

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Bibiana Porto da Silva

**ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO₂ E CADEIA DE VALOR DO USO DE
BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL EM PEQUENAS
CALDEIRAS A VAPOR NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

Santa Maria, RS
2018

Bibiana Porto da Silva

**ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO₂ E CADEIA DE VALOR DO USO DE BIOMASSA
FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL EM PEQUENAS CALDEIRAS A VAPOR NA
REGIÃO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título **Mestre em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Santa Maria, RS
2018

Silva, Bibiana Porto da
ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO2 E CADEIA DE VALOR DO USO DE
BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL EM PEQUENAS
CALDEIRAS A VAPOR NA REGIÃO SUL DO BRASIL / Bibiana
Porto da Silva.- 2018.
93 p.; 30 cm

Orientador: Nattan Roberto Caetano
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2018

1. Lenha. 2. Balanço energético. 3. Fontes de
energia renováveis. I. Caetano, Nattan Roberto II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Bibiana Porto da Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: João Atilio Zampieri, nº 746 apto 203, Bairro: Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900
Fone: (55) 981488699; E-mail: bibiana.ea@gmail.com

Bibiana Porto da Silva

ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO₂ E CADEIA DE VALOR DO USO DE BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL EM PEQUENAS CALDEIRAS A VAPOR NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 19 de fevereiro de 2018:

Nattan Roberto Caetano, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Konstantinos Kyprianidis, por videoconferência, PhD (MDH)

Amir Antônio Martins Oliveira Júnior, PhD (UFSC)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, pois envolveu muitas pessoas importantes em minha vida. O meu agradecimento:

- A Deus, pela sua infinita bondade e generosidade em todos os momentos da minha vida.
- A minha família, que soube muitas vezes entender minhas horas de ausência, em especial minha mãe, meu irmão, minha avó, meu pai e meu namorado. Esses que sempre estiveram presentes ao meu lado para a concretização dos meus sonhos, me acalmando e me apoiando incondicionalmente.
- Ao professor Nattan, que nestes dois anos de mestrado se tornou um grande amigo e incentivador. Obrigado pela confiança, paciência, ensinamentos e experiências compartilhadas.
- A Instituição de Ensino Superior e seus coordenadores que aceitaram e apoiaram meu trabalho.
- Aos meus queridos amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos de grandes dificuldades, dúvidas e alegrias.
- A todos os professores que contribuíram na minha formação.
- Enfim, obrigada a todos que de uma maneira ou de outra me ajudaram nessa caminhada e permitiram que este sonho se tornasse hoje uma realidade.

RESUMO

ANÁLISE DA EMISSