. (2013)

Pellets são mais fáceis de manusear do que outros produtos de biomassa comprimida, pois permitem a utilização da infraestrutura para manuseio de grãos. São formados por um processo de extrusão, utilizando uma prensa de pistão, na qual o material de biomassa finamente moído é forçado por meio de matrizes de seção transversal redondas ou quadradas e cortado em um comprimento desejado. A forma padrão de um pellet de biomassa é de um cilindro, com um comprimento menor que 38 mm e um diâmetro em torno de 7 mm. Embora de forma uniforme, os pellets podem ser facilmente quebrados durante o manuseio. Pellets diferentes variam em energia e conteúdo de cinzas (Clarke et al., 2011). De acordo com Peng et al. (2013), em sua maioria são usados na combustão para aquecimento de casas de família, sistemas de aquecimento de bairros e geração de eletricidade.

### 2.5.2.A.c Cubos

São como pellets maiores, geralmente de forma quadrada e menos densos do que os pellets. Os tamanhos de cubos variam de 13 a 38 mm em seção transversal, com um comprimento variando de 25 a 102 mm. O processo envolve a compactação da biomassa picada

com uma prensa de roda pesada, depois a biomassa é forçada por meio de matrizes para produzir cubos (Clarke et al., 2011).

#### 2.5.2.A.d Briquetes

São semelhantes aos pellets, porém maiores com um diâmetro de 25 mm ou maiores e são formados quando a biomassa é perfurada, usando uma prensa de pistão em uma matriz sob alta pressão. Alternativamente, um processo conhecido como extrusão de parafuso pode ser usado. Neste, a biomassa é extrudada por um parafuso por meio de uma matriz aquecida. (Clarke et al., 2011). Segundo Peng et al. (2013), geralmente apresentam formato de disco com diâmetro entre 50 e 100 mm e comprimento entre 20 e 50 mm. Sua densidade aparente varia entre 320 e 560 kg/m<sup>3</sup> e seu teor de umidade é entre 10 e 12% em massa. Seus usos finais são o aquecimento residencial e industrial.

#### 2.5.2.A.e Logs

Têm formato cilíndrico, de 50 a 100 mm de diâmetro e entre 300 e 400 mm de comprimento (Peng et al., 2013). Similarmente aos briquetes são principalmente usados em residências, lareiras e fornos.

#### 2.5.2.A.f Discos

São semelhantes em aparência a um disco de hóquei, com um diâmetro de 75 mm. São produzidos usando briquetadoras e são resistentes à umidade. Os discos têm uma densidade similar à dos pellets, com a vantagem de que exigem menores custos de produção (Clarke et al., 2011).

#### 2.5.2.A.g Pedacos de madeira

São usados em muitas operações desde aplicações domésticas até usinas de energia de larga escala. Pedacos de madeira para caldeiras variam de 5 a 50 mm de comprimento. São produzidos em máquinas de cavaqueamento (Clarke et al., 2011).

### 2.5.2.B Mecanismo de compactação do pó

Primeiramente, uma estrutura mais compacta é produzida a medida que as partículas se movem devido à baixa pressão e passam a ocupar espaços vazios. Ocorre dissipação de energia devido ao atrito entre as partículas e entre essas e as paredes, no entanto a maioria das propriedades originais é mantida (Mani et al., 2004a).

Posteriormente, como consequência da elevação da pressão, as partículas se deformam elástica e plasticamente, além de se fragmentarem propiciando o preenchimento de espaços vazios menores que seus tamanhos iniciais. Ocorre um aumento nas forças de ligação entre partículas permitindo a formação de uma massa coerente (Gray, 1968).

Caso ocorra a fusão dos constituintes, haverá a formação de pontes sólidas entre as partículas no momento do resfriamento.

### 2.5.2.C Parâmetros que afetam a compressão

#### 2.5.2.C.a. Pressão de compressão

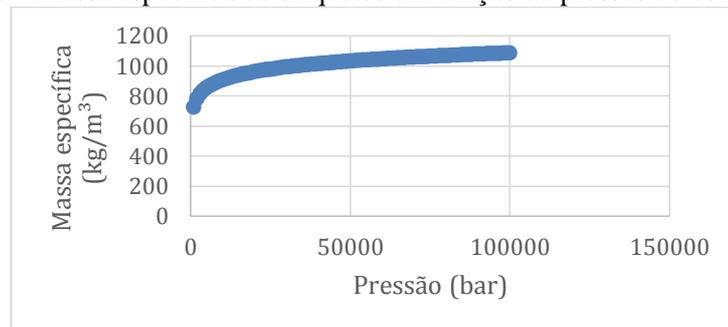
De acordo com Skyba et al. (2009), a densidade aumenta sob compressão proporcionalmente à força de compressão. Porém, segundo Ndiema (2002), existe um valor de pressão ótima que resulta na maior densidade e coesão dos compactos possível. Moinhos de pellets geralmente aplicam pressões entre 50 e 150 MPa (Sitkel, 1986). Segundo Phanphanich (2010), a influência da força compressiva na densidade do pellet foi comparativamente pequena em seu estudo. A densidade inicial do pellet foi melhorada para cargas menores, enquanto o aumento das forças de compressão para 13.000 N e 18.000 N não aumentou significativamente a densidade inicial do pellet. Liu et. al (2000) chegou à conclusão que a pressão de compactação para fazer logs fortes a partir de pó de serra a temperatura ambiente precisaria ser de pelo menos 100 MPa.

Chin e Siddiqui (2000) propõem a Equação 1 como a relação entre a densidade relaxada e a pressão de compressão para pó de serra:

$$\rho = 78,3 \times \ln(P) + 185,6 \quad (01)$$

$\rho$  é a densidade relaxada ( $\text{kg/m}^3$ ),  $P$  é a pressão de compactação (bar). Esta forma de relação é suportada pelos resultados obtidos por Husain et al. (2002). A Equação 1 foi usada na plotagem do gráfico na Figura 7. Pode-se observar que a massa específica parece crescer assintoticamente com o aumento da pressão.

Figura 7 - Massa específica de briquetes em função da pressão de compressão.



Fonte: Adaptado de Chin e Siddiqui (2000).

#### 2.5.2.C.b Temperatura da matriz de compressão

Segundo Peng et al. (2013), a dureza dos pellets torrefados depende principalmente da temperatura da matriz de compressão e da perda de massa no processo de torrefação. De acordo com os experimentos de Kutnar et al. (2012), a maior densidade do material comprimido seco foi obtida nas amostras comprimidas sob condições transientes a  $170^\circ\text{C}$ .

#### 2.5.2.C.c Geometria da matriz

De acordo com Phanphanich (2010), a taxa de produção e a energia requerida dependem da razão entre a espessura da matriz e o diâmetro do seu furo. Para maximizar a qualidade dos pellets a razão ideal é de 8 a 10 (Hill & Pulkinen, 1988; Tabil & Sokhansanj, 1996a; Winowiski, 1985).

#### 2.5.2.C.d Velocidade da matriz e tempo de residência

Segundo MacBain (1984), usando uma matriz de grande diâmetro, uma baixa velocidade da matriz produz pellets duráveis para materiais com baixa densidade aparente como por exemplo alfafa. A velocidade de rotação da matriz comumente varia entre 130 e 400 rpm para peletizadoras comerciais (Hasting et al., 1978).

#### 2.5.2.C.e Tamanho, forma e distribuição das partículas

As dimensões das partículas são um fator de influência significativa na durabilidade e densidade dos pellets. Em geral pellets de densidade mais alta são produzidos quando a moagem é fina (abaixo de 2 mm) devido à maior relação entre a área superficial e o volume das partículas, o que propicia um aumento na força das ligações, melhor penetração de umidade e ligante e por isso aumenta a resistência (Lehtikangas, 2001; Payne, 1978; Tabil e Sokhansanj, 1996a).

#### 2.5.2.C.f Teor de umidade

O teor de umidade da biomassa é um parâmetro de grande influência uma vez que a água ou o vapor desempenham o papel de aglutinante de filme com ligações por meio de sorção capilar e propiciando ligações por meio das forças de Van der Waals, elevando a área de contato das partículas (Mani et al., 2003). A umidade melhora o amolecimento e umedecimento das partículas e facilita a ligação, aumentando a compressão e durabilidade dos pellets (Hasting et al., 1978; Tabil e Sokhansanj, 1996a; Thomas e van der Poel, 1996; Thomas et al., 1997). A água na matéria prima ainda ajuda a diminuir o atrito da máquina (Lehtikangas, 1999). Umidade em excesso, entretanto, deixa o material escorregadio o que resulta em menor densidade dos pellets. Segundo Srivastava et al. (1981), o máximo teor de umidade para a produção de feno comprimido de alta durabilidade é de 11%. De acordo com Miranda et al. (2009), em seus experimentos, a umidade do pellet foi um pouco menor do que a do resíduo sem compressão e secagem ao ar (aproximadamente 10%). O motivo para isso é que a fricção entre os rolos e a matriz no processo de compressão causa uma elevação na temperatura.

#### 2.5.2.C.g Aplicação de ligantes

Segundo Phanphanich (2010), ligantes podem ser necessários para diminuir a elasticidade da biomassa devido à tendência de retorno quando a pressão é liberada. De acordo com Payne (1978), a lignina quando usada como ligante aumenta tanto a qualidade como a taxa de produção dos pellets.

#### 2.5.2.D Etapas do processo de peletização

##### 2.5.2.D.a Secagem

O ar quente ou gases de combustão são usados para reduzir a umidade da biomassa úmida após a colheita. O teor de umidade, o tamanho e a homogeneidade da matéria-prima afetam o tempo de secagem e a temperatura. O baixo teor de umidade do material permite um processo eficiente de redução de tamanho e peletização (Phanphanich, 2010).

Segundo Obernberger; Thek (2010), o processo de compressão na peletizadora depende do atrito entre o canal de compressão e a matéria-prima e é, entre outras coisas, determinado pelo teor de umidade da matéria-prima. É por isso que um teor ótimo de umidade deve ser alcançado de acordo com a tecnologia de peletização e a matéria-prima usadas. Se uma matéria-prima disponível já tem o teor de umidade adequado, a secagem, evidentemente, não é necessária. Esse pode ser o caso com pó de serra ou pedaços de madeira que se acumulam no processamento de madeira serrada seca ou com pó de madeira que é gerado pela lixagem de madeira maciça. Portanto, essas matérias-primas são preferidas para a peletização.

##### 2.5.2.D.b Redução de tamanho (moagem)

Segundo Phanphanich (2010), a moagem diminui o tamanho das partículas, a densidade e a forma do material, e ainda elimina a heterogeneidade nos resíduos de biomassa. Segundo Hasting et al. (1978), os espaços vazios entre as partículas são diminuídos, ocasionando uma elevação na densidade aparente da biomassa.

Segundo Obernberger; Thek (2010), em uma rota de produção de pellets, após a secagem ou como um passo primário quando o material já está seco, a matéria-prima é moída até o tamanho de partícula adequado. O valor alvo típico para o tamanho de partícula das matérias-primas é de 4 mm quando pellets de 6 mm de diâmetro devem ser produzidos (6 mm é o diâmetro comum para pellets a serem usados em fornos de pequena escala), mas desvios são possíveis quando requeridos pela peletizadora ou pelo material em si. Se pellets de diâmetro maior forem produzidos, o tamanho de partícula do material de entrada pode ser maior também. No entanto, não apenas o diâmetro do pellet, a peletizadora e a matéria-prima determinam o tamanho de partícula necessário, mas também os requisitos do usuário. Por

exemplo, em grandes estações de potência que foram convertidas para usar pellets ao invés de carvão, os pellets geralmente são esmagados em pulverizadores (geralmente moinhos de martelos) para que as frações de tamanho original da peletização do material sejam obtidas antes da injeção na caldeira. E se as partículas forem muito grandes não vão queimar completamente e, como resultado, as emissões da pilha e a cinza do fundo vão conter carvão não queimado. Quanto menores as partículas do material de entrada, melhor será a eficiência de conversão. No entanto, não faz sentido moer a matéria-prima mais do que o necessário, porque isso iria demandar mais energia para produzir frações mais finas. Nos fornos nos quais os pellets são queimadas como estão, o tamanho das partículas é menos relevante. A moagem de matéria-prima é geralmente feita por moinhos de martelo, porque sua moagem resulta nas dimensões e homogeneização corretas (Oberberger; Thek, 2010).

Martelos com revestimento de metal duro são montados no rotor do moinho de martelos. Estes arremessam o material contra a ponte de moagem no interior do moinho no qual ocorre a quebra dos pedaços de madeira (Oberberger; Thek, 2010). O tamanho das partículas da saída é determinado pela tela através da qual o material moído deve passar. Segundo Esteban et al. (2006), ao diminuir o tamanho do produto da moagem a energia necessária aumenta. Matéria prima úmida é geralmente mais difícil de moer, pois o material tende a bloquear as telas entupindo os buracos, mas o risco de incêndios e explosões é diminuído pelo processamento de material úmido em moinhos de martelos. Além disso, a secagem é mais rápida quanto menor o tamanho das partículas. A moagem da matéria-prima antes e depois da secagem é comum. Para peletizar culturas energéticas ou toras de madeira primeiro é necessário produzir pedaços de madeira. Isso pode ser feito usando picadores móveis na colheita ou picadores estacionários no local de produção (Oberberger; Thek, 2010).

Existem duas opções para o tratamento adicional de pedaços de madeira produzidos a partir de toras (incluindo cavacos de madeira florestais e industriais). Podem ser secos imediatamente ou moídos grosseiramente antes de secar. Secar o material diretamente pode causar problemas devido à distribuição não homogênea da umidade dentro dos pedaços (Oberberger; Thek, 2010). Se o material é moído grosseiramente antes de secar este ainda deve ser moído mais finamente após a secagem, a fim de torná-lo mais homogêneo e desintegrar os possíveis nódulos que possam ter se formado durante o processo de secagem. A moagem de pedaços de madeira úmida requer mais energia do que a de pedaços de madeira seca. Além disso, as vazões diminuem significativamente quando se trabalha com pedaços de

madeira úmidos ou secos ao invés de pó de serra. É por isso que uma série de moinhos de martelos ou moinhos maiores são usados para moer pedaços de madeira, o que naturalmente aumenta os custos de investimento. Apesar dessas desvantagens, recomenda-se a moagem grosseira antes da secagem, pois facilita o controle (Oberberger; Thek, 2010).

#### 2.5.2.D.c Condicionamento

Consiste na adição de vapor ou água aos materiais preparados imediatamente antes da peletização. Através da adição de vapor ou água, uma camada líquida é formada na superfície das partículas (Oberberger; Thek, 2010). Como resultado, a desigualdade é equilibrada e os mecanismos de ligação ocorrem durante o processo seguinte de compressão. Se o condicionamento de vapor ocorrer antes da peletização, o teor de umidade obtido com a secagem deve estar um pouco abaixo do ótimo para a peletização, porque o condicionamento aumenta o teor de umidade até certo ponto.

#### 2.5.2.D.d Peletização

Segundo Oberberger; Thek (2010), o próximo passo após a secagem, moagem e condicionamento é o processo de peletização propriamente dito. A tecnologia de peletização origina-se da indústria de ração animal e foi adaptada à madeira para permitir a produção de um combustível de biomassa homogêneo em forma, tamanho das partículas e teor de umidade. Produtores em grande escala normalmente usam moinhos de pellets de matriz plana ou em forma de anel que são especialmente projetados para peletizar madeira.

#### 2.5.2.D.e Resfriamento

A última etapa do processo de peletização é o resfriamento. De acordo com o tipo de moinho de pellets e parâmetros operacionais, a temperatura dos pellets logo após o processo pode variar entre 80 e 130°C. Esse é o motivo pelo qual o resfriamento antes do armazenamento é necessário. O resfriamento também aumenta a durabilidade mecânica (Oberberger; Thek, 2010).

#### 2.5.2.D.f Torrefação

A torrefação pode ser adicionada de forma opcional ao processo de peletização para se aproveitar dos benefícios já mencionados deste tratamento. Como exemplo pode-se citar a ECN na Holanda que está na vanguarda da pesquisa sobre torrefação combinada com peletização [Bergmann et al. (2007);Kiel et al. (2008); Van Daalen (2008); Bergman et al. (2005)].

#### 2.5.2.E *Energia requerida pela compressão*

A energia requerida no processo de peletização pode ser dividida em duas partes. Uma é gasta no processo de compressão do material e a outra que é mais da metade é considerada um desperdício e é consumida devido ao atrito de pele (Sitkel, 1986). A Tabela 10 mostra a energia requerida no processo de compressão segundo diferentes autores.

Tabela 10 - Energia requerida na compressão.

<b>Energia requerida (MJ/t)</b>	<b>Autor</b>
136,8	Obernberger; Thek (2010)
54 a 126	Sokhansanj et al. (2005)
277,2	Shepperson & Marchant (1978)
134,6	Reed et al., (1980)
18 a 31	Faborode & O'Callaghan, (1987)
108 a 162	Miles & Miles Jr, (1980); Reed & Byrant, (1978)
23,0 a 86,16 MJ/t	Phanphanich (2010)

Observa-se que os valores variam bastante, pois o material sendo comprimido e condições são diferentes.

De acordo com Of and Die, (1964), a energia necessária para a peletização aumenta com o aumento do teor de umidade.

### 2.5.3 SECAGEM

A secagem da madeira é feita com o objetivo primordial de produzir um produto útil, minimizando as perdas de qualidade (Denig et al., 2000). De acordo com Rosendahl (2013), geralmente não é possível reduzir o teor de umidade em pellets de madeira muito abaixo de 10%, porque a umidade da atmosfera será absorvida pelo pellet. Segundo Verma et al. (2017),

a biomassa bruta utilizada para a produção de biocombustíveis pode conter até 60 a 70% de umidade, embora a biomassa com umidade entre 55 e 65% possa sustentar a combustão, o teor de umidade (TU) mais adequado é entre 10 e 15% (Gebreegziabher et al., 2013).

Segundo Denig et al. (2000), é preciso fornecer calor para evaporar a umidade ao longo de um processo de secagem. A água pode ser encontrada em duas formas na madeira, água livre e água ligada. A água livre enche as cavidades das células de madeira e pode ser facilmente evaporada. A água ligada é associada às paredes celulares e é a água que sobra nas células de madeira quando o teor de umidade é inferior a aproximadamente 30%. Uma quantidade crescente de energia é necessária para secar a água a medida que o teor de umidade diminui.

O teor de umidade de equilíbrio (TUE) é definido como o ponto no qual a madeira para de absorver a umidade ou liberar umidade para o ar circundante. Neste ponto, diz-se que o material atingiu o equilíbrio com a atmosfera (Delmhorst, 2018). Por séculos o processo de secagem mais popular foi a secagem ao sol (Denig et al., 2000). Secando madeira ao sol por um ano ou mais teores de umidade abaixo de 20% puderam ser atingidos dependendo do clima, espécie e espessura da madeira. O clima do local onde ocorre a secagem ao sol tem grande influência na taxa de secagem (Denig et al., 2000).

### *2.5.3.A As fases da secagem*

O processo de secagem tem vários passos (Amos, 1998). O primeiro é o aquecimento do material até a temperatura de bulbo úmido para induzir a água a sair. Depois, toda a umidade superficial no material é evaporada rapidamente. Uma vez que toda a umidade superficial tenha se evaporado, o material deve ser aquecido para forçar a água do interior do material para a superfície, para que assim possa evaporar. Isso ocorre durante o “período de taxa decrescente” quando a taxa de secagem diminui à medida que o material se torna mais seco. Durante esse período, a temperatura da superfície do material se mantém próxima da temperatura de bulbo úmido. Uma vez que o material esteja completamente seco, a temperatura dos arredores começa a aumentar, pois a água não está mais presente para mantê-la baixa. Esses passos são importantes na secagem de combustíveis. Por um lado, alta temperatura é desejada para forçar a transferência de calor e minimizar o tamanho do equipamento, entretanto há sempre o risco de ignição do material. O entendimento das etapas da secagem

permite que uma secagem rápida proporcionada por altas temperaturas seja realizada com risco mínimo de fogo.

É preciso ressaltar a importância da umidade relativa, que é definida como sendo a relação entre a fração molar do vapor na mistura e fração molar do vapor numa mistura saturada à mesma temperatura e pressão total. Se o vapor for considerado como um gás ideal, essa definição se reduz à razão entre a pressão parcial do vapor na mistura e a pressão de saturação do vapor à mesma temperatura. A umidade relativa indica a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido. Quanto maior essa diferença mais rápida e fácil é a secagem. Segundo Borgnakke e Sonntag (2009), um psicrômetro, dispositivo usado para medir a umidade do ar, é um equipamento no qual a mistura gasosa escoava através de termômetros de bulbo úmido e de bulbo seco. Aquele é coberto com uma mecha de algodão saturada com água e este simplesmente mede a temperatura do ar. No termômetro de bulbo úmido, a princípio, se o ar não está saturado com umidade, parte da água na mecha evapora e se difunde através do ar circundante. Esse processo de evaporação provoca uma queda de temperatura da água na mecha. Todavia, logo que a temperatura da água cai, calor passa a ser transferido para ela tanto do ar como do termômetro. A temperatura continua a cair até que finalmente é atingida uma condição de regime permanente em que a temperatura de bulbo úmido é inferior à de bulbo seco. Vale ressaltar que a temperatura de bulbo úmido medida com um psicrômetro é influenciada pelas taxas de transferência de calor e massa, que, por sua vez, são dependentes da velocidade de escoamento em torno dos bulbos e não apenas do equilíbrio termodinâmico.

### 2.5.3.B Energia requerida na secagem

De acordo com Ghiasi et al. (2014), a energia necessária para evaporar a água livre e a ligada até que a umidade desejada seja atingida pode ser calculada pela Equação 2:

$$E = A_{livre}(q_{latente}) + A_{ligada}(q_{latente} + q_{ligado}) \quad (02)$$

Na qual:

- $A_{livre}$  e  $A_{ligado}$  são as massas respectivas de água a serem evaporadas para se obter o teor

desejado de umidade;

- $q_{latente}$  é o calor latente de evaporação da água;
- $q_{ligado}$  é o calor adicional de separação necessário para quebrar ligações na água ligada.

A Tabela 11 detalha a energia requerida para secagem de biomassa segundo diversos autores.

Tabela 11 - Energia requerida na secagem.

Porcentagem final de umidade	Porcentagem inicial de umidade	Energia requerida	Observações	Autor
		2,4 MJ por kg de água evaporada	Entalpia de evaporação da água a 1 bar	Denig et al. (2000)
15 em base não informada	40 em base não informada	1,328 MJ/kg	Redução do teor de umidade de pedaços de madeira	Ghiasi et al., (2014)
		2,2 MJ/kg*	Demanda de calor no secador de coreia	Obernberger; Thek (2010)

\*A demanda de calor no secador de coreia é de 48 GWh/ano, a máquina funciona 8.000 horas por ano e a vazão na entrada do secador é de 9.831,47 kg/h o que resulta em 2,2 MJ/kg por porcentagem de umidade em base seca.

### 2.5.3.C Secagem com cobertura

Segundo Denig et al. (2000), os benefícios da secagem ao ar convencional como um método de pré-secagem são os baixos custos iniciais e operacionais, mas existe o risco de perda de qualidade. O aumento dos preços da madeira, bem como o possivelmente alto custo devido à degradação torna difícil justificar financeiramente a secagem ao ar como método de pré-secagem para a maioria dos tipos de madeira dura. Devido a esses fatores pode ser interessante o uso de uma cobertura, cujo principal objetivo é de proteger a madeira da exposição direta ao sol e à chuva. Níveis de degradação típicos para madeiras 4/4 finas são de 8% a 13% do valor

monetário da madeira para secagem ao ar e 4% para a secagem com cobertura.

De acordo com Simpson et. al (1999), o clima da região em que o pátio de secagem a ar se localiza pode influenciar grandemente a taxa de secagem. Alguns fatores influentes são a temperatura, a umidade relativa e a precipitação. No sul dos EUA, onde a temperatura de bulbo seco de inverno é maior, melhores condições de secagem são esperadas. Infelizmente, essas temperaturas mais altas podem ser compensadas, por exemplo, no sudeste, por chuvas que molham a madeira e prolongam o tempo de secagem. No sudoeste, condições áridas podem dificultar o controle de perdas devidas a defeitos. Períodos de alta umidade relativa podem retardar a secagem. A precipitação é importante na secagem ao ar de madeira serrada. A reumidificação da madeira sendo secada resulta em uma diminuição na taxa de secagem e a umidade adicionada deve ser evaporada. Além das condições climáticas gerais para uma região, características geográficas locais influenciam as condições climáticas, influenciando assim os resultados da secagem ao ar. Locais em baixas elevações, próximos a pântanos ou próximos de corpos de água são geralmente mais úmidos. Essas condições causam uma diminuição na taxa de secagem e possibilitam o desenvolvimento de mofo e manchas. Locais elevados são mais favoráveis à secagem. Áreas abertas propiciam uma secagem rápida por causa do maior movimento de ventos diferentemente do que ocorre em vales e áreas cercadas por árvores altas, colinas ou edifícios. Um local seco e de elevada altitude permite uma secagem rápida, mas pode implicar na ocorrência de defeitos na madeira. A luz solar também é um fator relevante. Ela aquece a terra, áreas expostas das pilhas de madeira e adjacências. O ar que se move sobre essas áreas é aquecido e seu potencial de secagem aumenta. Objetos pretos absorvem mais energia solar e ficam mais quentes, por isso pintar a área de secagem dessa cor pode ser vantajoso.

#### 2.5.3.D *Secador de correia (belt dryer)*

Segundo Obernberger; Thek (2010), os secadores de correia, entre muitas outras aplicações, são usados para secar pó de serra na peletização. Dependendo do tipo de secador, a temperatura de entrada do meio de aquecimento varia entre 90 e 110°C e a temperatura de saída entre 60 e 70°C. Esta temperatura relativamente baixa causa um processo de secagem suave e evita a emissão de substâncias odoríferas.

## 2.6 ANÁLISE ECONÔMICA

Para se tomar uma decisão de investimento é preciso fazer uma análise de viabilidade econômica. Segundo Lora (2004), essa decisão pode ocorrer de duas formas: busca-se conhecer a economicidade de uma determinada alternativa, ou selecionar uma ou mais entre diferentes possibilidades de alternativas.

### 2.6.1 FLUXO DE CAIXA

De acordo com Lora (2004), fluxo de caixa é uma representação gráfica simplificada das receitas e despesas de um projeto ao longo do tempo. Dessa forma, o que se enquadra como ganho, benefício, receita e similares, é representado por uma seta que aponta para cima, e tudo o que for despesa, custo, investimento, gasto e similares é representado por uma seta que aponta para baixo.

Análises anuais e mensais são as mais utilizadas, entretanto, a princípio, qualquer unidade de tempo pode ser usada. Análises mensais e anuais são as mais comuns, pois o tempo de maturação geralmente está nesta faixa de grandeza para projetos de grande porte.

### 2.6.2 TAXA DE JUROS

A taxa de juros é um conceito importante neste tópico. Esta exprime o "valor do dinheiro no tempo" e pode ser usada para relacionar o valor presente com o valor futuro ( $F$ ) de acordo com a Equação 3:

$$F = P + P \cdot i = P \cdot (1 + i) \quad (03)$$

Onde  $P$  é o valor presente e  $i$  é a taxa de juros. Ao se considerar  $n$  períodos de tempo, uma taxa de juros mensais  $i$  e que os juros são diretos compostos (JDC), o valor futuro pode ser calculado de acordo com a Equação 4:

$$F = P \cdot (1 + i)^n \quad (04)$$

### 2.6.3 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O valor presente líquido (VPL) é um método de tomada de decisão apropriado para comparar alternativas mutuamente excludentes a fim de trazer todos os seus custos e benefícios para o presente (De Faro, 1979). De acordo com esse critério, a alternativa que fornece o maior VPL é a mais atrativa. Somente os aspectos que diferenciam as alternativas que estão sendo comparadas devem ser considerados, e o período de análise de todas as alternativas deve ser o mesmo.

### 2.6.4 TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

O tempo de retorno sobre o investimento (TRI) é o tempo necessário para que as receitas se igualem ao investimento inicial (De Faro, 1979). Um valor limite é comumente estipulado, acima do qual o projeto será rejeitado. Embora seu uso seja bastante difundido, este critério pode apresentar resultados inconsistentes em relação à escolha entre diferentes alternativas, pois não considera nem as receitas que ocorrem após o tempo de retorno ter sido esgotado nem a preferência pelo adiantamento das receitas. Essas falhas tornam este critério incapaz de ser o único critério decisivo para a seleção de investimentos.

## 3 METODOLOGIA

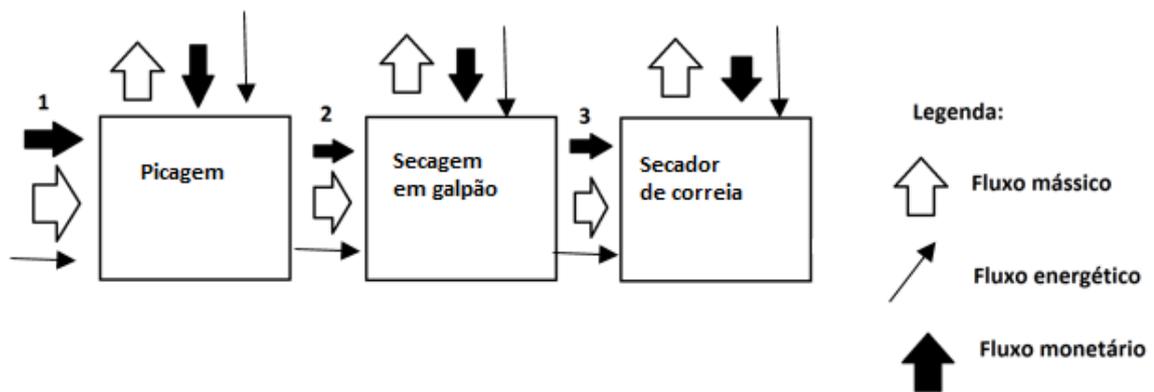
### 3.1 ROTAS DE PRODUÇÃO

A metodologia proposta avalia modais rodoviários e ferroviários para o fornecimento de eucalipto de reflorestamento para minimizar danos ambientais para uma usina termelétrica que o utiliza para alimentar suas caldeiras a partir de uma instalação na qual são realizados os processos de conversão.

Três rotas de produção foram consideradas neste trabalho como mostrado nas Figuras 8, 9 e 10, nas quais os números representam pontos entre os processos de conversão. As setas indicam os fluxos de energia, custos e massa entre processos e entre os processos e o meio externo. As etapas de transporte e queima estão ilustradas nas figuras com fins ilustrativos e didáticos, elas não fazem parte das rotas.

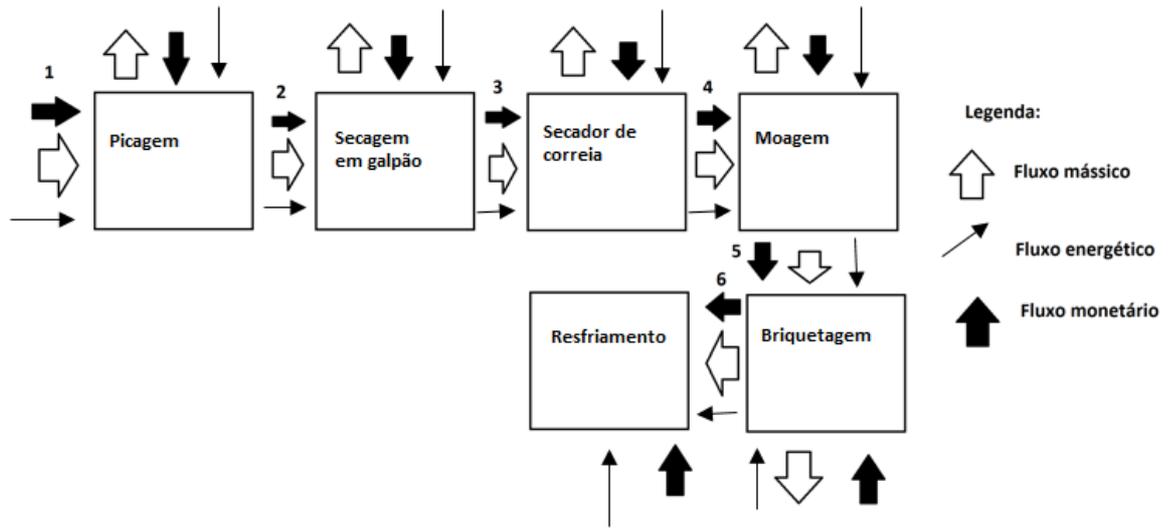
A primeira rota de produção consiste na compra de toras de madeira com teor de umidade (TU) de 55% em base úmida (bu), depois picagem (Oberberger; Thek, 2010), secagem com cobertura até um TU de 20% bu ou 25% em base seca (bs) e, em seguida, uso de um secador de correia alimentado pela queima do eucalipto seco para secá-los até o teor de umidade de equilíbrio (TUE). De acordo com Denig et al. (2000), o término da secagem a 25% bs de TU ou um pouco acima resulta em um bom equilíbrio entre os benefícios da secagem com cobertura, o custo da secagem no forno e o custo de degradação. Segundo Foelkel (2016), a queima de toras de madeira não é recomendada porque o processo é lento e tem baixa eficiência.

Figura 8 - Rota de produção 1.



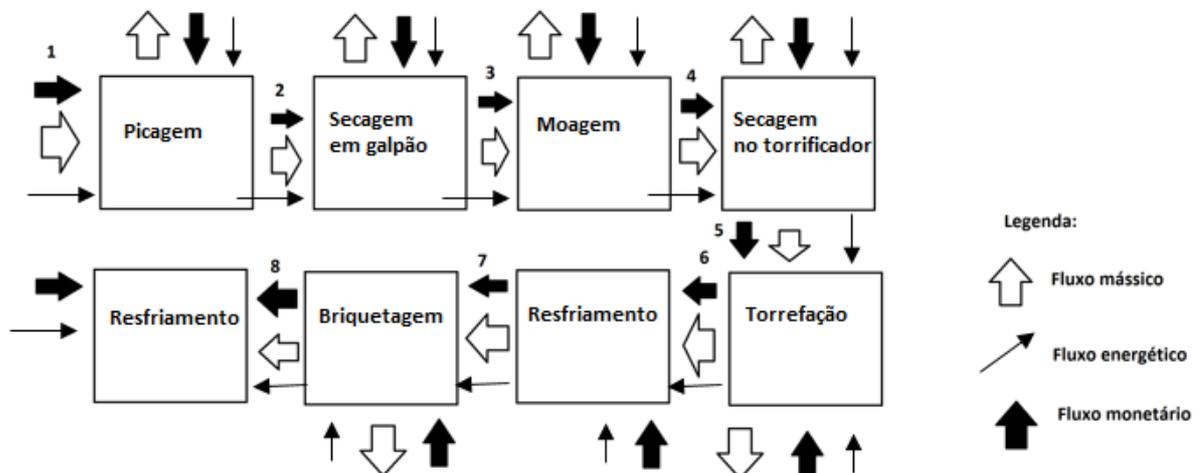
A segunda rota consiste em comprar toras de madeira, depois picagem, secagem com cobertura, secagem em um secador de correia, moagem, briquetagem e resfriamento. Essa sequência de processos é descrita detalhadamente por Oberberger; Thek (2010).

Figura 9 - Rota de produção 2.



A terceira rota consiste em comprar toras de madeira, picagem, secagem com cobertura, moagem, torrefação, resfriamento, briquetagem e resfriamento novamente. Essa sequência de processos também é descrita em Obernberger e Thek (2010) e sequências similares são discutidas em Bergman and Veringa (2005). Nesta rota o eucalipto é secado em cobertura a até 40% de umidade (bu) antes da torrefação porque, segundo James (2016), não é necessário secar além deste valor. Além disso, se a madeira ficar muito seca (10% ou menos) o torrefador pode ser danificado.

Figura 10 - Rota de produção 3.



Para todas as rotas, as Equações 5 e 6 foram usadas para calcular o valor monetário da biomassa ( $V$ ) em cada ponto:

$$V_n \times m_n + C_{n+1} = V_{n+1} \times m_{n+1} \quad (05)$$

$$MR_{n+1} = \frac{m_{n+1}}{m_n} \quad (06)$$

Nas quais os subscritos indicam os pontos nas rotas de produção,  $m_n$  é o fluxo de massa do ponto  $n$ ,  $C_n$  é o custo do processo imediatamente anterior ao ponto  $n$ ,  $V_n$  é o valor monetário da biomassa por unidade de massa no ponto  $n$  e  $MR_n$  é o rendimento em massa do processo imediatamente anterior ao ponto  $n$ .

As Figuras 11 e 12 mostram uma empresa que usa madeira para gerar energia e forneceu informações para este trabalho. Esta empresa poderia usar a metodologia apresentada neste trabalho para aumentar seus lucros e está localizada no estado da Bahia.

Figura 11 - Pedacos de madeira sendo movidos por uma correia depois de passar por um processo de separação.



Figura 12 - Pedacos de madeira sendo manuseados por trator após terem sido picados.



### 3.2 TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

O teor de umidade de equilíbrio (*TUE*) da madeira de acordo com USDA (2010), é uma função da temperatura e da umidade relativa do ar. Considera-se neste trabalho que a biomassa sempre chega nas caldeiras na umidade de equilíbrio. O teor de umidade de equilíbrio em base seca em porcentagem foi calculado aplicando a equação polinomial bivariante (Maplesoft, 2018) nos valores fornecidos por USDA (2010) obtendo assim a Equação 7 que tem um  $R^2$  de 0,980784.

$$TUE = -0,2344 + 0,8357 \times T - 1,3582 \times T \times UR + 0,0293 \times T^2 \times UR + 0,0874 \times T \times UR^2 - 0,0034 \times T^2 \times UR^2 - 0,018 \times T^2 + 30,4826 \times UR^2 \quad (07)$$

Na qual:

- *T* é o valor da temperatura ambiente (°C);
- *UR* é o valor da umidade relativa (%/100).

É interessante que sejam usados para *T* e *UR* valores médios ao longo de períodos extensos para levar em consideração possíveis variações.

Para a biomassa torrefada, a umidade de equilíbrio também em base seca foi calculada de acordo com a Equação 8 (Medic et al., 2012) que é válida para eucalipto torrefado a 300°C:

$$TUE = (7,3975 - 0,0848 \times T) \times (UR/(1 - UR)^{1/2,659}) \quad (08)$$

Seu valor em base úmida (%) pode ser calculado de acordo com a Equação 9:

$$TUE_{base\ úmida} = \left( \frac{TUE_{base\ seca}}{100 \times \left( 1 + \frac{TUE_{base\ seca}}{100} \right)} \right) \times 100 \quad (09)$$

### 3.3 HIPÓTESES

De acordo com Singh (2016), os briquetes têm cerca de 6% de umidade quando saem de uma briquetadora, mas segundo Yu et al. (2018), o processo de compressão não altera significativamente o *TUE* da madeira, e para ser conservador, considerou-se que o TU (teor de umidade) dos briquetes de madeira da rota 2 ao atingir as caldeiras da usina termelétrica é igual ao *TUE* da madeira antes do processo de compressão, pois considera-se que a madeira absorve ou perde umidade até atingir o *TUE*.

De acordo com Uslu et al. (2008), a densidade da biomassa torrefada é baixa (230 kg/m<sup>3</sup>) em comparação com a torrefada e peletizada (750 kg/ m<sup>3</sup>), por isso o transporte de biomassa torrefada como pellets é muito mais barato, logo a torrefação só é considerada em combinação com a peletização. Além disso, segundo Phanphanich (2010), combustíveis torrefados podem ser melhor manuseados quando comprimidos, devido ao aumento da fluidez e da densidade. Neste trabalho foi adotada a tecnologia da briquetagem ao invés da peletização, pois pellets são muito pequenos e podem cair no lugar errado causando a interrupção da queima em uma caldeira de leito fluidizado (Souza, 2018). Entretanto, foram usados dados sobre pellets e o processo de peletização devido às semelhanças entre as duas tecnologias. Esses fatores justificam o uso da briquetagem na rota 3. A biomassa torrefada tem um TU de cerca de 3% ao final do processo (Borges et al., 2015), mas sendo conservador, assumiu-se que o TU da madeira ao atingir as caldeiras é igual ao seu *TUE*.

Segundo Miranda et al. (2009), o *PCS* das amostras de pellets não apresentou diferenças significativas em relação às amostras não comprimidas. Levando isso em consideração e sendo conservador, os valores do *PCS* dos produtos das rotas 1 e 2 foram considerados os mesmos.

Nas rotas 2 e 3, a biomassa na forma de toras de madeira é primeiro cortada em pequenos pedaços de madeira, depois secada por meio da secagem com cobertura e finalmente moída

finamente porque a secagem direta do material pode causar problemas com a distribuição não homogênea de umidade dentro das peças. A matéria-prima úmida é geralmente mais difícil de moer, uma vez que o material tende a cegar as telas ao entupir os furos. Além disso, a secagem é mais rápida se o tamanho das partículas for menor (Oberberger e Thek, 2010).

### 3.4 SECAGEM EM UM SECADOR DE CORREIA

Neste trabalho considerou-se que o secador de correia é alimentado pela queima do eucalipto seco para minimizar custos. O processo iterativo foi calculado conforme mostrado na Equação 10:

$$P = R \times \frac{\left( \frac{DC}{\left( PCI \times \frac{EFF}{PE} \right)} \right)}{45} \times \frac{D}{1000} \quad (10)$$

Na qual:

- *EFF* é a eficiência global do equipamento;
- *PE* é o custo do eucalipto após os processos de conversão;
- *DC* é a demanda de calor para secagem;
- *D* é a massa específica do eucalipto com um teor de umidade de 25% bs (ou 20% bu) que é teor de umidade da biomassa ao entrar no secador;
- *P* é o preço do processo de secagem (US\$/ (m<sup>3</sup>.%)), utilizado no cálculo do preço da madeira de eucalipto após os processos de conversão, fechando o cálculo iterativo. *P* é o *C* da Equação 5 para esse processo;
- O fator de correção (*R*) é devido ao aumento na demanda de energia para secagem à medida que o material é secado. *R* é uma relação entre a energia necessária para secar madeira de diferentes teores de umidade, como mostrado na Equação 11:

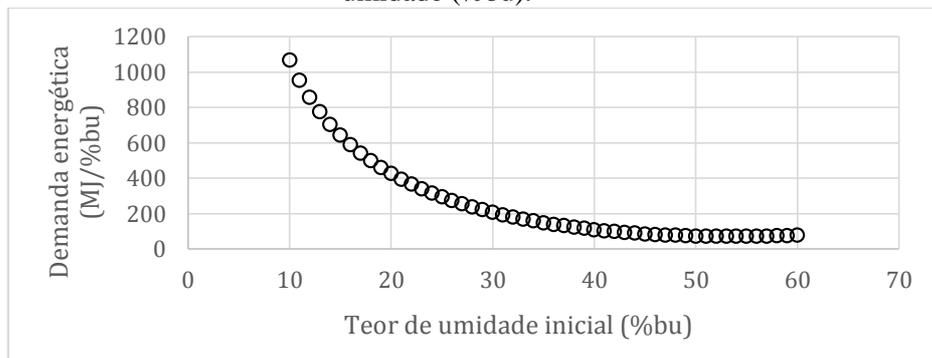
$$R = \frac{E20}{E55} \quad (11)$$

Onde:

- $E_{20}$  é a energia necessária para secar madeira com 20% de umidade bu (MJ/%)
- $E_{55}$  é a energia necessária para secar madeira com 55% de umidade bu (MJ /%).

A interpolação de resultados de experimentos de secagem de madeira (Elustondo e Oliveira, 2009) produziu o gráfico da Figura 13 da energia necessária por percentagem de teor de umidade (MJ/%bu) em função do teor de umidade inicial (%bu). O valor do  $R^2$  dessa interpolação é de 0,959981.

Figura 13 - Demanda energética para a secagem da madeira (MJ/%bu) em função do teor inicial de umidade (%bu).



Observa-se que quanto maior o teor de umidade inicial maior é a energia necessária por percentagem de teor de umidade para a secagem.

O rendimento em massa ( $MR$ ), que é usado na Equação 10, para todos os tipos de secagem é aproximadamente igual a massa específica ( $MS$ ) da biomassa após o processo dividida por ela antes do processo como mostrado na Equação 12.

$$MR = \frac{MS_{depois}}{MS_{antes}} \quad (12)$$

### 3.5 CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA

O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade abaixo do qual as dimensões da madeira mudam quando o teor de umidade é alterado e acima disso não há alteração (USDA, 2010). Para madeira de eucalipto esse valor é de aproximadamente 28% bu (Garcia R., 2002). A massa específica ( $MS$ ) do eucalipto em  $\text{kg/m}^3$  foi calculada pelas Equações 13 e 14 que foram desenvolvidas pela interpolação dos dados de Garcia R. (2002):

- Acima do ponto de saturação das fibras, o valor do  $R^2$  da Equação 13 é de 0,973502:

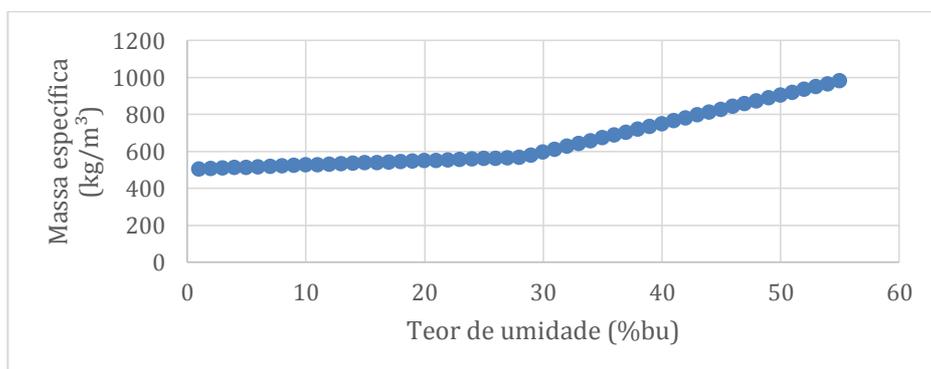
$$MS = TU \times 15.43 + 131.4 \quad (13)$$

- Abaixo do ponto de saturação das fibras, o valor do  $R^2$  da Equação 14 é de 0,997879:

$$MS = TU \times 2.317 + 501.167 \quad (14)$$

TU é o teor de umidade que para as equações acima deve estar em porcentagem em base úmida. A Figura 14 mostra a relação entre a massa específica da madeira de eucalipto e o teor de umidade.

Figura 14 - Massa específica da madeira de eucalipto em função do teor de umidade.



Observa-se que a massa específica aumenta com o aumento do teor de umidade e a reta se torna mais inclinada a partir do PSF. Isso ocorre pois acima do PSF deixa de ocorrer o aumento das dimensões com o aumento da umidade.

### 3.6 TORREFAÇÃO

Nocquet et al. (2014a) e Nocquet et al. (2014b), fizeram um trabalho em duas partes em que na parte 1 um estudo experimental é feito com testes de torrefação e baseado nos resultados da parte 1, um modelo matemático foi desenvolvido na parte 2 para prever a perda de massa sólida em função da temperatura, tempo de residência e composição macromolecular da biomassa.

Para cada constituinte de biomassa considerado no modelo, que são os grupos celulose, lignina, xilana e acetila, primeiro ocorrem duas reações paralelas. Uma dá origem a uma espécie volátil chamada V1, e a outra dá origem a um sólido intermediário A1. Supõe-se então que este sólido intermediário reaja, como anteriormente, por meio de duas reações paralelas. Uma dá origem a uma espécie volátil chamada V2 e a outra ao sólido torrefado A2. Os parâmetros cinéticos associados  $k_x$  foram calculados como mostrado na Equação 15.

$$k_x = k_{0x} \times \exp\left(\frac{-Ea_x}{RT}\right) \quad (15)$$

$k_{0x}$  é o fator pré-exponencial ( $s^{-1}$ ),  $Ea_x$  ( $J.mol^{-1}$ ) a energia de ativação,  $R$  ( $J.mol^{-1}.K^{-1}$ ) a constante de gás universal e  $T$  a temperatura (K). O rendimento em massa ( $MR$ ) pode ser calculado pelas Equações 16, 17 e 18.

$$MR = \left(1 + \left(\frac{k_{A1}K_1 - k_{A1}k_{A2}}{K_1(K_2 - K_1)}\right)\right) \exp(-K_1t) + \left(\frac{-k_{A1}K_2 + k_{A1}k_{A2}}{K_2(K_2 - K_1)}\right) \exp(-K_2t) + \frac{k_{A1}k_{A2}}{K_1K_2} \quad (16)$$

$$K_1 = k_{A1} + k_{V1} \quad (17)$$

$$K_2 = k_{A2} + k_{V2} \quad (18)$$

$t$  é o tempo de residência (s).

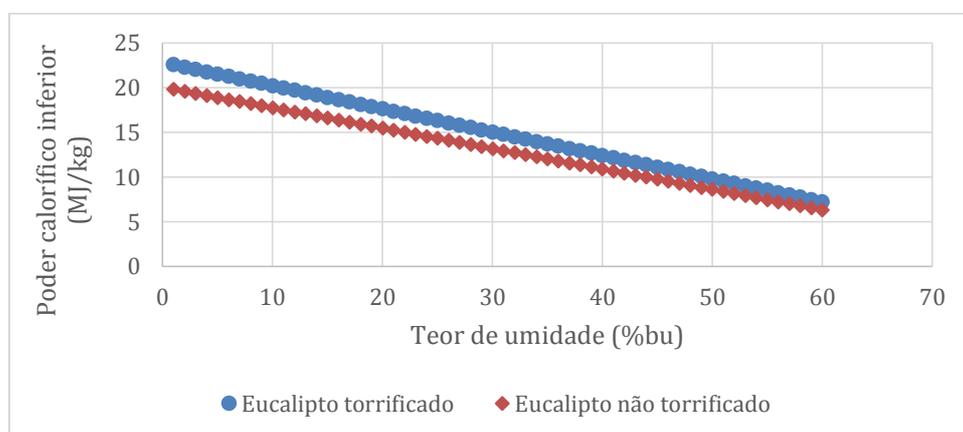
### 3.7 CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR

O poder calorífico inferior (MJ/kg) (*PCI*) da biomassa foi calculado de acordo com a Equação 19 (Zanuncio et al., 2013):

$$PCI = PCS - (0,0114 \times PCS \times TU) \quad (19)$$

*PCS* é o poder calorífico superior da madeira. A Figura 15 mostra a relação entre o *PCI* e o teor de umidade.

Figura 15 - Poder calorífico inferior em função do teor de umidade.



Observa-se que o *PCI* diminui com o aumento do teor de umidade e é maior para o eucalipto torrefado. Além disso, a biomassa torrefada tem teor de umidade de equilíbrio mais baixo que a não torrefada para condições climáticas iguais.

### 3.8 EFICIÊNCIA DA CALDEIRA

A energia disponível na fornalha pode ser calculada da seguinte forma (Bazzo, 1995):

$$q = mcb \times (PCI + \Delta hcb) + mar \times (\Delta har + war \times \Delta hvp) \quad (20)$$

Na qual:

- $q$  é a energia disponível na fornalha (kW);
- $PCI$  é o poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg);

- $mcb$  é o consumo de combustível (kg/s);
- $mar$  é o fluxo de ar de combustão (kg/s);
- $war$  é a umidade do ar (kg/kg ar seco);
- $\Delta hcb$  é a variação na entalpia do combustível (kJ/kg);
- $\Delta har$  é a variação na entalpia do ar de combustão (kJ/kg);
- $\Delta hvp$  é a variação na entalpia da umidade do ar (kJ/kg).

Entretanto assumiu-se que a temperatura da entrada do ar é igual à temperatura de referência utilizada na obtenção do  $PCI$ , logo a Equação 20 fica na forma da Equação 21 abaixo.

$$q = mcb \times PCI \quad (21)$$

Segundo Bazzo (1995), o calor útil ( $qu$ ) em uma caldeira pode ser calculado por meio da Equação 22:

$$qu = q - qp \quad (22)$$

Onde  $qp$  é o calor perdido que é igual à soma das energias perdidas devido a:

- Gases secos (gases secos:  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , ...);
- Umidade presente nos gases de combustão ( $H_2O$ );
- Cinzas;
- Combustão parcial;
- Purgas;
- Fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento.

A eficiência da caldeira ( $EF$ ) foi calculada da seguinte forma:

$$EF = \frac{q - qp}{q} = \frac{mcb \times PCI - qp}{mcb \times PCI} \quad (23)$$

Neste trabalho a soma das perdas com as cinzas, com purgas mais as perdas de calor pelas paredes do equipamento foi considerada fixa e igual a 5% de  $q$  (Lora, 2004).

O calor perdido com os gases secos pode ser aproximado por (Bazzo, 1995):

$$qqs = mgs \times cpar \times (Tg - T) \quad (24)$$

Onde:

- $qqs$  é o calor perdido com os gases secos (kJ/kg de combustível);
- $mgs$  é a massa total de gases secos (kg/kg de combustível).;
- $cpar$  é o calor específico do ar ( $cpar = 1,004$  kJ/kg.K) (Bornakke & Sonntag, 2009);
- $Tg$  é a temperatura dos gases na chaminé (K);
- $T$  é a temperatura de referência (K).

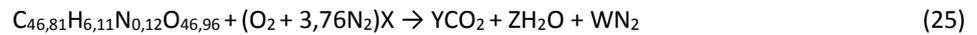
O cálculo do  $mgs$  foi feito com base nas composições do eucalipto torrefado e não torrefado apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Composição em base seca da biomassa.

Elemento	C(%)	H(%)	O(%)	N(%)	Fonte
<b>Químico</b>					
<b>Biomassa não torrefada</b>	46,81	6,11	46,96	0,12	Junior et al. (2015)
<b>Biomassa torrefada</b>	56,9	4,78	38,13	0,2	Junior et al. (2015)

A partir dos dados da Tabela pode-se montar a equação que representa a reação estequiométrica de combustão da biomassa usando os valores da composição de cada elemento

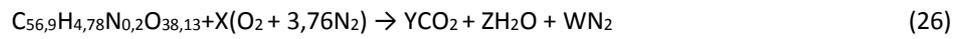
como a quantidade de cada átomo em uma molécula fictícia que representa a biomassa como mostrado na Equação 25 para a biomassa não torrefada:



Resolvendo a Equação 25 foram encontrados os seguintes resultados:

- $X = 24,858$ ;
- $Y = 46,81$ ;
- $Z = 3,055$ ;
- $W = 93,52$ .

Para a biomassa torrefada a reação estequiométrica tem a seguinte forma:



Resolvendo a Equação 26 foram encontrados os seguintes resultados:

- $X = 39,03$ ;
- $Y = 56,9$ ;
- $Z = 2,39$ ;
- $W = 146,853$ .

Esses resultados foram usados nos cálculos do *mgs* para um excesso de ar ( $\lambda$ ) de 1,5 para a rota 1 e de 1,25 para as rotas 2 e 3 (Hansen; Jein, 2009) essa redução é proporcionada pela homogeneização causada pela briquetagem. Os resultados obtidos foram:

- 4,8 kg/kg de combustível para a rota 1;
- 4,2 kg/kg de combustível para a rota 2;

- 6,1 kg/kg de combustível para a rota 3.

A perda de calor com a umidade dos gases de combustão ( $qv$ ) pode ser calculada levando em conta a energia associada à água formada na queima do hidrogênio do combustível, umidade do próprio combustível, umidade do ar de combustão e vapor consumido por sopradores de fuligem (Bazzo, 1995) como mostra a Equação 27.

$$qv = (9 \times h + TU + war \times e \times mar) \times \Delta h_{vp} + \dots + 2440 \times (9 \times h + TU) \quad (26)$$

Onde:

- $qv$  é o calor perdido com a umidade dos gases (kJ/kg de combustível);
- $h$  é o teor de hidrogênio do combustível (kg/kg de combustível);
- $TU$  é o teor de umidade da biomassa (kg/kg de combustível);
- $war$  é o teor de umidade do ar (kg/ kg de ar seco);
- $e$  é o coeficiente de excesso de ar;
- $mar$  é a massa estequiométrica de ar (kg/kg de combustível);
- $\Delta h_{vp}$  é a variação na entalpia do vapor na pressão atmosférica (kJ/kg).

Segundo Bazzo (1995), fornalhas projetadas para queimar combustíveis sólidos, naturalmente, implicam na presença de carbono não queimado no cinzeiro. Entretanto aplicando as fórmulas de Good et al. (2006) observa-se que a perda de energia devida à combustão incompleta é muito baixa. Neste trabalho essa perda foi considerada desprezível.

### 3.9 TRANSPORTE RODOVIÁRIO

O veículo considerado é o Cavalotratador Scania - R124 - 4x2 - 360CV, que é um caminhão de três eixos. Araújo et al. (2014) fez uma comparação entre diferentes formas de calcular o frete rodoviário. Entre essas formas estão metodologias propostas por instituições como GEPOIT, empresas transportadoras, cooperativas, instituições de pesquisa e outros:

- Planilha da COPPEAD: Considera apenas as despesas diretas constituídas basicamente pelos custos fixos e variáveis. Os custos indiretos não são considerados;
- Planilha da GEIPOT: Foi desenvolvida em 1999 por este órgão. Considera apenas os salários, ordenados da diretoria e outros custos entre as despesas indiretas, também é restrito às despesas diretas;
- Manual da NTC: A Associação Nacional de Transporte de Carga (NTC) e a Fundação Instituto de Pesquisa Econômica (FIPE), em 1900, desenvolveram um método de cálculo constituído por todos os índices das operações de transporte somados aos índices da variação do custo de coleta e entrega de mercadorias. Esse manual é usado por grande parte das empresas e cooperativas de transporte de carga no Brasil como referência;
- Guia do Transportador: portal eletrônico que permite acesso a uma planilha de cálculos de frete exclusiva para assinantes. A planilha se restringe às despesas diretas, o que torna o método de cálculo simplificado.

A metodologia usada neste trabalho para o cálculo dos custos do transporte rodoviário foi baseada no manual da NTC de 2014 (NTC, 2014). Esta é a única metodologia entre as apresentadas que abrange todos os custos indiretos envolvidos.

A metodologia para o caso rodoviário considera que o eucalipto é comprado e processado por uma empresa que realiza os processos de conversão e contrata uma empresa transportadora para transportá-lo até uma termoeletrica que o utiliza no processo de combustão que alimenta suas caldeiras.

Para avaliar os efeitos causados no custo do vapor pela alteração da distância de transporte o preço do frete deve ser dividido em custos fixos e variáveis. Custos fixos são aqueles que não dependem da distância de transporte, como salários e custos variáveis são aqueles que dependem da distância, como custo de combustível. O trabalho de Araújo et al. (2014) fornece tal descrição de custos e foi utilizado nos cálculos do preço do frete neste trabalho juntamente com a metodologia de cálculo da NTC (2014) que é adotada como referência para a maioria das empresas e cooperativas de transporte no Brasil.

O preço do frete rodoviário (FR) foi calculado de acordo com a Equação 27:

$$FR = \frac{((CC + CF + CV + OD + SE) \times ML)}{VC} \quad (27)$$

Na qual:

- *CC* é o custo com combustível mensal da empresa e foi calculado de acordo com a Equação 28;

$$CC = NC \times VMC \times D \times \left( \frac{CCO}{EC} + \frac{CCO}{EV} \right) / TC \quad (28)$$

- *CF* é o total de custos fixos;
- *NC* é o número de caminhões da empresa;
- *CV* é o total de custos variáveis excetuando o custo com combustível e foi calculado de acordo com a Equação 29;

$$CV = VMC \times \left( \frac{CP \times NC}{0,8} \times 2 + SCV \times D \times 2 \right) \quad (29)$$

- *OD* é o custo com outras despesas;
- *SE* é o custo com salários e encargos sociais;
- *ML* representa a margem de lucro;
- *VC* é o produto do número de viagens por mês por caminhão (*VMC*) pelo número de caminhões da empresa transportadora (*NC*);
- *CP* é o custo do pedágio;
- *SCV* é a soma dos custos variáveis excluindo o pedágio;
- *CCO* é o custo com combustível em R\$/l;
- *EC* é o rendimento do caminhão cheio;
- *EV* é o rendimento do caminhão vazio;
- *TC* é a taxa de cambio do dólar.

O número de viagens por mês por caminhão (*VMC*) foi calculado de acordo com a Equação 30:

$$VMC = \frac{CH}{\left(2 \times \frac{D}{V} + TCD\right)} \quad (30)$$

Na qual:

- $CH$  é a soma das cargas horárias mensais dos dois motoristas somadas (para cada caminhão);
- $D$  é a distância entre a termelétrica e a planta na qual os processos de conversão são aplicados. Esta é multiplicada por 2 para considerar as viagens de ida e volta;
- $V$  é a velocidade média dos caminhões;
- $TCD$  é o tempo de carga e descarga;
- O custo com uma carga de caminhão de eucalipto ( $PEC$ ) foi calculado de acordo com a Equação 31:

$$PEC = PT \times MM \quad (31)$$

Na qual:

- $PT$  é o custo em dólares por massa do eucalipto depois de passar por todas as etapas de uma das rotas de produção;
- $MM$  é a massa máxima que o caminhão é capaz de suportar.

### 3.10 TRANSPORTE FERROVIÁRIO

O custo do eucalipto em um vagão de trem ( $CEV$ ) pode ser calculado pela Equação 32:

$$CEV = PT \times MV \quad (32)$$

Na qual  $MV$  é a massa máxima de eucalipto que um vagão suporta.

O custo total ( $CT$ ) pode ser calculado pela Equação 33:

$$CT = MV \times FF \quad (33)$$

Na qual  $FF$  é o custo do frete ferroviário.

### 3.11 CÁLCULO DO CUSTO DO VAPOR

Em ambos os casos, rodovia e ferrovia, foi realizada uma análise econômica considerando que o processamento e as empresas de transporte suprem a demanda de eucalipto para uma usina termelétrica. O custo de investimento inicial da análise é a soma dos preços das máquinas necessárias para que um sistema que produz eucalipto com a rota 1 passe a produzir com a rota 2 ou a 3. Ao produzir um combustível que permite a produção de vapor a um custo menor, mas mantendo constante o preço de sua venda, obtém-se o retorno do investimento. Evidentemente, haverá retorno apenas se o custo do vapor nas rotas mais complexas (2 e 3) for mais baixo do que na mais simples (1).

O custo do vapor em base mássica ( $CS$  em US\$/t) produzido nas caldeiras foi calculado com a Equação 34:

$$CS = \frac{C \times \Delta h}{(ME \times PCI \times EF)} \quad (34)$$

$\Delta h$  (GJ/t) é a diferença na entalpia do vapor antes e depois da caldeira.  $C$  é o custo monetário (US\$) para produzir e transportar uma massa  $ME$  (t) de eucalipto convertido para a usina termelétrica e foi calculado para o caso rodoviário de acordo com a Equação 35:

$$C = PEC + FR \quad (35)$$

Para o caso ferroviário  $C$  foi calculado de acordo com a Equação 36:

$$C = CEV + FC \quad (36)$$

### 3.12 CÁLCULO DO NÚMERO NECESSÁRIO DE CADA MÁQUINA

O número necessário de cada máquina foi calculado de acordo com a Equação 37:

$$N_x = \frac{MFR}{MMF} \quad (37)$$

Na qual:

- $N_x$  é o número requerido de unidades de uma máquina específica. Esse valor deve ser arredondado para cima;
- $MFR$  é o fluxo de massa exigido da máquina;
- $MMF$  é o fluxo de massa máximo que a máquina suporta.

A vazão mássica de biomassa ( $m$ ) requerida na caldeira da usina termelétrica pode ser calculada de acordo com a Equação 38:

$$m = \frac{SF \times \Delta h}{EF \times PCI} \quad (38)$$

$m$  pode ser considerado como a vazão mássica após o último equipamento da rota de produção considerando que não há perdas no transporte.

As vazões em cada um dos pontos das rotas de produção pode ser calculada dividindo a vazão no ponto posterior por 1 menos a porcentagem de perda de massa do equipamento que fica entre a etapa para a qual se deseja calcular e a posterior, como se pode observar na Equação 39.

$$\text{Vazão da etapa} = \frac{\text{Vazão da etapa posterior}}{1 - \text{porcentagem de perda de massa}} \quad (39)$$

### 3.13 CÁLCULO DO RETORNO MENSAL

O retorno mensal ( $RM$ ) do investimento nas máquinas necessárias para transformar a rota 1 na rota 2 ou na 3 foi calculado usando a Equação 40:

$$RM = DI.SF - \frac{I}{NM} \quad (40)$$

Na qual:

- *DI* é a diferença entre os custos do vapor em rotas diferentes em US\$/t;
- *SF* é o fluxo de vapor em toneladas por hora;
- *I* é o investimento inicial que é a soma dos custos das máquinas necessárias para transformar a rota de produção 1 na 2 ou na 3. Para transformá-la na rota 2, são necessários moinhos de martelos, pellets e resfriadores, como mostrado na Figura 29. Deve-se notar que na rota 3 secadores de correia não são usados por isso seu custo foi subtraído e os custos de moinhos de martelo, máquinas de torrefação, moinhos de pellets e resfriadores são adicionados.
- *NM* é o número de meses até que as máquinas se desvalorizem e percam todo o seu valor.

### 3.14 CÁLCULO DO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

O tempo de retorno sobre o investimento (*TRI*) foi calculado de acordo com a Equação 41 (De Faro, 1979):

$$TRI = \frac{\ln(1 - I.i/RM)}{\ln(1 + i)} \quad (41)$$

Na qual *i* é a taxa de juros.

### 3.15 CÁLCULO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O valor presente líquido (*VPL*) foi calculado de acordo com a Equação 42 (De Faro, 1979):

$$VPL = -I + RM \left( \frac{(1 + i)^n - 1}{i \cdot (1 + i)^n} \right) \quad (42)$$

## 4 EXEMPLOS E DADOS DE PROCESSOS

### 4.1 EXEMPLOS DE DADOS DAS ROTAS DE PRODUÇÃO

Nas tabelas a seguir estão organizados os dados das rotas de produção para a temperatura ambiente de 35°C e umidade relativa de 30% como exemplo. As Figuras 8, 9 e 10 que ilustram as rotas de produção são apresentadas novamente nesta seção por conveniência. Na Tabela 13 a seguir estão os dados da rota 1 ilustrada pela Figura 16.

Figura 16 - Rota de produção 1.

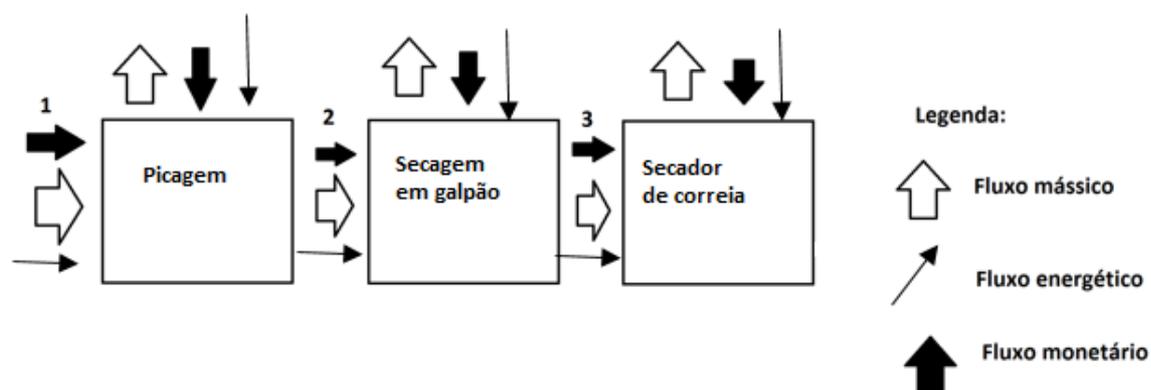


Tabela 13 - Dados dos pontos da rota de produção 1.

Ponto	Consumo energético do processo anterior (MJ/t)	Custo do processo anterior (US\$/t)	Valor do eucalipto (US\$/t)	Rendimento mássico do processo anterior (%)	Teor de umidade (%) (bu)	PCI (MJ/kg)
1			18,62		55	7,48
2	67,32	2,87	22,16	97	55	7,48
3	3779,95	112,69	241,38	56	20	15,48
4	771,21	140,05	544,45	94	5,78	18,73

Na Tabela 14 a seguir estão os dados da rota 2 ilustrada pela Figura 17.

Figura 17 - Rota de produção 2.

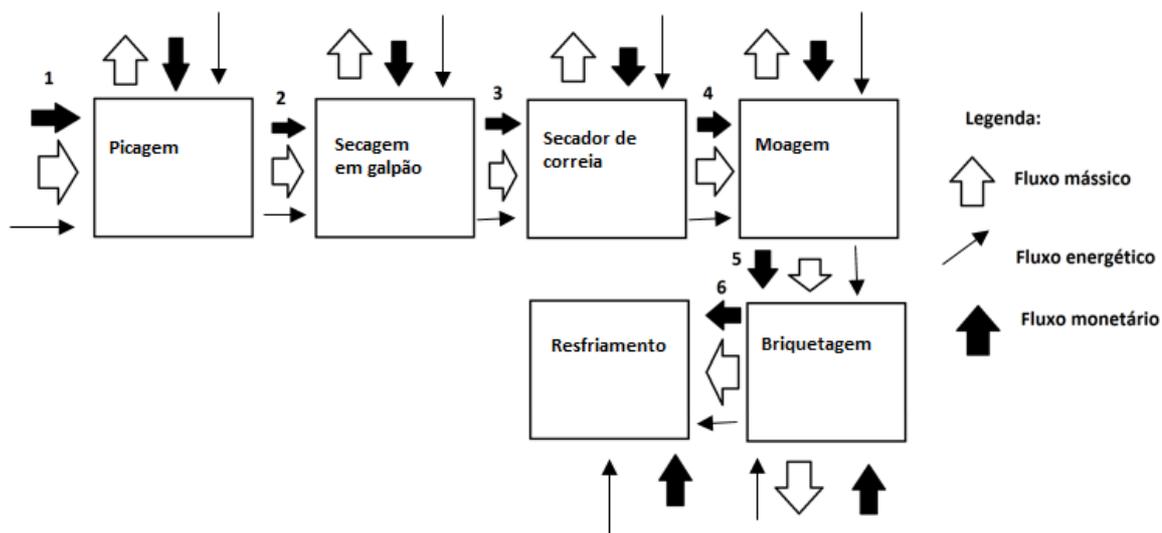


Tabela 14 - Dados dos pontos da rota de produção 2.

Ponto	Consumo energético do processo anterior (MJ/t)	Custo do processo anterior (US\$/t)	Valor do eucalipto (US\$/t)	Rendimento mássico do processo anterior (%)	Teor de umidade (% bu)	PCI (MJ/kg)
1			18,62		55	7,48
2	67,32	2,87	22,16	97	55	7,48
3	3779,95	112,69	241,38	56	20	15,48
4	771,21	140,05	528,94	94	5,78	18,73
5	67,32	2,87	548,25	97	5,78	18,73
6	136,8	11,06	570,73	98	5,78	18,73
7	5,4	0,33	571,06	100	5,78	18,73

Na Tabela 15 a seguir estão os dados da rota 3 ilustrada pela Figura 18.

Figura 18 - Rota de produção 3.

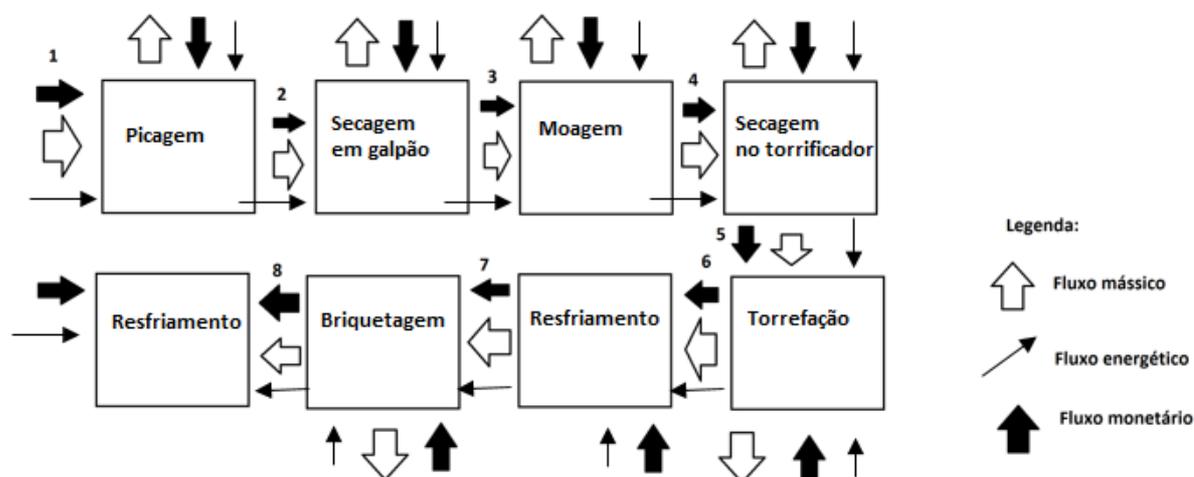


Tabela 15 - Dados dos pontos da rota de produção 3.

Ponto	Consumo energético do processo anterior (MJ/t)	Custo do processo anterior (US\$/t)	Valor do eucalipto (US\$/t)	Rendimento mássico do processo anterior (%)	Teor de umidade (%) (bu)	PCI (MJ/kg)
1			18,62		55	7,48
2	67,32	2,87	22,16	97	55	7,48
3	2159,94	64,39	153,77	76	40	13,52
4	67,32	2,87	161,49	97	40	13,52
5				68	3	19,39
6	230	35	361,85	80	3	25,09
7	5,4	0,33	362,18	100	3,12	25,02
8	136,8	11,06	380,86	98	3,12	25,02
9	5,4	0,33	381,19	100	3,12	25,02

#### 4.2 EXEMPLOS DE UMIDADES DE EQUILÍBRIO

A Tabela 16 mostra alguns exemplos de cidades da Bahia para as quais foram calculadas as umidades de equilíbrio de acordo com USDA (2010). Para levar em consideração possíveis variações de temperatura e umidade relativa, como em dias chuvosos, foram calculados os

valores médios da umidade relativa e da temperatura compensada média (INMET, 2017) no período de 01/01/2000 a 15/08/2017 para a determinação do *TUE*. Os extremos superior e inferior são as condições climáticas que limitam a faixa de aplicação da Equação 11 e foram escolhidos na tentativa de abranger toda a faixa na qual é possível cultivar biomassa. Segundo CPRM (2017), a temperatura média compensada é a média de cinco leituras, três em diferentes horários do dia, a máxima e a mínima.

Tabela 16 - Exemplos de condições climáticas e teores de umidade de equilíbrio de algumas cidades.

<b>Cidade</b>	<b>Temperatura média compensada (°C)</b>	<b>Umidade relativa (%)</b>	<b>TUE (% bs) (USDA, 2010)</b>	<b>TUE (% bs) de acordo com a Equação 11</b>
<b>Barreiras</b>	25,3	65,2	12,0	12,20
<b>Alagoinhas</b>	24,6	78,6	15,2	16,01
<b>Bom Jesus da Lapa</b>	26,5	58,5	10,6	10,68
<b>Caetité</b>	22,2	63,5	11,6	11,88
<b>Caravelas</b>	24,8	81,8	16,5	17,08
<b>Carinhanha</b>	25,7	58,7	10,6	10,74
<b>Cipó</b>	25,6	69,5	12,8	13,29
<b>Correntina</b>	24,4	66,7	12,2	12,60
<b>Cruz das Almas</b>	24	82	16,6	17,17
<b>Feira de Santana</b>	24,5	80,2	15,9	16,54
<b>Irecê</b>	23,7	60,5	11,0	11,17
<b>Vitória da Conquista</b>	20,3	79,5	15,9	16,51
<b>Extremo superior</b>	35	30	3	6,14
<b>Extremo inferior</b>	15	90	21,3	20,10

Fonte: Adaptado de INMET (2017).

### 4.3 EXEMPLOS E DADOS DE PROCESSOS DE CONVERSÃO

Neste tópico são detalhados alguns dados importantes para os processos de conversão.

#### 4.3.1 CAVAQUEAMENTO E MOAGEM

- Gasto energético: 67,32 MJ/t em eletricidade (Oberberger; Thek, 2010);
- Custo: 2,87 US\$/t (Oberberger; Thek, 2010);
  - Eletricidade: 2,73 US\$/t;
  - Outros: 0,14 US\$/t;
- Perda de massa: 3% (devido às perdas no processo) (Násner et al., 2017).

#### 4.3.2 SECAGEM COM COBERTURA (SHED DRYING)

O cálculo dos custos da secagem com cobertura foi feito com base no custo da secagem de carvalho vermelho com um teor de umidade de madeira verde até 20% de umidade de 1,136 US\$/m<sup>3</sup>.% (Wengert, 1990) em que:

- 85% é composto por custos operacionais;
- 15% é composto por custos de degradação.

O custo foi corrigido de acordo com a inflação do dólar de 98,33% no período de 1990 a 2018 (Fxtop, 2018).

Os valores dos dados neste tópico são iguais para as rotas 1 e 2 e diferentes para a rota 3, pois a etapa de secagem para esta vai até uma umidade de 40% bu e até 20% bu para aquelas.

Para as rotas 1 e 2:

- Consumo energético: 3779,95 MJ/t em energia solar (Oberberger; Thek, 2010);
- Custo: 112,69 US\$/t (Wengert, 1990);
- Teor de umidade inicial (% bu): 55%;
- Teor de umidade resultante: 20% bu.

Para a rota 3:

- Consumo energético: 2159,94 MJ/t em energia solar (Oberberger; Thek, 2010);

- Custo: 95,30 US\$/t (Wengert, 1990);
- Teor de umidade inicial (% bu): 55%;
- Teor de umidade resultante (% bu): 40%.

#### 4.3.3 TORREFAÇÃO

- Consumo energético: 230 MJ/t em energia proveniente da queima do torgás (Michel, 2015);
- Custo: 35 US\$/t (James, 2016);
- Teor de umidade resultante (% bu): 3% (Prins; Ptasinski; Janssen, Frans J.J.G., 2006).

#### 4.3.4 RESFRIAMENTO

- Consumo energético: 5,4 MJ/t em eletricidade (Oberberger; Thek, 2010);
- Custo: 0,33 US\$/t (Oberberger; Thek, 2010);
  - Eletricidade: 0,29 US\$/t;
  - Outros: 0,03 US\$/t.

#### 4.3.5 BRIQUETAGEM

Foram usados dados de uma máquina de peletização devido à semelhança entre os dois processos.

- Consumo energético: 136,8 MJ/t em eletricidade (Oberberger; Thek, 2010);
- Custo: 11,06 US\$/t (Oberberger; Thek, 2010);
  - Eletricidade: 7,33 US\$/t;
  - Condicionamento: 0;
  - Aditivos: 3,30 US\$/t;
  - Outros: 0,43 US\$/t;
- Perda de massa: 2% (devido às perdas no processo) (Násner et al., 2017).

#### 4.3.6 SECAGEM NO SECADOR DE CORREIAS (BELT DRYING)

Os valores do consumo energético e monetário dessa máquina foram calculados iterativamente considerando que após a secagem o eucalipto é queimado com uma eficiência global de 50% (Bell, 2012) para alimentar esse processo. Os dados usados neste trabalho foram:

- Consumo energético: 4,40 GJ/t em energia proveniente da queima do eucalipto;
- Custo: 287,61 US\$/t;
- Teor de umidade inicial (%) (bu): 20%;
- Teor de umidade resultante (%) (bu): 5,78% (TUE).
- A eficiência global do equipamento (*EFF*) é de 50% (Bell, 2012);
- A demanda de calor para secagem (*DC*) de 4,32 GJ/t para reduzir o teor de umidade de 55% para 10% bu (Oberberger e Thek, 2010);
- A massa específica (*D*) do eucalipto com um teor de umidade de 25% bs (ou 20% bu) é de 547,51 kg/m<sup>3</sup>;
- O fator de correção (*R*) é igual a 6.

Vale ressaltar que o objetivo da secagem no secador de correias é deixar a biomassa no teor de umidade de equilíbrio. Os dados de consumo energético, custo e teor de umidade resultante variam com a temperatura ambiente e umidade relativa. Os valores acima são referentes a uma temperatura de 35°C e umidade relativa de 30%.

Ao fim de cada rota de produção deve-se somar o custo com pessoal e periféricos de US\$ 15,51/t (Oberberger; Thek, 2010). Esse valor foi corrigido pela inflação de 15,84% no período de 2010 a 2018 (FXTOP, 2018) e convertido para o dólar (US\$1,24/€) (UOL, 2018) assim como todos os outros valores de custos obtidos de Oberberger; Thek (2010). O custo com equipamento periférico inclui custos de investimento e demanda de energia elétrica para os sistemas transportadores, máquinas de peneirar, ventiladores, válvulas giratórias, sistema de alimentação de aditivo biológico e condicionamento.

#### 4.4 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA MADEIRA

O poder calorífico superior (*PCS*) da madeira de eucalipto é de 20,054 MJ/kg (Quirino et al., 2005) que é o valor usado para as rotas 1 e 2. De acordo com uma interpolação dos dados de Borges (2015), para o eucalipto torrefado a 280°C da rota 3, o PCS é de aproximadamente 22,8 MJ/kg.

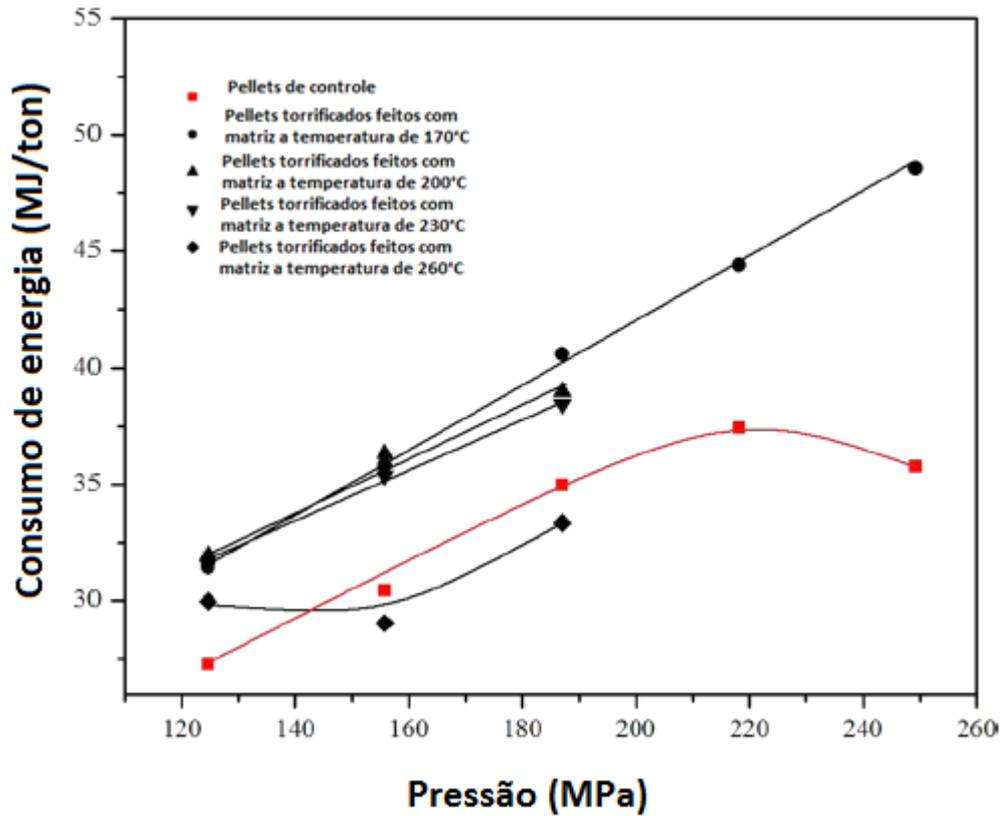
#### 4.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA TORREFAÇÃO

Segundo Peng et al. (2013), a densidade, dureza e higroscopicidade são os três indicadores de qualidade mais importantes para pellets torrefados. Com base nesses indicadores, aparentemente uma condição de torrefacção adequada é uma temperatura entre 250 e 300°C com uma perda de massa de cerca de 30%. Bergman et al. (2005b) selecionaram uma temperatura de 280°C e 17,5 min de tempo de residência para melhor moagem, qualidade do gás combustível e alta eficiência térmica. Os resultados dos experimentos de Junior et al. (2015) mostram que uma temperatura de torrefacção de 270°C ± 10 e 30 minutos de tempo de residência são favoráveis em termos do poder calorífico inferior e do teor de cinzas. Segundo Cao et al. (2015) para minimizar o consumo de energia na peletização e maximizar a força do pellet a temperatura de torrefacção ideal é de 270°C. Com base nessas fontes os parâmetros escolhidos para a torrefacção neste trabalho foram uma temperatura de 280°C e 17,5 min de tempo de residência.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA COMPRESSÃO

Segundo Obernberger e Thek (2010), cerca de 66% do custo da peletização da biomassa é devido ao consumo de energia elétrica, portanto a escolha dos parâmetros de compressão neste trabalho baseou-se na minimização da energia requerida no processo. Baseado na Figura 19, que mostra a relação entre pressão de compressão, temperatura da matriz e consumo de energia no processo de compressão de serragem de pinho torrefado a 280°C por 52 min e pellets de controle não torrefados feitos com temperatura da matriz de 70°C (Peng et al., 2013), os parâmetros escolhidos são mostrados na Tabela 17. Os resultados dos experimentos de Phanphanich (2010) para uma temperatura de 90°C, temperatura de torrefacção de 275°C e tempo de permanência de 30 min parecem confirmar estes valores.

Figura 19 - Consumo energético para a compressão de pellets comuns e torrefados em função da temperatura da matriz e pressão de compressão (serragem de pinheiro de 0,23 mm torrefada a 280°C por 52 min).



Fonte: Adaptado de Peng et al. (2013).

Tabela 12 - Parâmetros da compressão.

	Rota 2	Rota 3
Temperatura da matriz (°C)	70	260
Tempo de compressão (min)	1	1
Massa específica do pellet (kg/m <sup>3</sup> )	1237,5	1237,5
Pressão (MPa)	125	156
Consumo de energia (MJ/t)	27,5	28,75

Fonte: Peng et al. (2013).

Os experimentos de Torres et al. (2011) com uma pressão máxima de compressão de 3,902 MPa resultaram em um valor máximo de energia requerida nos valores do processo de compressão ligeiramente abaixo de 25 kJ/kg para deformações de cerca de 60%.

## 4.7 TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Grande parte dos custos da empresa transportadora foram obtidos do trabalho de Araújo et al., (2014). Eles incluem custos de remuneração de capital, salários, reposição de veículos e equipamentos, licenciamentos, seguros, manutenção, lubrificantes, pedágios e outros. Eles foram convertidos para o dólar que em março de 2014 valia R\$ 2,326 de acordo com ACI (2017) e corrigidos de acordo com a inflação do dólar de 4,81% de 1 de Março de 2014 a 26 de Setembro de 2017 (FXTOP, 2017). É importante que as parcelas que compõem os custos sejam detalhadas para permitir a avaliação de efeitos como a redução do custo da energia gerada por quilometro com o aumento da distância e redução do custo da energia devida aos benefícios dos processos de conversão como aumento da densidade energética da biomassa, que permite que mais energia na forma de biomassa possa ser transportada em um único vagão de trem ou caminhão.

Os dados de entrada nas fórmulas usadas nos cálculos referentes ao transporte rodoviário são:

- *NC* é o número de caminhões da empresa que é 319 (Araújo et al., 2014);
- *ML* é igual a 1,4 e representa a margem de lucro;
- *CCO* é o custo com combustível de R\$ 3,595/l (Preço dos combustíveis, 2018);
- *EC* é o rendimento do caminhão cheio de 2,2 km/l de óleo diesel comum (Araújo et al., 2014);
- *EV* é o rendimento do caminhão vazio de 3,17 km/l (Natural Resources Canada, 2018), pois na viagem de volta o caminhão está descarregado;
- *TC* é a taxa de cambio do dólar de US\$ 3,69/R\$ (UOL, 2018);
- *CH* é a soma das cargas horárias mensais dos dois motoristas somadas (para cada caminhão) que foi considerada 352 horas;
- *V* é a velocidade média dos caminhões de 45 km/h (Souza, 2018);
- *TCD* é o tempo de carga e descarga que é de 6 horas segundo o manual da NTC (NTC, 2014);
- *MM* é a massa máxima que o caminhão em questão é capaz de suportar que é de 26 toneladas. O caminhão é o Cavalo Trator Scania – R124 – 4x2 – 360CV, que tem três eixos (Araújo et al., 2014);

Um conceito importante para a compreensão dos resultados é o da dissolução dos custos fixos. Os custos fixos associados a um vagão não mudam com o aumento da distância, mas os variáveis mudam, dessa forma quanto maior a distância menor será o quociente custos fixos sobre custos totais, ou seja, menor será a participação dos custos fixos nos custos totais.

De acordo com Truckpad (2018), a carroceria do caminhão considerado tem um volume de 207,636 m<sup>3</sup> e a massa máxima que o caminhão considerado é capaz de suportar é de 26 t (Araújo et al., 2014). Esses dois fatores limitam a quantidade de carga que o caminhão pode transportar. Supondo que uma carga tenha uma massa específica tal que ao atingir o limite de massa do caminhão o limite de volume seja simultaneamente atingido, essa massa específica, que foi nomeada massa específica limitante neste trabalho, seria:

$$\frac{26 \text{ ton}}{207,636 \text{ m}^3} = 125,2 \text{ kg/m}^3 \quad (43)$$

Abaixo desse valor o volume máximo da carroceria seria o fator limitador da carga, acima dele a massa máxima é o fator limitador. A rota que produz o eucalipto com menor densidade é a 1 com 360,20 kg/st. st é a sigla para metro cúbico estéreo que é usado quando se quer medir a densidade de algo que tem espaços vazios entre seus pedaços sólidos como pedaços de madeira seca. Logo para o caso rodoviário o volume máximo da carroceria nunca vai ser o fator limitante da carga, será sempre a massa máxima de 26 t. Assim pode-se dizer que o efeito dos processos de conversão que aumentam a massa específica da madeira, como a briquetagem, não são bem aproveitados, pois sem usar esses processos a densidade da carga já é superior à densidade limitante.

No caso ferroviário o volume máximo de um vagão é de 134 m<sup>3</sup> e a massa máxima é de 104,7 t (Guialog, 2017). Logo a massa específica limitante é de:

$$\frac{104,7 \text{ t}}{134 \text{ m}^3} = 781,3 \text{ kg/m}^3 \quad (44)$$

Que é maior do que a densidade aparente dos produtos das três rotas, logo os processos de conversão que aumentam a massa específica da madeira podem ser melhor aproveitados, pois promovem uma diluição dos custos fixos, dessa vez em relação à massa de madeira e não

à distância entre plantas, pois como um mesmo vagão vai transportar uma massa maior de madeira significa que custos fixos, como o salário do maquinista por exemplo, serão dissolvidos. Entretanto a ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres, determina que os preços de frete são dados como um valor em R\$/t, que é uma função apenas da distância de transporte inviabilizando a avaliação do efeito do aumento da massa específica. Outras fontes de outros países fornecem os preços de frete ferroviário da mesma maneira (CMA, 2015; Jelezov, 2005; Pakistan Railways, 2018; BITRE 2017; Railcargo, 2018).

#### 4.7.1 IMPOSTOS DA TRANSPORTADORA

A margem de lucro da empresa transportadora de 40% foi aplicada com o intuito de que seu lucro líquido tenha um valor apreciável de 10,24%. De acordo com Portal Tributário (2017), na modalidade de lucro presumido os impostos são deduzidos diretamente do faturamento e estão detalhados na Tabela 18.

Tabela 18 - Impostos da empresa transportadora.

<b>Imposto</b>	<b>Dedução (%)</b>
<b>IRPJ</b>	4,8
<b>Contribuição Social</b>	2,88
<b>PIS</b>	0,65
<b>COFINS</b>	3
<b>ICMS</b>	7

Fonte: Portal Tributário (2017).

#### 4.8 TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Os dados de entrada nas fórmulas usadas nos cálculos referentes ao transporte ferroviário são:

- $M$  é a massa máxima de eucalipto que um vagão suporta de 104,7 t (Gualog, 2017).

- *FF* é o custo do frete ferroviário (ANTT, 2010). O valor da fonte foi corrigido pela inflação do dólar de 16,51% no período de 2010 a 2018 (FXTOP, 2018), convertido para o dólar na taxa de R\$ 3,76 por dólar (UOL, 2018) e somado ao imposto ICMS de 7% (Portal Tributário, 2017).

O valor do *FF* foi obtido da empresa All e, de acordo com determinações da agência governamental brasileira ANTT, os preços de frete são dados como um valor em R\$/t, que é uma função apenas da distância de transporte. Outras fontes de outros países fornecem os preços de frete ferroviário da mesma maneira (CMA, 2015; Jelezov, 2005; Pakistan Railways, 2018; BITRE 2017; Railcargo, 2018).

#### 4.9 ANÁLISE ECONÔMICA

Em ambos os casos, rodovia e ferrovia, foi realizada uma análise econômica imaginando que o processamento e as empresas de transporte suprem a demanda de eucalipto para uma usina termelétrica que produz 1212 t/h de vapor (Torres, EA & Gallo, WLR, 1998) em suas caldeiras. Os parâmetros de vapor foram baseados no vapor que é produzido nas caldeiras mencionadas na obra de Torres, E.A. & Gallo, W. L. R. (1998). Onde a temperatura do vapor após as caldeiras é de 530°C e antes delas é de 250°C. O vapor vai do pré-aquecedor de alta temperatura para as caldeiras com esta temperatura. A pressão do vapor após as caldeiras é de 12.000 kPa e antes delas assume-se que é a mesma baseando-se na hipótese de perda de carga desprezível nelas.  $\Delta h$  é a diferença na entalpia do vapor antes e depois das caldeiras de 2,343 GJ/t calculada com o software EES. Os dados de entrada nas fórmulas usadas nos cálculos referentes à análise econômica são:

- *ME* é a massa de eucalipto transportada em uma carroceria de caminhão ou vagão de trem. É igual a 26 toneladas (Araújo et al., 2014) para o transporte rodoviário e 104,7 toneladas (Guialog, 2017) para o transporte ferroviário.
- *SF* é o fluxo de vapor de 1.212 t/h ou 872.640 t/mês (Torres, E. A. e Gallo, W. L. R., 1998);
- *NM* é o número de meses (312) até que as máquinas se desvalorizem e percam todo o seu valor (Erumban, 2008);

- A taxa de juros anual de 11,13% (Tesouro Nacional, 2018) foi adotada, o que equivale a uma taxa de juros mensal de 0,88%.

A Tabela 19 mostra os preços e vazões máximas de entrada de cada máquina.

Tabela 19 - Custos do investimento inicial.

<b>Máquina</b>	<b>Vazão máxima de entrada (kg/h)</b>	<b>Preço da máquina (US\$)</b>
<b>Torre Tech 5.0</b>	5.000,00 <sup>a</sup>	5.000.000,00 <sup>a</sup>
<b>Moinho de martelos</b>	5.259,84 <sup>b</sup>	279.198,00 <sup>b</sup>
<b>Resfriador</b>	5.000,00 <sup>b</sup>	43.370,00 <sup>b</sup>
<b>Moinho de pellets</b>	5.102,04 <sup>b</sup>	632.938,18 <sup>b</sup>
<b>Secador de correia</b>	9.831,47 <sup>b</sup>	1.287.561,60 <sup>b</sup>

Fontes: Obernberger e Thek, (2010)<sup>b</sup> e James (2016)<sup>a</sup>. (Os preços foram ajustados de acordo com a inflação do dólar no período de 2010 a 2018 (FXTOP, 2018) e convertidos para o valor em dólares (UOL, 2018))

As vazões máximas de entrada foram calculadas baseando-se na capacidade de produção de pellets da planta descrita por Obernberger; Thek (2010) que é de 5.000 kg/h e nas perdas de massa do moinho de martelos que é de 3% e do moinho de pellets de 2% (Násner et al., 2017). Dessa forma como o resfriador é a última máquina da rota de produção desta planta e sua perda de massa não é significativa, pode-se dizer que sua vazão de entrada é igual à vazão de saída da planta de 5.000 kg/h. O moinho de pellets é a penúltima máquina da rota, logo sua vazão de entrada máxima é de:

$$\frac{5000}{1 - 0,02} = 5102,04 \text{ kg/h} \quad (45)$$

Logo antes dele está o moinho de martelos, logo sua vazão de entrada é de:

$$\frac{5102,04}{1 - 0,03} = 5259,84 \text{ kg/h} \quad (46)$$

A vazão antes do secador de correia foi calculada considerando a razão de massas específicas entre o eucalipto a 10 e a 55% de umidade que é de 0,535 como a razão entre as vazões mássicas da saída e da entrada do secador, logo sua vazão de entrada é de:

$$\frac{5259,84}{0,535} = 9831,48 \text{ kg/h} \quad (47)$$

O custo das máquinas está de acordo com Obernberger; Thek (2010) considerando a inflação do dólar de 01/01/2010 até 07/03/2018 que de acordo com FXTOP (2018) é de 15,84% e a conversão de euro para dólar de US\$ 1,17/ € de acordo com UOL (2018).

#### 4.10 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PARA TERMELÉTRICAS REAIS

Os exemplos são sobre o transporte de eucalipto dos fornecedores de eucalipto para a planta termoelétrica número 1 localizada na cidade de Aratu e de fornecedores para a planta número 2 localizada na cidade de São Desidério. Os fornecedores estão dentro de um raio de 150 e 30 km, respectivamente (Celulose Online, 2014 e Dow, 2016). Os resultados estão na Tabela 20. Foram usadas as condições climáticas de cidades próximas nos cálculos. Para a planta 1 foram usadas as condições de Alagoinhas e para a 2 as de Barreiras.

Tabela 20 - Resultados dos exemplos de aplicação real.

Planta	Distância para os fornecedores de eucalipto (km)	Condições climáticas	Rota com o menor preço do vapor	VPL (US\$)	TRI (meses)
1	150	24,6°C e 78,6 % de umidade relativa	Rota 3 usando ferrovias (51,27 US\$/t)	415.229.519,43	32,1
2	30	25,3°C e 65,2 % de umidade relativa	Rota 3 usando ferrovias (49,83 US\$/t)	1.144.282.368,5 <sup>1</sup>	12,7

A rota 3 combinada com o modal ferroviário é a mais vantajosa para os dois casos. O custo do vapor é menor usando ferrovias, mas estas podem não estar disponíveis.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 SECAGEM EM UM SECADOR DE CORREIAS

Neste trabalho considerou-se que o secador de correia é alimentado pela queima do eucalipto seco para minimizar custos. Por meio de um cálculo iterativo, verificou-se que esse processo de secagem custa entre cerca de US\$ 4,67/m<sup>3</sup>.% e US\$ 7,42/m<sup>3</sup>.% (Dólares por metro cúbico por porcentagem de umidade em base úmida).

### 5.2 TORREFAÇÃO

O resultado para uma temperatura de 280°C e 17,5 min de tempo de residência é um rendimento em massa (*MR*) de 80%. Uma perda de massa similar ocorre para torrefação nesta temperatura de acordo com Dhungana (2011).

Esses resultados são próximos dos encontrados por Phanphanich (2010) que em seus experimentos torrificou pedaços limpos de madeira de pinho com um tempo de residência de 30 minutos como mostra a Tabela 21.

Tabela 21 - Rendimentos mássico e energético de pedaços de pinho torrefados a diferentes temperaturas.

Pedaços de madeira	Rendimento mássico (%)	Rendimento energético (%)
<b>Torrefados a 225°C</b>	89	94
<b>Torrefados a 250°C</b>	82	90
<b>Torrefados a 275°C</b>	73	87
<b>Torrefados a 300°C</b>	52	71

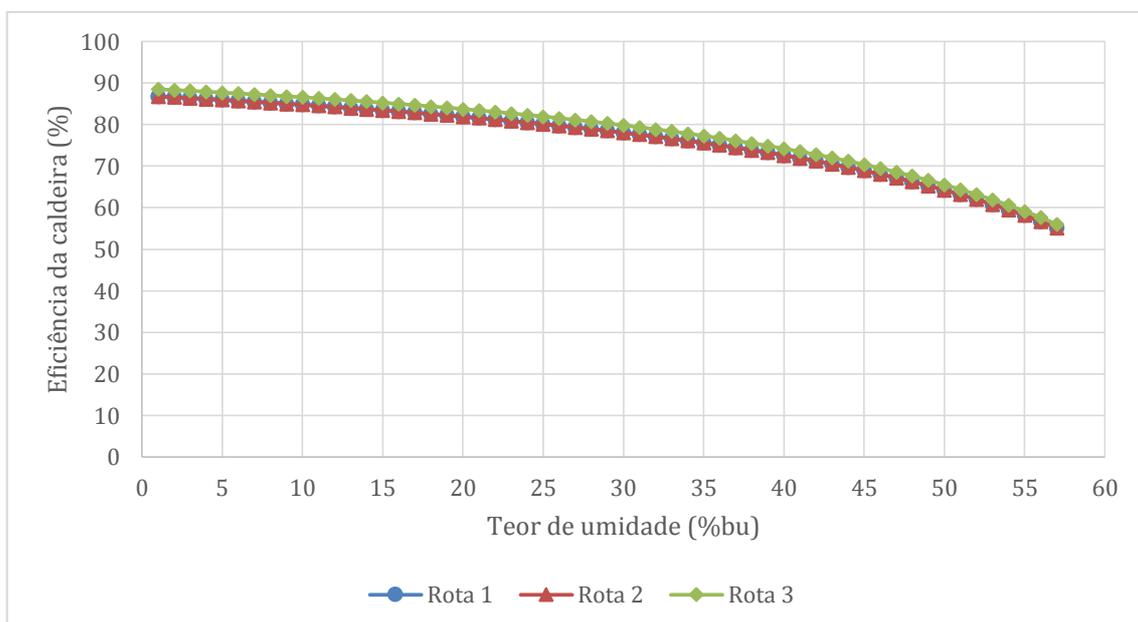
Fonte: Phanphanich (2010).

Observa-se que quanto maior a temperatura de torrefação menor é o rendimento mássico, pois uma massa maior da biomassa foi volatilizada.

### 5.3 EFICIÊNCIA DA CALDEIRA

As eficiências calculadas para cada rota estão detalhadas na Figura 20 em função do teor de umidade em base úmida da biomassa:

Figura 20 - Eficiências da caldeira para os produtos de cada uma das rotas de produção em função do teor de umidade.



Pode-se observar que para a rota 3 a eficiência é mais alta como era de se esperar devido ao seu maior poder calorífico e menor excesso de ar devido à homogeneização causada pela briquetagem assim como ocorre na rota 2. As eficiências das rotas 1 e 2 são bem próximas, entretanto a da rota 2 é sempre maior.

De acordo com Dzurenda; Banski (2015), caldeiras para combustão de biomassa de madeira com uma produção mediana chegam à eficiência térmica de 75% a 85% e caldeiras de madeira modernas chegam a eficiência de 92%. Segundo Use wood fuel (2018) e DECC (2014), caldeiras de biomassa são fabricadas para usar uma gama específica de combustíveis. Por exemplo, pellets com 10% de umidade ou cavacos de madeira úmidos com teor de umidade de 45% a 50%. Os fabricantes geralmente declaram que a eficiência de combustão de suas caldeiras pode variar de cerca de 94% para pellets, até cerca de 80% para cavacos de madeira úmidos. Segundo James (2016), a biomassa seca e torrefada pode atingir uma eficiência de combustão de 95% ou mais se for moída até um tamanho de partícula pequeno (<1 mm para caso seca e <500 µm caso torrefada). Esses valores de eficiências estão próximos dos obtidos nos cálculos deste trabalho.

## 5.4 TRANSPORTE RODOVIÁRIO

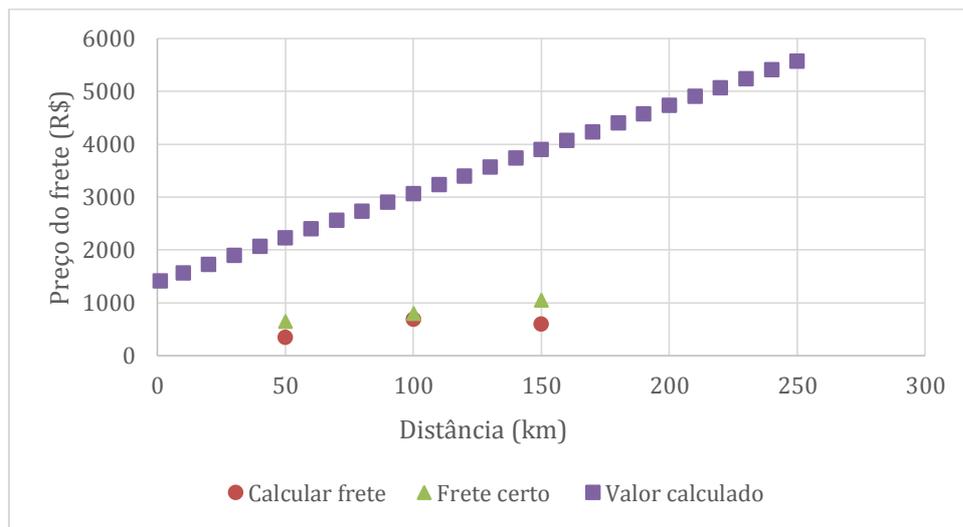
### 5.4.1 PREÇO DO FRETE

A Figura 21 mostra o preço do frete rodoviário calculado de acordo com a metodologia mostrada em função da distância entre plantas e o compara com os resultados de dois aplicativos de cálculo de frete de Android, o Calcular Frete e o Frete Certo mostrados nas Figuras 22 e 23. Foram as escolhidas as seguintes configurações:

- Carga geral;
- Sem carga no retorno;
- Não inclui pedágio;
- Carga de 26 t;
- Caminhão de 3 eixos.

A diferença nos resultados se deve às poucas opções de cálculo que os aplicativos disponibilizam, tornando-os pouco precisos, além disso os aplicativos são destinados à motoristas autônomos.

Figura 21 - Preço do frete em função da distância entre plantas.



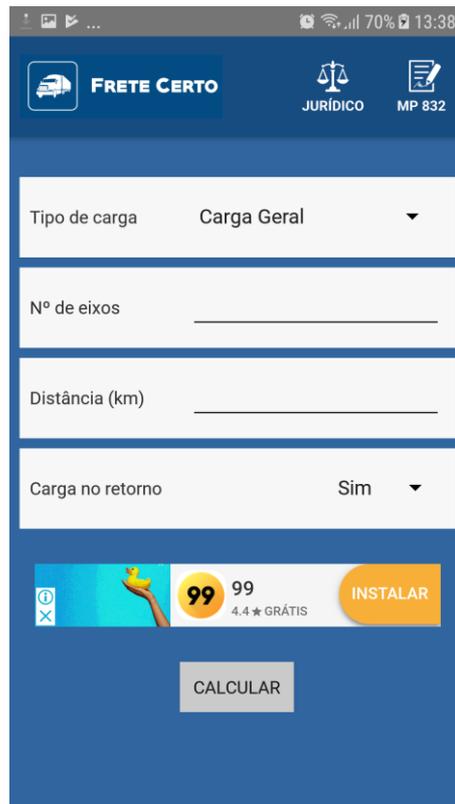
Fonte: Google (2018a) e Google (2018b).

Figura 22 - Aplicativo Calcular Frete.



Fonte: Google (2018a).

Figura 23 - Aplicativo Frete Certo.



Fonte: Google (2018b).

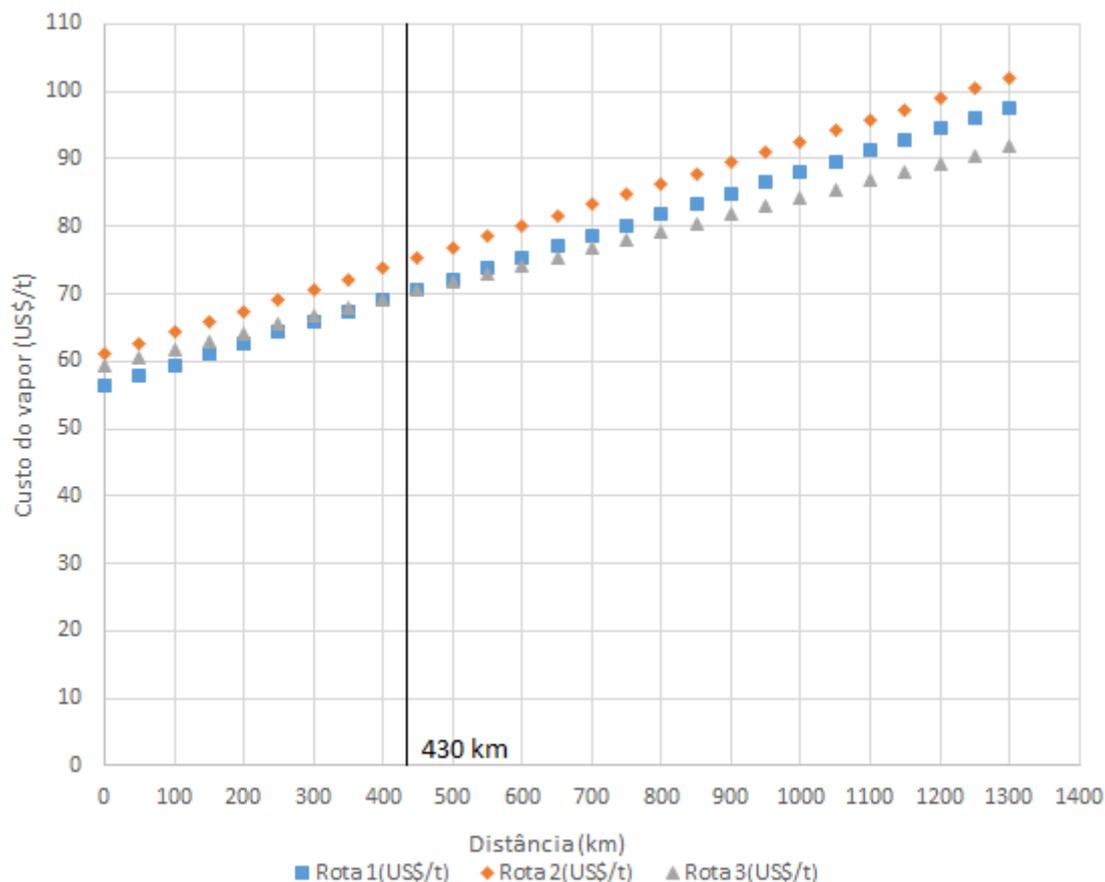
#### 5.4.2 EXTREMOS CLIMÁTICOS

Os resultados foram obtidos para dois extremos climáticos que foram escolhidos com o objetivo de abranger a maior parte da faixa na qual é possível cultivar biomassa. O extremo superior tem temperatura de 35°C e umidade relativa de 30% e o inferior tem temperatura de 15°C e umidade relativa de 90%.

##### 5.4.2.1 Extremo Inferior

Os resultados para o custo do vapor produzido nas caldeiras estão detalhados na Figura 24. Como esperado, a rota 3 permite a produção de um vapor mais barato para distâncias maiores, mas não para as mais curtas.

Figura 24 - Custo do vapor em US\$/t.

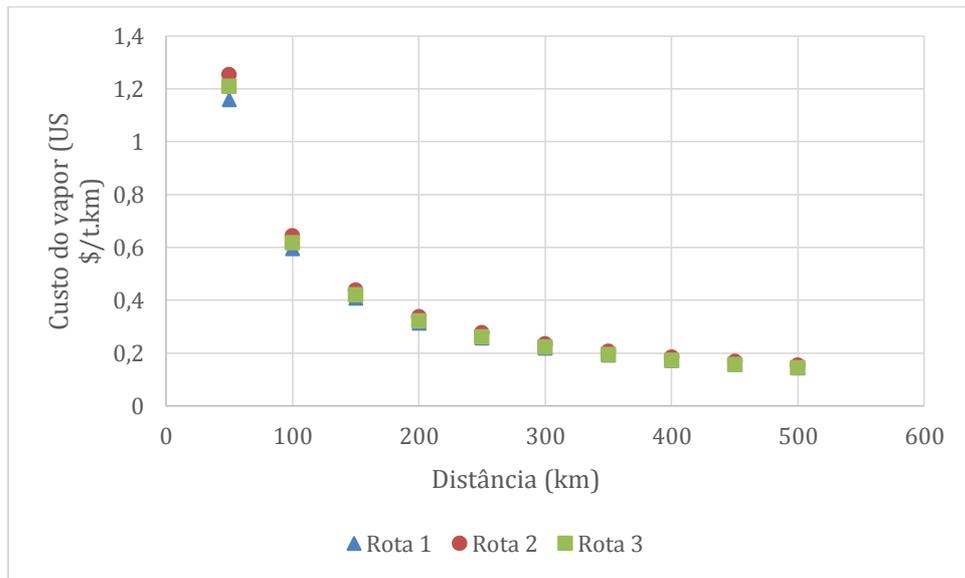


Observa-se que o custo do vapor aumenta com o aumento da distância para as três rotas. Isso ocorre pois os custos com transporte da biomassa estão inclusos.

A cerca de 430 km, o vapor da rota 3 torna-se mais barato do que o da 1. A rota 2 só produz vapor mais barato que a 1 para distâncias muito altas que não são viáveis no transporte rodoviário. Esses resultados indicam que a segunda rota de produção não é uma boa opção para o transporte rodoviário nessas condições climáticas e a terceira pode resultar em preços de energia mais baixos, dependendo da distância, pois os benefícios proporcionados pela torrefação na rota 3 requerem altas distâncias para que os maiores custos de investimento sejam dissolvidos e assim tornar essa rota mais vantajosa economicamente.

A Figura 25 é útil para a observação da redução do custo do vapor por km com o aumento da distância devido à dissolução dos custos fixos. Os custos das três rotas parecem ser reduzidos assintoticamente e aproximam-se com o aumento da distância.

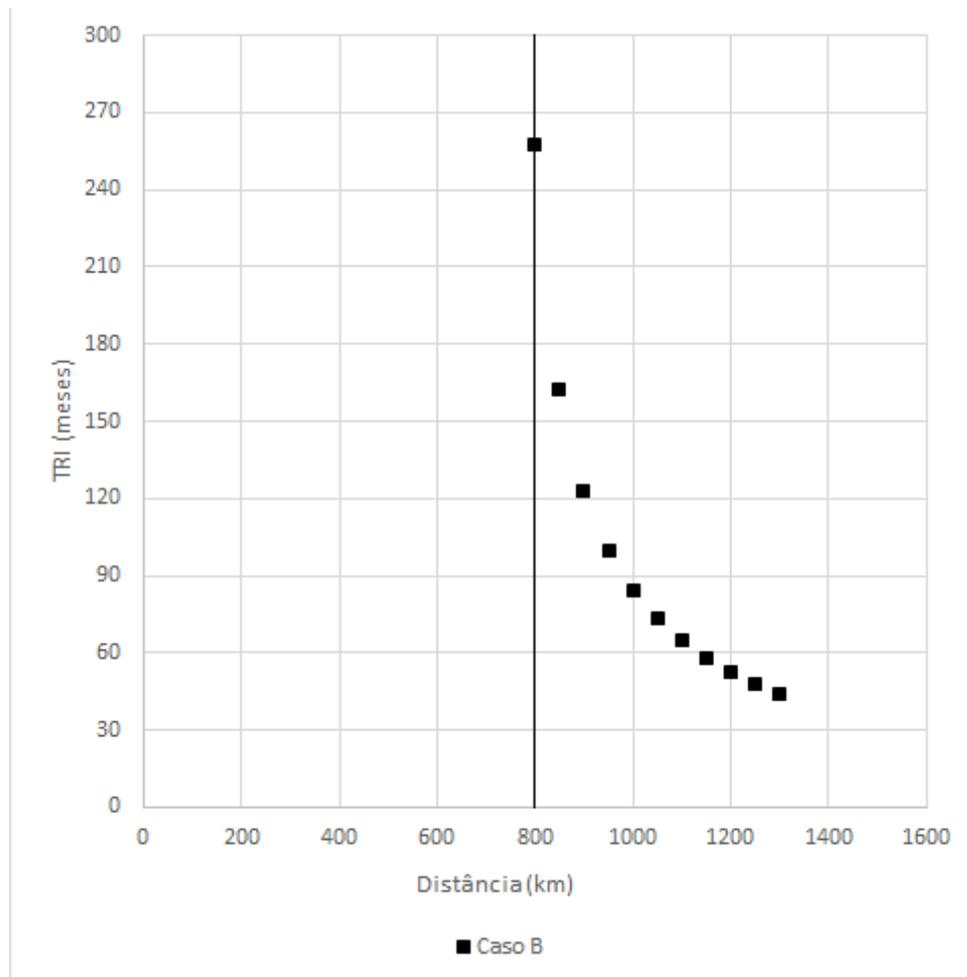
Figura 25 - Custo do vapor por quilômetro.



A análise econômica foi dividida em dois casos. O caso A representa uma mudança da rota 1 para a 2 e o caso B da 1 para a 3.

Os resultados para o tempo de retorno do investimento estão detalhados na Figura 26.

Figura 26 - Tempo de retorno do investimento.

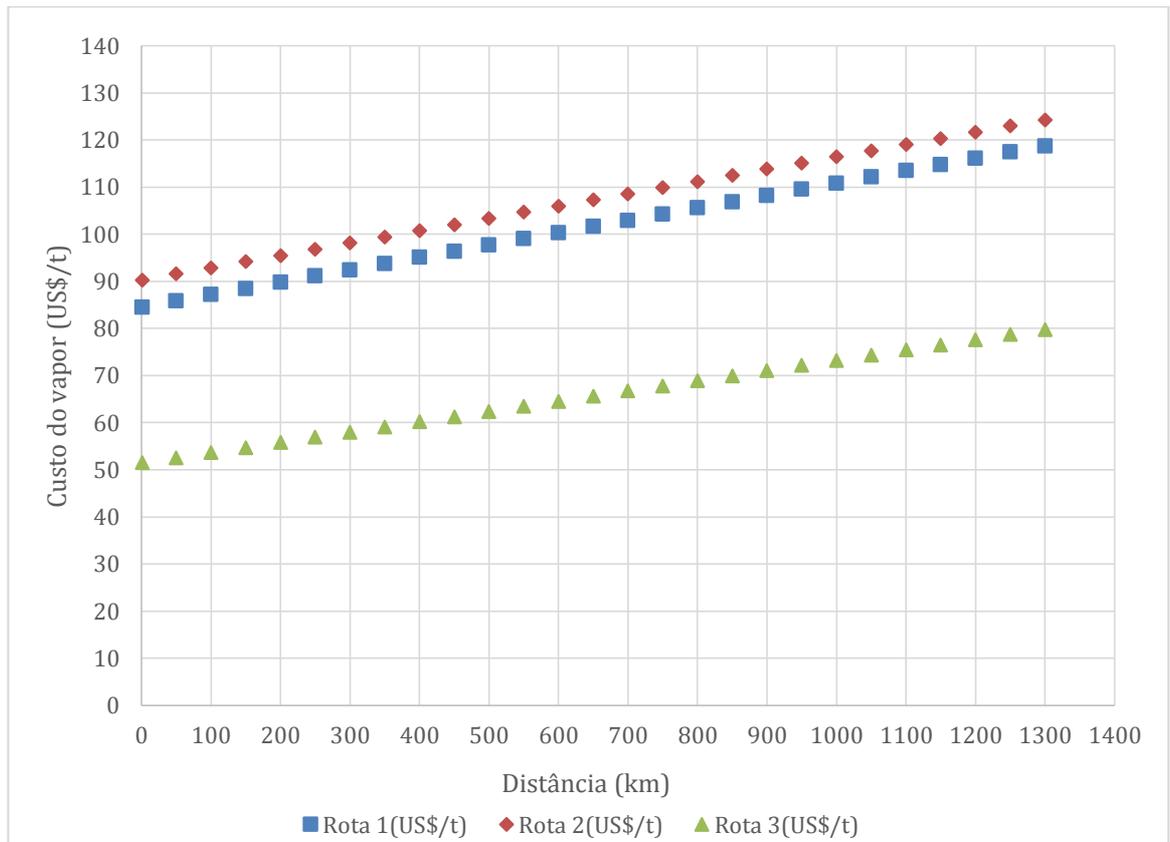


O TRI diminui com o aumento da distância. Isso ocorre, pois os custos adicionais da terceira rota são dissolvidos com distâncias maiores, logo o retorno do investimento passa a demorar menos. Observa-se que o TRI tende a infinito à medida que a distância tende a 800 km que é o ponto onde o valor presente líquido é zero.

#### 5.4.2.2 Extremo Superior

Os resultados para o custo do vapor nas condições climáticas do extremo superior estão detalhados na Figura 27. Nessas condições climáticas a rota 3 fornece a energia mais barata mesmo para 1 km de distância.

Figura 27 - Custo do vapor em US\$/t.

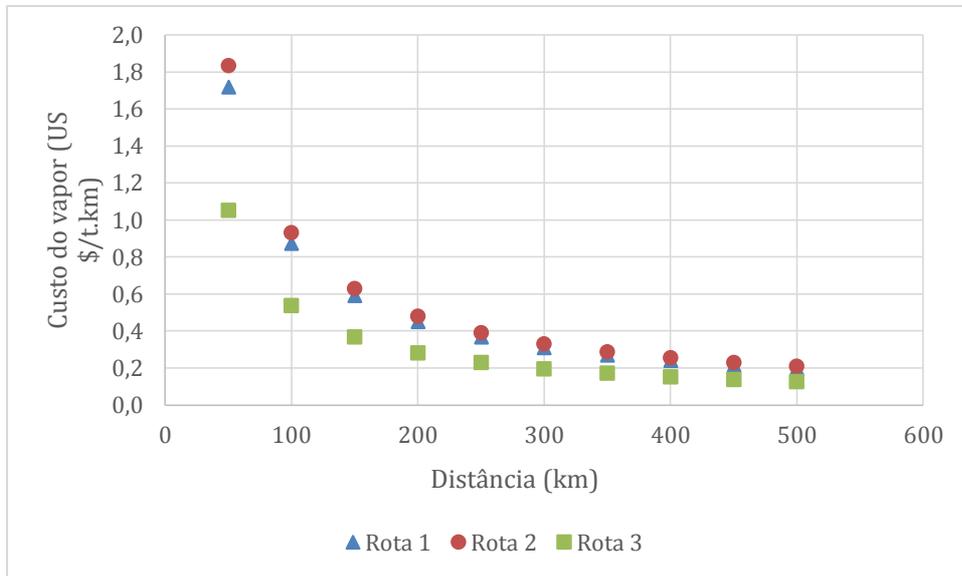


Novamente a rota 2 se mostra inviável para distâncias plausíveis no transporte rodoviário, pois o custo do vapor é mais alto para uma grande faixa de distâncias.

O torrefador gera um processo auto térmico que é alimentado pelos gases que ele gera (James, 2016), e é provavelmente devido a isso que o uso da torrefação (rota 3) resulta em um vapor mais barato do que o da secagem no secador de correia (rota 1). Para um clima mais quente e seco a umidade de equilíbrio é menor, logo mais energia precisa ser gasta na secagem para atingir esse teor de umidade o que explica o baixo custo do vapor produzido com a rota 3.

A Figura 28 é útil para a observação da redução do custo da energia por km com o aumento da distância. O custos parecem ser reduzidos assintoticamente e aproximam-se com o aumento da distância.

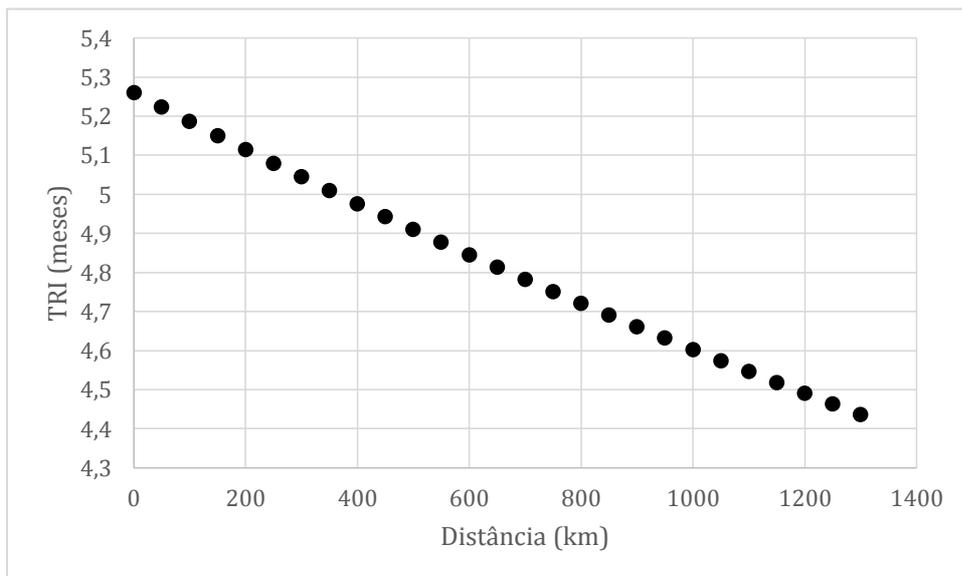
Figura 28 - Custo do vapor por quilômetro.



Esse resultado mostra que a rota 3 é vantajosa economicamente nessas condições climáticas usando o transporte rodoviário.

Os resultados para o tempo de retorno do investimento estão detalhados na Figura 29.

Figura 29 - Tempo de retorno do investimento.



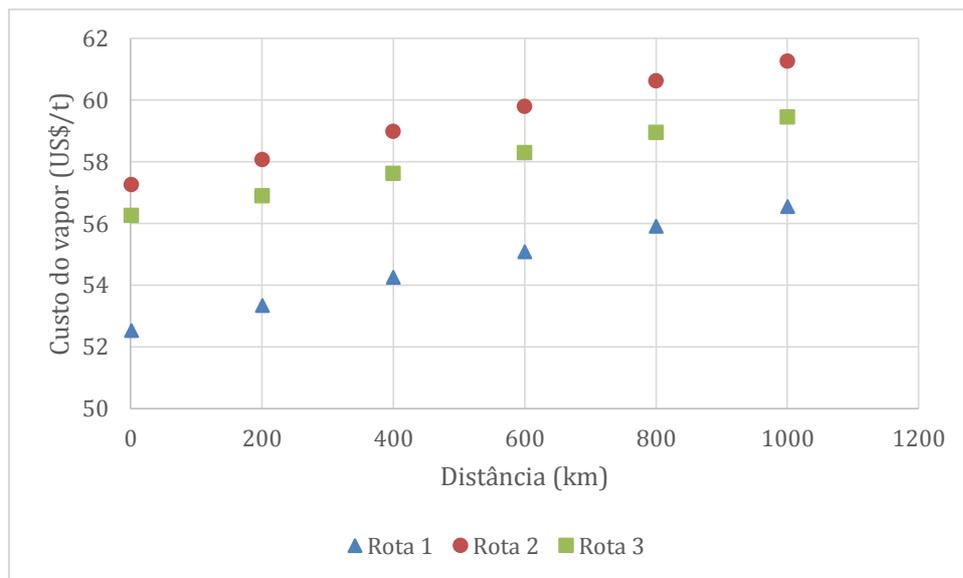
De acordo com esse indicador, o retorno no investimento é relativamente rápido mesmo para baixas distâncias.

## 5.5 TRANSPORTE FERROVIÁRIO

### 5.5.1 EXTREMO INFERIOR

A Figura 30 mostra os resultados para o custo do vapor em US\$/t para o caso ferroviário e condições climáticas do extremo inferior.

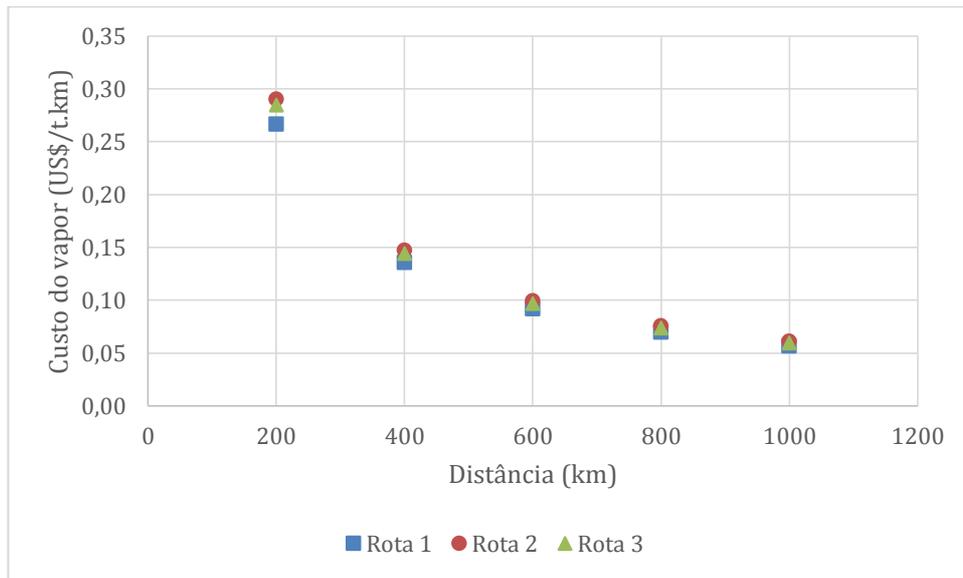
Figura 30 - Custo do vapor.



O vapor da rota 3 se torna mais barato que o da 1 a partir de uma distância de mais de 5000 km que é muito alta e não faz sentido a planta de conversão estar tão distante da termelétrica. Estes resultados são muito semelhantes aos mostrados na Figura 39 para o caso rodoviário, indicando que a segunda rota de produção também não é uma boa opção para o transporte ferroviário e a terceira também não é vantajosa nessas condições.

A Figura 31 é útil para a observação da redução do custo da energia por km com o aumento da distância. O custos parecem ser reduzidos assintoticamente e aproximam-se com o aumento da distância.

Figura 31 - Custo da energia por quilômetro.

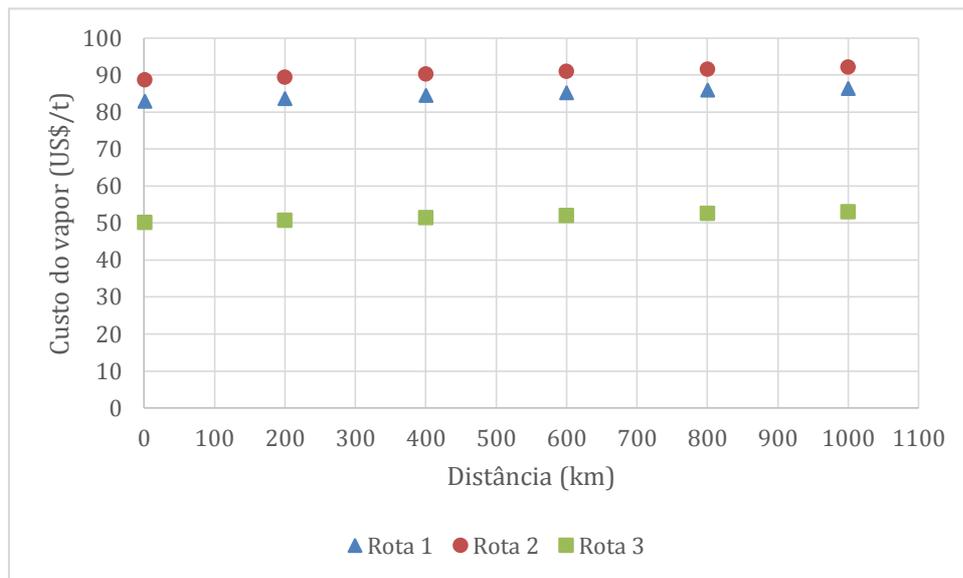


Os tempos de retorno do investimento não se aplicam a esse caso, pois os VPL's são negativos mesmo para distâncias bem altas. Observa-se que nem a rota 2 nem a 3 são vantajosas para o modal ferroviário nessas condições climáticas.

### 5.5.2 EXTREMO SUPERIOR

A Figura 32 mostra os resultados para o custo do vapor em US\$/t.

Figura 32 - Custo do vapor.

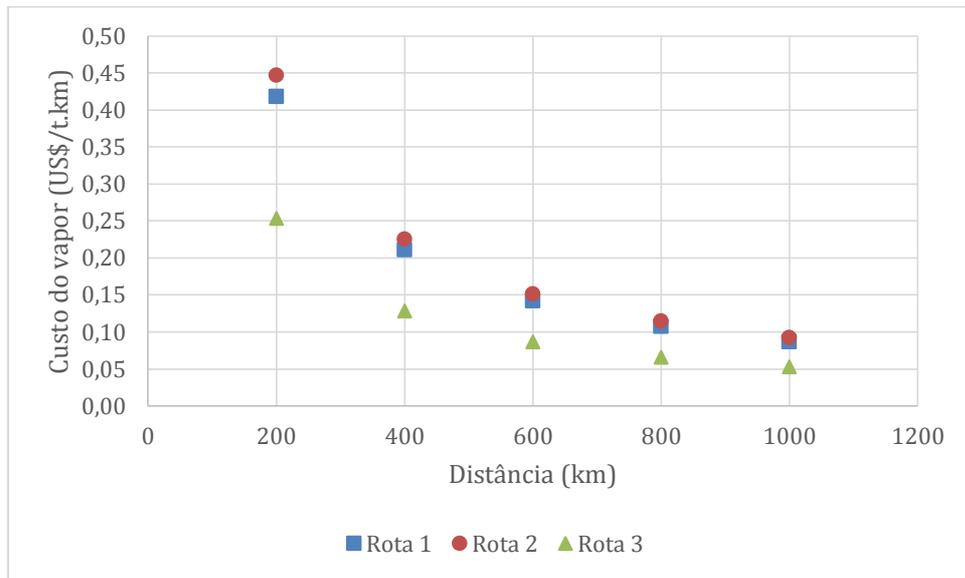


O vapor da rota 3 é mais barato que o da 1 mesmo para 1 km de distância, o que indica que as condições climáticas do local têm influência significativa no custo do vapor também no caso do modal ferroviário.

Os resultados obtidos confirmam as conclusões de Gonzales et al. (2013), meios de transporte econômicos para o transporte de grandes volumes de biomassa por longas distâncias, como o ferroviário, devem ser utilizados como se observa nas Figuras 25, 28, 31 e 33.

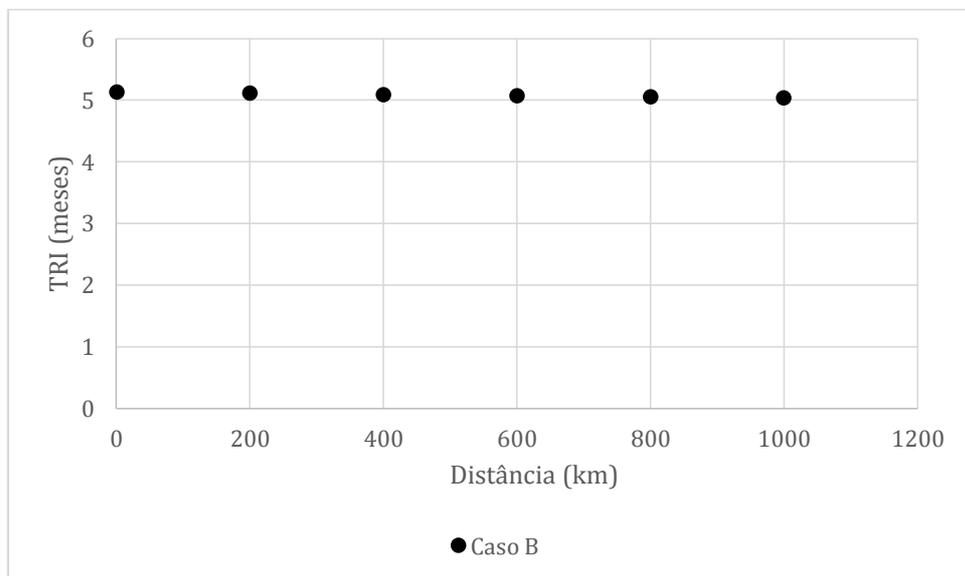
A Figura 33 é útil para a observação da redução do custo do vapor por km com o aumento da distância. O custos parecem ser reduzidos assintoticamente e aproximam-se com o aumento da distância.

Figura 33 - Custo do vapor por quilômetro.



O tempo de retorno do investimento do caso B está detalhado na Figura 34.

Figura 34 - Tempo de retorno do investimento.



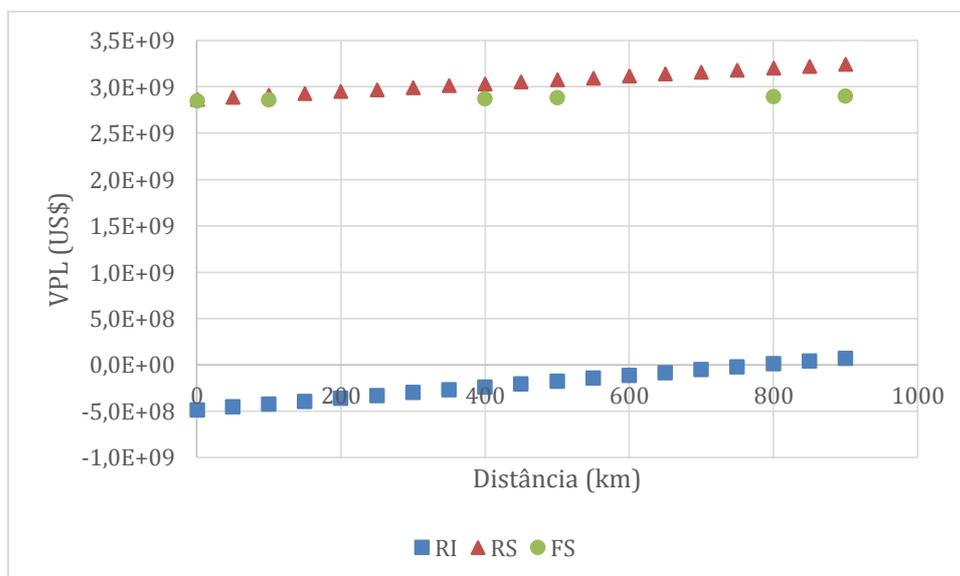
Observa-se que o tempo de retorno é relativamente baixo mesmo para distâncias bem curtas e diminui com o aumento da distância.

### 5.5.3 VALORES PRESENTE LÍQUIDOS

O cálculo do VPL foi feito para comparar o retorno do investimento nas máquinas dos processos de conversão com o do tesouro direto. Um VPL positivo significa que o retorno é maior que o do tesouro direto. Os resultados para o valor presente líquido são detalhados na Figura 35 para o transporte rodoviário no extremo inferior (RI), extremo superior (RS) e o ferroviário no extremo superior (FS) todos para o caso B, pois o A não se mostrou viável para nenhum caso. O VPL é negativo até em torno de 800 km que é uma distância muito alta para o transporte rodoviário tornando a rota 3 inviável para RI. Para o extremo superior (RS) o valor presente líquido é positivo mesmo para distâncias bem pequenas.

Para o transporte ferroviário no extremo inferior (FI) mesmo para uma distância de 6000 km o VPL é negativo para os dois casos por isso essa variação não é mostrada no gráfico. Para efeito de comparação a distância entre o extremo norte do Brasil, a nascente do Rio Ailã, no Monte Caburaí, em Roraima e o extremo sul, o Arroio Chuí, no Rio Grande do Sul é de 4.394 km (Mundo Educação, 2018). O VPL é positivo mesmo para distâncias bem curtas para o extremo superior (FS).

Figura 35 - VPL para diferentes modais e condições climáticas.



Com esses resultados conclui-se que a rota 2 não é economicamente vantajosa, mas a rota 3 pode ser bastante lucrativa quando combinada com esse modal a depender das condições climáticas e da distância entre a planta de conversão e a planta termelétrica. A explicação para

isso está no fato de que a briquetagem, que é o processo que diferencia a rota 1 da rota 2, não tem seu potencial de redução de custo do vapor devidamente aproveitado como explicado anteriormente, enquanto isso os benefícios da torrefação que é o processo que diferencia a rota 1 da rota 3 são bem aproveitados e reduzem o custo do vapor produzido na termelétrica.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Gardbro (2014). No caso 1 do seu estudo, para o transporte da Suíça até a Dinamarca, 305 km de trem, 1503 km de navio e 16 km de caminhão. Pellets torreficados são 7% mais eficientes em termos de custos. No caso 2, para o transporte de Tifton nos EUA até Geertruidenberg na Holanda, 149 km de trem, 8709 km de navio e 55 km de caminhão. Pellets torrefados são 12% mais eficientes em termos de custos.

Outras comparações das cadeias de suprimentos para pellets torrefados e não torrefados também foram realizadas por Wild (2011), Ekbohm (2013) e Koppejan et al. (2012), e todos chegaram à conclusão de que o pellet torrefado é mais econômico do que o não torrefado para o usuário final.

## **6 CONCLUSÕES**

Foi feita uma análise técnico-econômica de diferentes rotas de produção constituídas por processos de conversão aplicados à madeira de eucalipto como a secagem, a briquetagem e a torrefação. Estes são capazes de tornar as propriedades da biomassa mais adequadas para a geração de energia diminuindo custos de transporte, aumentando a eficiência das caldeiras, entre outras vantagens. Foi calculado o custo do vapor gerado com a biomassa que passou por cada uma das rotas para diferentes condições climáticas e distâncias entre a planta de conversão e a termelétrica. Posteriormente foram calculados o valor presente líquido e o tempo de retorno do investimento necessário para transformar a rota mais simples em uma das mais complexas.

A rota 1 se resume em picar e secar a madeira, a 2 em picar, secar e briquetar e a 3 em picar, secar, torrefar e briquetar. O uso do eucalipto briquetado da rota 2 resulta em preços mais altos para a energia e o uso do eucalipto apenas seco da rota 1 ou torrefado da rota 3 pode resultar em preços mais baixos e maiores e mais rápidos retornos sobre o investimento, dependendo das condições climáticas, da distância entre a termelétrica e a planta de conversão e do modal de transporte utilizado. A variação do custo do vapor gerado, a depender das condições climáticas, em US\$ por tonelada, para o transporte rodoviário e distância de 1 km para as rotas 1,2 e 3 é de US\$ 81 a US\$ 52, US\$ 85 a US\$ 56 e US\$ 49 a US\$ 55

respectivamente. Para 500 km varia de US\$ 67 a US\$ 93, US\$ 71 a US\$ 98 e US\$ 66 a US\$ 59 respectivamente. Para o transporte ferroviário e distância de 1 km varia de US\$ 79 a US\$ 50, US\$ 84 a US\$ 54 e US\$ 47 a US\$ 53 respectivamente. Para a distância de 500 km varia de US\$ 52 a US\$ 81, US\$ 56 a US\$ 86 e US\$ 55 a US\$ 49 respectivamente.

O processo de torrefação, presente na rota 3, apresenta resultados muito interessantes, pois aumenta a densidade energética da biomassa por meio de um processo relativamente barato por ser auto térmico, ou seja, é alimentado pelos gases que gera. Desta forma, apesar do alto custo da máquina de torrefação, a rota 3 pode ser economicamente vantajosa a depender da distância a ser percorrida e das condições climáticas. A rota 3 é tanto mais viável economicamente quanto maiores a distância entre a planta termoelétrica e a planta de conversão e mais quente e seco for o clima.

A briquetagem, da forma utilizada na rota de produção número 2, é um processo que quando usado em conjunto com os modais ferroviário e rodoviário não é vantajoso, pois o aumento da massa específica proporcionado não diminui os custos de transporte. Conseqüentemente, a rota 2 se mostrou desvantajosa em todas as condições avaliadas. Entretanto, esse processo é necessário na rota 3 para complementar a torrefação.

A rota de produção número 1 se mostrou vantajosa nas condições em que os benefícios proporcionados pela rota 3 não são capazes de compensar o alto custo inicial demandado.

As fontes renováveis de energia estão se tornando cada vez mais demandadas devido às recentes mudanças climáticas que são consequência do efeito estufa causado pelos combustíveis fósseis. Os processos de conversão analisados podem contribuir para aumentar o uso da biomassa, tornando-a mais rentável e eficiente.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Entre as sugestões para trabalhos futuros baseados neste estão a inclusão na análise de:

- Modal hidroviário;
- Outras biomassas;
- Outras rotas de produção como, por exemplo, uma que considere apenas a secagem ao ar ou com cobertura.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF, 2011. Anuário estatístico ano base 2010, ABRAF. Brasília.
- ABRAF. Anuário Estatístico-Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico ABRAF, p. 146, 2013.
- ACI. Disponível em: < <http://www.acinh.com.br/servicos/cotacao-dolar>>. Acessado em 10/5/2017.
- ALAKANGAS, E., PAJU, P. 2002. Wood pellets in Finland—technology, economy, and market. OPET Report, Finland. <[www.tekes.fi/opet/pdf/OPET\\_report5\\_june2002.pdf](http://www.tekes.fi/opet/pdf/OPET_report5_june2002.pdf)> (accessed 08. 28. 06).
- ALMEIDA, C.D.M. Aproveitamento energético da biomassa eucalyptus a partir da gaseificação para utilização na geração de energia. 2014.
- AMOS, W. A. Report on Biomass Drying Technology Report on Biomass Drying Technology. SAE Transactions, v. 106, n. November, p. 475–485, 1998. Disponível em: <<http://www.p2pays.org/ref/22/21209.pdf>>. .
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: 2012.
- ANTF. Disponível em < <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>>. Acessado em 10/19/2018.
- ANTT, 2010. Disponível em <http://appweb2.antt.gov.br/concessaofer/concessionariasfer.asp>. Acessado em 14/06/2018.
- ARAÚJO, M. P. S.; BANDEIRA, R. A. M.; CAMPOS, V. B. G. Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas [Costs and freights charged in road cargo transportation: a comparative analysis between owner operators and companies]. Journal of Transport Literature, v. 8, n. 4, p. 187–226, 2014.
- ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSO, J., PLAZA, M.G., RUBIERA, F., PIS, J.J. 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. Fuel Processing Technology, 89(2), 169-175.
- AROLA, R. A. 1976 - Wood Fuels - How do they stack up? Forest Products Research Society, November 15-17, Atlanta, Georgia, 12 p.
- BACH, Q. V.; SKREIBERG, O. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 665–677, 2016.

BACHA C.J.C (Professor da Esalq/USP e pesquisador do CEPEA). Disponível em <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinia0-cepea/os-mercados-de-produtos-florestais-no-brasil.aspx>. Acessado em 02/12/2017. Publicado em 27/03/2017.

BADGER, P.C., FRANSHAM, P. Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs—a preliminary assessment. *Biomass Bioenergy* 30 (4), 321–325, 2006.

BAI, Y., HWANG, T., KANG, S., OUYANG, Y. Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion. *Trans. Res. Part B: Methodological* 45 (1), 162–175, 2011.

BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível Análise química e imediata da madeira e da casca. São Paulo, 1978. p. 63-70.

BATES, R. B., GHONIEM, A. F. Biomass Torrefaction: Modeling of Reaction Thermochemistry. *Bioresource Technology*, 134 331-340, 2013.

BARMA, M. C.; SAIDUR, R.; RAHMAN, S. M. A.; et al. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, n. May, p. 970–983, 2017. Elsevier Ltd.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. 2005. Food powders: physical properties, processing, and functionality. Kluwer Academic/Plenum publishers, New York.

BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. 2013.

BERGMAN, P.C.A., BOERSMA, A.R., KIEL, J.H.A., PRINS, M.J., PTASINSKI, K.J., JANSSEN, F.J.J.G., 2005a. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. Energy Research Centre of The Netherlands, ECN Report ECN-C-05-067.

BERGMAN, P.C.A., BOERSMA, A.R., ZWART, R.W.R., KIEL, J.H.A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. BIOCOAL. Project no. 2020-02-12-14-001, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), ECN Biomass, Utrecht, NL.

BERGMAN, P.C.A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. Project no. 2020-02-12-14-001, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), ECN Biomass, Utrecht, NL.

BERGMAN, P.C.A., BOERSMA, A.R., ZWART, R.W.R., KIEL, J.H.A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. BIOCOAL. Project no. 2020-02-12-14-001, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), ECN Biomass, Utrecht, NL.

BERGMAN P.C.A., KIEL J.H.A., 2005: Torrefaction for biomass upgrading. In Proceedings of the 14th European Biomass Conference & Exhibition in Paris, France, ISBN 88-89407-07-7, pp206-209, ETA-Renewable Energies, Italy.

BERGMAN, P.C.A., KIEL, J.H.A. 2005b. Torrefaction for biomass upgrading. In: European

biomass conference, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), ECN Biomass. Paris, France.

BERGMAN, P.C.A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. Project no. 2020-02-12-14-001, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), ECN Biomass, Utrecht, NL.

BERGMAN, P. C. A.; VERINGA, H. J. Combined torrefaction and pelletisation. Analysis, , n. July, p. 29, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications>>.

BERGMANN Patrik C.A., BOERSMA Arjen R., KIEL Jacob H.A., 2007: Torrefaction for biomass conversion into solid fuel. In Proceedings of the 15th European Biomass Conference & Exhibition in Berlin, Germany, ISBN 978-88-89407-59-X, ISBN 3-936338-21-3, pp78-82, ETA-Renewable Energies, Florence, Italy

BERGSTRÖM, D., ISRAELSSON, S., ÖHMAN, M., DAHLQVIST, S.-A., GREF, R., BOMAN, C., WÄSTERLUND, I. 2008. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. Fuel Processing Technology, 89(12), 1324-1329.

BIOMASS MAGAZINE. 2014. Disponível em <<http://biomassmagazine.com/articles/10263/epa-lists-efficiencies-of-qualified-outdoor-boilers>>. Acesso em 16/5/18. Publicado dia 10/04/2014.

BIJOY, T. Preços da secagem e torrefação fornecidos pelo vice-presidente da Earthcare [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[brunoss701@gmail.com](mailto:brunoss701@gmail.com)> em 30/01/2017.

BN MUNICÍPIOS, 2017. Disponível em <http://www.bahianoticias.com.br/municipios/noticia/8197-preco-medio-da-gasolina-diesel-e-etanol-atinge-maior-valor-em-um-ano.html>. Acessado em 14/06/2017.

BORGES, A.C.P., ALVES, C.T., TORRES, E.A., 2015. “Caracterização Energética do Cavaco de Eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito”, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brazil.

BELL R.A. de O. Demanda de lenha para secagem de grãos no Estado do Paraná 2012:153.

BERENBAUM, R., BRODIE, I. 1959. Measurement of the tensile strength of brittle materials. British Journal of Applied Physics, 10, 281-287.

BITRE. 2017. Available at <[https://bitre.gov.au/publications/2017/files/is\\_090.pdf](https://bitre.gov.au/publications/2017/files/is_090.pdf)>. Department of Infrastructure and Regional Development Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE) GPO Box 501, Canberra ACT 2601, Australia.

BROESE VAN GROENOU, A. 1981. Compaction of ceramic powders. Powder Technology, 28(2), 221-228.

BUTLER, J.L., MCCOLLY, H.F. 1959. Factors affecting the pelleting of hay. Agricultural Engineering, 40 (8), 442-446.

CAO L., YUAN X., LI H., LI C., XIAO Z., JIANG L., et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresour Technol* 2015;185:254–62. doi:10.1016/j.biortech.2015.02.045.

CBO, 2006. Freight rail transportation: Long-term issues. Congress of the United States, Congressional Budget Office (CBO). Disponível em [www.cbo.gov/doc.cfm?index=7021](http://www.cbo.gov/doc.cfm?index=7021). Acessado dia 01/04/2016.

CELULOSE ONLINE, 2014. Available at <<http://celuloseonline.com.br/com-investimento-de-r-650-milhoes-ba-ganhara-termeletrica-com-biomassa-de-eucalipto/>>, Accessed in 07/06/2016.

COUHERT, C., SALVADOR, S., COMMANDRÉ, J.M. 2009. Impact of torrefaction on syngas production from wood. *Fuel*, 88(11), 2286-2290.

CHEN, W., KUO, P. Torrefaction and Co-Torrefaction Characterization of Hemicellulose, Cellulose and Lignin as Well as Torrefaction of Some Basic Constituents in Biomass. *Energy*, 36, 803-811, 2011.

CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 847–866, 2015. Elsevier.

CHEN, C., FAN, Y. Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Trans. Res. Part E: Logis. Trans. Rev.* 48 (1), 150–164, 2012.

CHIN, O. C.; SIDDIQUI, K. M. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy*, v. 18, n. 3, p. 223–228, 2000.

CLARKE, S.; ENG, P.; PRETO, F. Biomass Densification for Energy Production. Factsheet, , n. 11, p. 1–8, 2011.

CMA. 2015. Available at <<http://www.cmaindia.org/mc-admin/assets/images/listfiles/mc-list2122029517.pdf>>. Freight Rates Effective from 01/04/2015. Accessed at 02/08/2018.

COOPER, A.R., EATON, L.E. 1962. Compaction behavior of several ceramic powders. *Journal of the American Ceramic Society*, 45(3), 97-101.

CPRM. Available at <<http://www.cprm.gov.br>>. Accessed in 06/13/2017.

CREMONEZ V.G., ESTUFA SOLAR PARA SECAGEM DE MADEIRA SERRADA: Uso de placas planas fotovoltaicas. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2016.

CUNDIFF, J.S., DIAS, N., SHERALI, H.D. A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. *Bioresour Technol.* 59 (1), 47–55, 1997.

DE FARO, C.. Elementos de Engenharia Econômica. São Paulo: Atlas, 1979.

DECC. Desk-based review of performance and installation practices of biomass boilers. , p. 83, 2014. Disponível em:

<[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/376805/Review\\_of\\_biomass\\_performance\\_standards.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/376805/Review_of_biomass_performance_standards.pdf)>. .

DENIG, J.; WENGERT, E. M.; SIMPSON, W. T. Drying Hardwood Lumber, General Technical Report FPL-GTR-118. Forest Product Laboratory, p. 144, 2000.

DI BLASI, C.; LANZETTA, M. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 40–41, p. 287–303, 1997.

DOBIE, J.B. 1959. Engineering appraisal of hay pelleting. Agricultural Engineering, 40(2), 76-72.

DI GIACOMO, G., TAGLIERI, L. 2009. Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets. Energy, 34(5), 724-731.

DHUNGANA A. Torrefaction of biomass. Submitt Partial Fulfilment Requir Degree Master Appl Sci 2011:173. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

DOW, 2016. Disponível em

<http://www.dow.com/brasil/sustentabilidade/parcerias/biomassa.htm>. Acessado em 06/13/2016.

DZURENDA, L.; BANSKI, A. Dependence of the boiler flue gas losses on humidity of wood biomass. Archives of Thermodynamics, v. 36, n. 4, p. 77–86, 2015.

EKBOM T., "Teknikstatus och konkurrenskraft med torrefiering," 2013.

EKSIOGLU, S.D., ACHARYA, A., LEICHTLEY, L.E., ARORA, S. Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. Comput. Ind. Eng. 57 (4), 1342–1352, 2009.

ELUSTONDO D.M., OLIVEIRA L. Model To Assess Energy Consumption IN INDUSTRIAL LUMBER KILNS. Maderas Cienc y Tecnol 2009;11:33–46. doi:10.4067/S0718-221X2009000100003.

ERUMBAN A.A. Lifetimes of machinery and equipment: Evidence from Dutch manufacturing. Rev Income Wealth 2008;54:237–68. doi:10.1111/j.1475-4991.2008.00272.x.

ESTEBAN L., MEDIAVILLA I., FERNANDEZ M., CARRASCO J., 2006: Influence of the size reduction of pine logging residues on the pelleting process and on the physical properties of pellets obtained. In Proceedings of the 2nd World Conference on Pellets in Jönköping, Sweden, ISBN 91-631-8961-5, pp19-23, Swedish Bioenergy Association, Stockholm, Sweden.

FABORODE, M.O., O'CALLAGHAN, J.R. 1987. Optimizing the compression/briquetting of fibrous agricultural materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 38(4), 245-262.

FAO. 2001. State of the world's forests-2001, Rome, Italy. <[www.fao.org](http://www.fao.org)> (accessed 02.01.17).

FELFLI, F.F., LUENGO, C.A., SUÁREZ, J.A., BEATÓN, P.A. 2005. Wood briquette torrefaction. *Energy for Sustainable Development*, 3, 19-22.

FOELKEL C. Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. *Eucalyptus Online B* 2016:239.

FRANKE, M., REY, A. 2006. Pelleting quality. *World Grain*, 78–79.

FURTADO, M. D. C. Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido, 2010.

FXTOP. Disponível em <http://fxtop.com/pt/calculadora-de-inflacao.php>. Acessado em 10/10/2017.

FXTOP. Disponível em <http://fxtop.com/pt/calculadora-de-inflacao.php>. Acessado em 01/07/2018.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GARDBRO, G. Techno-economic modeling of the supply chain for torrefied biomass. , p. 44, 2014.

GEBREEGZIABHER T, OYEDUN AO, HUI CW. Optimum biomass drying for combustion - A modeling approach. *Energy* 2013;53:67–73. doi:10.1016/j.energy.2013.03.004.

GEISLHOFER A. et al., 2000: Holzpellets in Europa, *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*“, no. 9 (2000), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Vienna, Austria. CPM, 2001: Weit entwickelte Technologie zur Herstellung von Holzpellets steht bereit. In *Holz-Zentralblatt*, no. 147 (2001), p1885, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. KG, Leinfelden-Echterdingern, Germany. EDER Gottfried, 2003: Wirtschaftliche und technische Möglichkeiten für die Herstellung und Nutzung einer neuen Generation von Biomassepellets, Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Wieselburg, Austria.

GHIASI, B.; KUMAR, L.; FURUBAYASHI, T.; et al. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification? *Applied Energy*, v. 134, p. 133–142, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.076>>. .

GOLECHA, R., GAN, J., 2015. “Biomass transport cost from field to conversion facility when biomass yield density and road network vary with transport radius”. *Applied Energy*.

GLOBAL WOOD. Disponível em <http://globalwood.com.br/ficha-tecnica-madeira-de-eucalipto/>. Acessado em 10/01/2017.

GOMES, B.; MENELAU, D. E. S. Á. Infraestrutura do Transporte Brasileiro : Impactos Sobre o Setor Produtivo , Com Ênfase nos Modais Rodoviário e Ferroviário Infraestrutura do Transporte : Impactos Sobre o Setor Produtivo , Com Ênfase nos Modais Rodoviário e Ferroviário. , 2012.

GONZALES, D.; SEARCY, E. M.; EKŞIOĞLU, S. D. Cost analysis for high-volume and long-haul transportation of densified biomass feedstock. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 49, p. 48–61, 2013.

GOOD, J.; DELCARTE, J.; SCHENKEL, Y. Determination of the Efficiencies of Automatic Biomass Combustion Plants. Evaluation of Different Methods for Efficiency Determination and Comparison of Efficiency and Emissions for Different Operation Modes. Final Report. IEA Bioenergy Network, , n. November, p. 1–33, 2006.

GOOGLE. Disponível em <https://play.google.com/store/apps/details?id=avani.calcularfrete>. Acessado em 15/10/2018 a.

GOOGLE. Disponível em <https://play.google.com/store/apps/details?id=br.com.mundonewsonline.calcularfrete>. Acessado em 15/10/2018 b.

GRANADA, E., LOPEZ G., L.M., MÍGUEZ, J.L., MORAN, J. 2002a. Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy*, 27(4), 561-573.

GRAY, W.A. 1968. Compaction after deposition. In: *the packing of solid particles*. New York, NY, Marcel Dekker, Inc., pp. 89-107.

GRISOTTO, R. Época. Disponível em <http://epocanegocios.globo.com/Economia/noticia/2017/05/o-credito-de-carbono-sera-nova-commodity-do-brasil.html>. Acessado em 04/01/2018. Publicado em 15/05/2017.

GHEBRE-SELLASSIE, I. 1989. Mechanism of pellet formation and growth. *Pharmaceutical pelletization technology*, 123-143.

GUIALOG. 2017. Disponível em <http://www.guialog.com.br/medidas.htm>>. Acesso em 15/7/17.

HAHN, B., 2004. “Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel Pellets”, UMBERA: Pellets for Europe.

HANSEN, M. T.; JEIN, A. R. *English Handbook for Wood Pellet Combustion English Handbook for Wood Pellet Combustion*. , p. 1–86, 2009.

HASTING, W.H., VERNON, M., HIGGS, W.D. 1978. Feed milling processes. in: *FAO/UNDP*

Training course in fish feed technology. Seattle, Washington.

HAUSMANN, F. 1967. Briquetting wood waste by the Fred Hausmann method. in: Proceedings of 14th biennial briquetting conference. Cape Cod, MA, pp. 75.

HEFFNER, L.E., PFOST, H.B. 1973. Gelatinization during pelleting. *Feedstuffs*, 45, 23-32.

HILL, B., PULKINEN, D.A. 1988. A study of the factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets. A special report, Saskatchewan Dehydrators Association, Tisdale, SK, Canada, 25.

HOLM, J.K., HENRIKSEN, U.B., HUSTAD, J.E., SORENSENS, L.H. 2006. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy Fuels*, 20(6), 2686-2694.

HOLM, J.K., HENRIKSEN, U.B., WAND, K., HUSTAD, J.E., POSSELTS, D. 2007. Experimental verification of novel pellet model using a single pelleter unit. *Energy Fuels*, 21(4), 2446-2449.

HUANG, Y., CHEN, C.W., FAN, Y. Multistage optimization of the supply chains of biofuels. *Trans. Res. Part E: Logis. Trans. Rev.* 46 (6), 820–830, 2010.

IEA. 2009. CO2 emission from fuel combustion 2009 - Highlights, International Energy Agency, Paris, France.

<[http://www.iea.org/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=2143](http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2143)> (acessado em 11.01.20017).

INMET. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em 08/15/2017.

ILELEJI, K.E., SOKHANSANJI, S., CUNDIFF, J.S. Biofuels from agricultural wastes and byproducts. In: *Farm-Gate to Plant-Gate Delivery of Lignocellulosic Feedstocks from Plant Biomass for Biofuel Production*. Wiley-Blackwell, pp. 117–160 (Chapter 7), 2010.

ILOS. 2017. Disponível em <http://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em 13/7/18. Postado dia 08/11/2017).

JELEZOV, E. B. Chart design and analysis of the railway freight tariff rates. *International Journal of Transport Economics / Rivista internazionale di economia dei trasporti*. Vol. 32, No. 2005.

KIEL, J. H. A. BO 2 -technology for biomass upgrading into solid fuel – pilot-scale testing and market implementation. Presented at: 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain, , n. June, p. 2–6, 2008.

KIM, J., REALFF, M.J., LEE, J.H., WHITTAKER, C., FURTNER, L. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass Bioenergy* 35 (2), 853–871,

2011.

KÖSER, H.J.K., SCHMALSTIEG, G., SIEMERS, W. 1982. Densification of water hyacinth—basic data. *Fuel*, 61(9), 791-798.

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. Status overview of torrefaction technologies. 2012.

KUTNAR, A.; WIDMANN, R.; KAMKE, F. A. Density , Mechanical Properties , and Morphology of Densified Wood in Relation to Compression Temperature and Steam Environments. , p. 167–174, 2012.

JAMES, J. J. Preços da torrefação fornecidos pelo presidente da Agri-Tech [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <brunoss701@gmail.com> em 11/08/2016.

JUDD, J.S., SUBHASH, C., CUNDIFF, J.S. Cost Analysis of a Biomass Logistics System. ASABE Meeting Presentation, 2011.

JUNIOR A.M.C.J. Desenvolvimento experimental de um reator em batelada para torrefação de biomassa. Universidade Federal da Bahia, 2015.

LAURENZI T. Disponível em <https://www.delmhorst.com/blog/bid/364351/what-is-equilibrium-moisture-content-and-why-is-it-important>. Publicado em 29/06/2018. Acessado em 18/01/2018.

LEHTIKANGAS, P. 1999. Quality properties of fuel pellets from forest biomass, Ph.D. dissertation, The Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.

LEHTIKANGAS, P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351-360.

LENSELINK J., GERHAUSER H., KIEL J.H.A., 2008: BO2-technology for combined torrefaction and densification. In Proceedings of the World Sustainable Energy Days 2008, O.Ö. Energiesparverband, Linz, Austria.

LI, J. Volumetric combustion of torrefied biomass for large percentage biomass co-firing up to 100 % fuel switch Jun Li. 2014.

LI, Y., LIU, H. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177-186.

LIPINSKY, E.S., ARCATE, J.R., REED, T.B. 2002. Enhanced wood fuels via torrefaction. *Fuel Chemistry Division Preprints*, 47(1).

LIU, H.; LI, Y. Compacting biomass and municipal solid wastes to form an upgraded fuel, Final Technical Report; OSTI ID: 837464; University of Missouri-Columbia: Columbia, MO, 2000. <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/11/ProjectReport2MDNR->

Lin.pdf?sequence=1 (accessed Jan. 22, 2017).

LOO, S. VAN; KOPPEJAN, J. The Handbook of Biomass Combustion and Co - firing. 2015.

LOPES, R.P. Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar. Universidade Federal De viçosa, 2002, 200p. tese (doutorado em engenharia Agrícola).

LORA, E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. do. Geração Termelétrica. 2004.

MACBAIN, R. 1984. Pelleting animal feed. American Feed Manufacturer's Association, Arlington, Virginia.

MACBAIN, R. 1984. Pelleting animal feed. American Feed Manufacturer's Association, Arlington, Virginia.

MANI, S., TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S. 2003. An overview of compaction of biomass grinds. Powder Handling and Processing, 15(3), 160-168.

MANI, S., TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S. 2004b. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy, 27(4), 339-352.

MANI, S., TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass & Bioenergy, 30(7), 648-654.

MANI, S., TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S. 2004a. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. Canadian Biosystems Engineering, 46(3), 3.55-3.61.

MANI, S., TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S., 2006. Specific energy requirement for compacting corn stover. Bioresour. Technol. 97 (12), 1420e1426. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.06.019>.

MAPLESOFT. 2018. Disponível em <https://www.maplesoft.com/support/help/maple/view.aspx?path=applications%2FBivariatePolynomialRegression>. Acessado em 01/08/2018.

MARUTZKY, R. and SEEGER, K. (1999) Energie aus Holz und anderer Biomasse, DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echtlingen, Germany.

MANZONE, M.; BALSARI, P., 2013. "The energy consumption and economic costs of different vehicles used in transporting woodchips". Fuel.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; RAHN, S. Effect of torrefaction on water vapor adsorption properties and resistance to microbial degradation of corn stover. Energy and Fuels, v. 26, n. 4, p. 2386–2393, 2012.

MELE, F.D., GUILLE'N-GOSA' IBEZ, G., JIMENEZ, L. Optimal planning of supply chains for bioethanol and sugar production with economic and environmental concerns. *Comput. Aided. Chem. Eng.* 26, 997–1002, 2009.

MENDES, A.S. Utilização de coletor solar parabólico na secagem de madeira. 1985. 104f. Dissertation (Master in florestal engineering) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1985.

MIAO, Z., GRIFT, T.E., HANSEN, A.C., TING, K.C., 2013. “An overview of lignocellulosic biomass feedstock harvest, processing and supply for biofuel production (invited editorial policy)”. *Biofuels* 4 (1), 5–8.

MIAO, Z., SHASTRI, Y.N., GRIFT, T.E., HANSEN, A.C., TING, K.C., 2012. “Lignocellulosic biomass feedstock transportation alternatives, logistics, equipment configuration and modeling”. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* 6, 351–362.

MICHEL, J.-B.; MCCORMICK, M. Experimental investigation of continuous torrefaction conditions of biomass residues for the subsequent use of torrefied pellets in domestic and district heating systems. 10th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, , n. March, p. 1–22, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. 2010. Disponível em <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 05/02/2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. 2015. Disponível em <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 05/02/2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. 2018. Disponível em <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 05/11/2018.

MIRANDA, M. T.; ARRANZ, J. I.; ROJAS, S.; MONTERO, I. Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, v. 88, n. 11, p. 2106–2112, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.015>>. .

MILES, T.R., MILES JR, T.R. 1980. Densification systems for agricultural residues. In: *Thermal conversion of solid wastes and biomass*. American Chemical Society. Washington DC, pp. 179-191.

MILLARD, D.J. 1959. Relationship between strength and porosity for coal compacts. *British Journal of Applied Physics*, 10, 287-290.

M.J. PRINS, K.J. PTASINSKI, F.J. JANSSEN, *Energy* 31 (2006) 3458–3470.

MOHSENIN, N., ZASKE, J. 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21(2), 193-205.

MUNDO EDUCAÇÃO, 2018. Disponível em <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/o-territorio-brasileiro-sua-extensao.htm>. Acessado em 19/08/2018.

NATURAL RESOURCES CANADA. Disponível em <https://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/transportation/21024>. Acessado em 10/08/2018. Editado em 04/09/2018.

NÁSNER, A. M. L.; LORA, E. E. S.; PALACIO, J. C. E.; et al. Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability. *Waste Management*, v. 69, p. 187–201, 2017.

NDIEMA, C.K.W., MANGA, P.N., RUTTOH, C.R. 2002. Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. *Energy Conversion and Management*, 43(16), 2157-2161.

NEXO JORNAL. 2018. Disponível em <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2018/05/30/Um-panorama-do-transporte-hidrovi%C3%A1rio-no-pa%C3%ADs.-E-por-que-n%C3%A3o-deslanchou>. Acesso em 16/8/18. Publicado dia 30/05/2018.

NELSEN, J.L., DUTTLINGER, A.W., FAHRENHOLZ, A.C., BEHNKE, K.C. 2008. Effect of crude glycerol on pellet mill production and nursery pig growth performance. *Journal of Animal Science*, 86, 2228–2236.

NHUCHHEN, D.,R., BASU, P., ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, ID 506376, DOI: 10.5171/2014.506376, 2014.

NIMLOS, M.N., LOOKER, E., EVANS, R.J. 2003. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer, Vol. 48, American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry Preprints, pp. 590.

NOCQUET, T.; DUPONT, C.; COMMANDRE, J. M.; et al. Volatile species release during torrefaction of wood and its macromolecular constituents: Part 1 - Experimental study. *Energy*, v. 72, p. 180–187, 2014a. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.061>. .

NOCQUET, T.; DUPONT, C.; COMMANDRE, J. M.; et al. Volatile species release during torrefaction of biomass and its macromolecular constituents: Part 2 - Modeling study. *Energy*, v. 72, p. 188–194, 2014b.

NTC. Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas. , p. 1–56, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. The pellet handbook: The production and thermal utilisation of

biomass pellets. 2010.

OBERNBERGER, I., THEK, G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669.

OF, P. M.; DIE, P. L. Energy Requirements for Dehydrating and Pelleting Coastal Bermudagrass. , p. 349–352, 1964.

OLLET, A.L., KIRBY, A.R., PARKER, R., SMITH, A.C. 1993. A comparative study of the effects of water content on the compaction behaviour of some food materials. *Powder Technology*, 75(1), 59-65.

ORTH, H.W., LÖWE, R. 1977. Influence of temperature on wafering in a continuous extrusion process. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(3), 283-289.

OUIWENS, C.D., KÜPERS, G. 2003. Lowering the Cost of Large-Scale, Biomass Based Production of Fischer-Tropsch Liquids. 2003. Jyväskylä, Finland: Eindhoven University of Technology.

PAPAPOSTOLOU, C., KONDILI, E., KALDELLIS, J.K. Development and implementation of an optimization model for biofuels supply chain. *Energy* 36 (10), 6019–6026, 2011.

PARKER, N., TITTMANN, P., HART, Q., NELSON, R., SKOG, K., SCHMIDT, EDWARD, A.G., JENKINS, B. Development of a biorefinery optimized biofuel supply curve for the Western United States. *Biomass Bioenergy* 34 (11), 1597–1607, 2010.

PAKISTAN RAILWAYS. Available at <<https://www.pakrail.gov.pk/FreightRates.aspx>>. Accessed at 01/08/2018.

PAYNE, J.D. 1978. Improving quality of pellets feeds. *Milling Feed and Fertiliser*, 162(5), 34-41.

PENG, J. H.; BI, H. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy and Fuels*, v. 27, n. 2, p. 967–974, 2013.

PERLACK, R.D., WRIGHT, L.L., TURHOLLOW, A.F., GRAHAM, R.L., STOKES, B.J., ERBACH, D.C. 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. Oak Ridge National Lab, Tennessee.

PERSSON, K., OLOFSSON, I., NORDIN, A. 2007. Biomass Refinement by Torrefaction, Energy Technology and Thermal Process Chemistry, Umeå University. Umeå, Sweden.

PHANPHANICH, M. Pelleting Characteristics of Torrefied Forest Biomass. Master thesis in the The University of Georgia. Athens, Georgia 2010.

PIMCHUAI, A., DUTTA, A., BASU, P., 2009. Torrefaction of agriculture residue to enhance

combustible properties 8th world conference in Chemical Engineering, Montreal, paper 1815.

PIETSCH, W. 1991. Size enlargement by agglomeration. John Wiley & Sons.

PIZZI, A., MITTAL, K.L. 2003. Handbook of adhesive technology, Marcel Dekker Inc New York.

PORTAL TRIBUTÁRIO. Disponível em <http://www.portaltributario.com.br/>. Acessado em 10/02/2017.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS. Available at [http://www.precodoscombustiveis.com.br/postos/cidade/1832/ba/alagoinhas%20\(central%20posto\)](http://www.precodoscombustiveis.com.br/postos/cidade/1832/ba/alagoinhas%20(central%20posto)). Accessed in 20/06/2018.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 77, n. 1, p. 28–34, 2006.

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*, vol 77, 35-40, 2006.

PYLE, O, Ky A. Process for producing solid industrial fuel, United States Patent, 3938965; 1976.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. DO; ANDRADE, A. P. A. DE; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. D. S. Poder Calorífico Da Madeira E De Materiais Ligno-Celulósicos. *Revista da Madeira*, v. 89, p. 100–106, 2005.

RAILCARGO. Available at <<http://www.railcargo.hu/en/infothek/tariffs>>. Accessed in 03/08/2018.

REVISTA DA MADEIRA. Potencial energético da biomassa eucalipto. Disponível em <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1727&subject=E%20mais&title=Potencial%20energ%20E9tico%20da%20madeira%20de%20eucalipto](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1727&subject=E%20mais&title=Potencial%20energ%20E9tico%20da%20madeira%20de%20eucalipto)> Acesso em 01 de Abr. 2016. Publicado em outubro de 2013.

REED, T.B. 2002. Process and apparatus for making a densified torrefied fuel. In: US patent no. 2003/0221363 A1.

REED, T., BYRANT, B. 1978. Densified biomass: a new form of solid fuel. SERI-35, Solar Energy Research Institution, Golden, CO.

REED, T.B., TREZEK, G., DIAZ, L. 1980. Biomass densification energy requirements. In: *Thermal conversion of solid wastes and biomass*. American Chemistry Society. Washington DC. pp. 169-177.

REPELLIN, V., GOVIN, A., ROLLAND, M., GUYONNET, R. 2010. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 923-930.

ROCHEDO, P. R. R.; COSTA, I. V. L.; IMPÉRIO, M.; et al. Carbon capture potential and costs in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 280–295, 2016.

ROGERS, J.G., BRAMMER, J.G. Analysis of transport costs for energy crops for use in biomass pyrolysis plant networks. *Biomass Bioenergy* 33 (10), 1367–1375, 2009.

ROUSSET, P., MACEDO, L., COMMANDRE, J.,M., MOREIRA, A. Biomass Torrefaction under Different Oxygen Concentrations and Its Effect on the Composition of the Solid By-Products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol 96, 86-91, 2012.

ROSENDAHL, L. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. 2013.

RUDNICK, A., HUNTER, A.R., HOLDEN, F.C. 1963. An analysis of the diametral-compression test. *Material Research & Standards*, 3, 283-289.

RUMPF, H. 1962. The strength of granules and agglomerates. In: *Agglomeration*, (Ed.) Knepper WA, John Wiley. New York, pp. 379–418.

SAMANIEGO, M. R. P., YADAMA V., PEREZ, M. G., LOWELL, E., MCDONALD A. G. Effect of temperature during wood torrefaction on the formation of lignin liquid intermediates. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 109, p. 222–233, 2014.

SCHORR, C.; MUINONEN, M.; NURMINEN, F. Torrefaction of biomass. Mikkeli, Finland: Miktech Ltd/Centre of Expertise-programme; p. 55, 2012.

SHAW, M.D. 2008. Feedstock and process variables influencing biomass densification, MS. dissertation, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan.

SHEPPERSON, G., MARCHANT, W.T.B. 1978. Production of grass and alfalfa cubes using an experimental ring die press. In: *Proceedings 2nd International Green Crop Drying Conference*. Saskatoon, SK, pp. 264–270.

SHOTTON, E., RIDGWAY, K. 1974. *Physical pharmaceuticals*. Clarendon Press.

SINGH, S. Preços da briquetagem fornecidos pelo diretor da Lehra [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <brunoss701@gmail.com> em 26/6/2016.

SITKEL, G. 1986. *Mechanics of agricultural materials*. Elsevier Science Publisher Co. Inc., New York.

SILVA A. G.; Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido. UFBA, 2013.

SILVA. F.T.F., 2017. “Avaliação Da Torrefação E Densificação De Resíduos Agrícolas No Brasil”. Master dissertation. UFRJ. 2017.

SIMPSON, W. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber*, v. 5, n. 1, p. 41–49, 1973. Disponível em: <<http://www.bcin.ca/Interface/openbcin.cgi?submit=submit&Chinkey=52402>>. .

SIMPSON, W. Sorption Theories Applied To Wood. *Wood and Fiber*, v. 12, n. 3, p. 183–195, 1980.

Simpson, W. T., Tschernitz, J. L. Fuller J. J. *Air Drying of Lumber*. United States Department Agriculture (USDA). 1999.

SOKHANSANJ, S., MANI, S., BI, X., ZAINI, P., TABIL, L. 2005. Binderless pelletization of biomass. In: ASAE paper no. 056061, ASABE. St. Joseph, MI.

SOKHANSANJ, S., MANI, S., TURHOLLOW, A., KUMAR, A., BRANSBY, D., LYND, L., LASER, M. Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) – current technology and envisioning a mature technology. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* 3 (12), 124–141, 2009.

SKYBA, O.; SCHWARZE, F.; NIEMZ, P. Physical and Mechanical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (Thm) - Densified Wood. *Wood Research*, v. 54, n. 2, p. 1–18, 2009.

SMITH, W.B., VISSAGE, J.S., DARR, D.R., SHEFFIELD, R.M. 2001. Forest resources of the United States, 1997. USDA Forest Service North Central Research Station.

SMITH, I.E., PROBERT, S.D., STOKES, R.E., HANSFORD, R.J. 1977. The briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(2), 105-111.

SOKHANSANJ, S., MANI, S., BI, X., ZAINI, P., TABIL, L. 2005. Binderless pelletization of biomass. In: ASAE paper no. 056061, ASABE. St. Joseph, MI.

SOKHANSANJ, S., MANI, S., BI, X., ZAINI, P., TABIL, L. 2005. Binderless pelletization of biomass. In: ASAE paper no. 056061, ASABE. St. Joseph, MI.

SOKHANSANJ, S., FENTON, J., 2006. Cost Benefit of Biomass Supply and Pre-processing. BIOCAP Canada Foundation.

SOUZA, V.S. Entrevista com o gerente de planejamento florestal da empresa ERB (Energias renováveis do Brasil) no dia 29/06/2018.

SRIVASTAVA, A.C., BILANSKI, W.K., GRAHAM, V.A. 1981. Feasibility of producing large-size hay wafers. *Canadian Agricultural Engineering*, 23(2), 109-112.

STELA, 2007: <http://stela.de>, retrieved [9.10.2007], STELA Laxhuber GmbH, Massing, Germany.

STRANDBERG, M., OLOFSSON, I., POMMER, L., WIKLUND-LINDSTRÖM, S., ÅBERG, K., NORDIN, A. Effects of temperature and residence time on continuous

torrefaction of spruce wood. *Fuel Processing Technology*, 134, 387–398, 2015.

SVAROVSKY, L. 1987. Powder testing guide: methods of measuring the physical properties of bulk powders. The British Materials Handling Board by Elsevier Applied Science, London and New York

SWISS COMBI, 2006: Oral notice and <http://www.swisscombi.ch>, retrieved [7.9.2006], SWISS COMBI W. Kunz dryTec AG, Dintikon, Switzerland.

TABIL, L., SOKHANSANJ, S. 1996a. Process conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(3), 345-350.

TABIL, L.G., SOKHANSANJ, S. 1996b. Compression and compaction behavior of alfalfa grinds - part 1: compression behavior. *Powder Handling & Processing*, 8(1), 17-23.

TARIFAS PEDÁGIO. Disponível em <http://www.abcr.org.br/TarifasPedágio/TarifaPedágio.aspx>. Acessado em 02/11/2016.

TESOURO NACIONAL. 2018. Disponível em [http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-precos-e-taxas-dos-titulos;%20Tesouro%20Prefixado%20com%20Juros%20Semestrais%202027%20\(NTNF\)\)](http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-precos-e-taxas-dos-titulos;%20Tesouro%20Prefixado%20com%20Juros%20Semestrais%202027%20(NTNF))). Acessado em 30/07/2018.

THEERARATTANANOON, K., XU, F., WILSON, J., BALLARD, R., MCKINNEY, L., STAGGENBORG, S., VADLANI, P., PEI, Z.J., WANG, D., 2011. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Ind. Crops Prod.* 33 (2), 325e332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014>.

THOMAS, M., VAN DER POEL, A.F.B. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science and Technology*, 61(1-4), 89-112.

THOMAS, M., VAN ZUILICHEM, D.J., VAN DER POEL, A.F.B. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 64(2-4), 173-192.

TORRES, E. A.; GALLO, W. L. R. . Exergetic Evaluation Of A Cogeneration System In A Petrochemical Complex. *Energy Conversion and Management*, Londres, v. 39, n.16-18, p. 1845-1852, 1998.

TRAN, K.Q.; LUO, X.; SEISENBAEVA, G.; JIRJIS, R.; Stump torrefaction for bioenergy application. *Appl. En.*, v. 112, p. 539–546, 2013.

TRUCKPAD. Disponível em <https://blog.truckpad.com.br/industria/carrocarias-mais-comuns-no-brasil/>. Acessado em 02/11/2017.

TURNER, R. 1995. Bottomline in feed processing: Achieving optimum pellet quality. *Feed Management*, 46, 30-33.

USE WOOD FUEL. 2018. Disponível em <<http://www.usewoodfuel.co.uk/guidance-for-biomass-users/planning-a-biomass-installation/understanding-efficiency/biomass-boiler-efficiency.aspx>>. Acessado em 17/04/2018.

UOL. 2017. Disponível em <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/>>. Acessado em 02/11/2017.

UOL. 2018. Disponível em <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/>>. Acessado em 16/05/2018.

USDA FOREST SERVICE., F. P. L. Wood handbook : wood as an engineering material. , 2010. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/37440>>. .

USLU, A.; FAAIJ, A. P. C.; BERGMAN, P. C. A. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Energy, v. 33, n. 8, p. 1206–1223, 2008.

VALADÃO, G. E. S., ARAUJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios I. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VAN DAALEN W., 2008: Torrifikationsbasierte BO<sub>2</sub>-Technologie zur Veredelung von Biomasse in leicht handelbare feste Biomasse. In Proceedings of the 8th Pellets Industry Forum in Stuttgart, Germany, pp123-132, Solar Promotion GmbH, Pforzheim, Germany.

VAN LOO S., KOPPEJAN J. (Ed.), 2008: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, ISBN 978-1-84407-249-1, Earthscan, London, UK.

VERMA M, LOHA C, SINHA AN, CHATTERJEE PK. Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. Renew Sustain Energy Rev 2017;71:732–41. doi:10.1016/j.rser.2016.12.101.

VERHOEFF F.; ARNUELOS AAI.; BOERSMA AR.; PELS JR.; LENSSELINK J.; KIEL JHA, et al. TorTech torrefaction technology for the production of solid bioenergy carriers from biomass and waste. (Report ECN-E–11-039). Netherlands: Energy Research Centre of the Netherlands; 2011.

WALSH, M. 2008. US cellulosic biomass feedstock supplies and distribution, M & E Biomass, University of Tennessee.

WENGERT, E.M. 1990. Drying oak lumber. Madison, WI: University of Wisconsin–Madison, Department of Forestry. 167 p.

WILD M., "The ratio behind torrefaction ," Graz, 2011.

WINOWISKI, T. 1985. Optimizing pelleting temperature. Feed Management, 36, 28–33.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H., ZHENG, C. 2007. Characteristics of hemicellulose,

cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.

YOU, F., WANG, B. Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed–centralized processing networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (17), 10102–10127, 2011.

YOU, F., TAO, L., GRAZIANO, D.J., SNYDER, S.W. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE J.* 58 (4), 1547–5905, 2012.

YU, Y.; JIANG, X.; RAMASWAMY, H. S.; ZHU, S.; LI, H. Effect of high-pressure densification on moisture sorption properties of Paulownia wood. *BioResources*, v. 13, n. 2, p. 2473–2486, 2018.

Z.C., B.; H.J., V.; D.M.J., S. The new method to characterize the gas emissions during torrefaction real-time. *Fuel Processing Technology*, v. 164, p. 24–32, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.04.009>>.

Z. HUSAIN, Z. ZAINAC, AND Z. ABDULLAH, “Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 22, pp. 505–509, 2002.

ZAMBONI, A., BEZZO, F., SHAH, N. Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. Multi-objective environmental optimization. *Energy Fuels* 23 (10), 5134–5143, 2009.

ZANZI, R., FERRO, D.T., TORRES, A., SOLER, P.B., BJÖRNBOM, E. 2004. Biomass torrefaction. In: 2nd world conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection. Rome, Italy, pp. 859–62.

ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora* logs. *BioResources*, v. 8, n. 4, p. 5159–5168, 2013.

ZHENG, A., ZHAO, Z., HUANG, Z., ZHAO, K., WEI, G., WANG, X., HE, F., LI, H. Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass Pretreated by Torrefaction with Varying Severity. *Energy&Fuels*, 28, 5804–5811, 2014.

**UFBA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA

CEP: 40.210-630

Telefone: (71) 3283-9800

E-mail: [pei@ufba.br](mailto:pei@ufba.br)

Home page: <http://www.pei.ufba.br>

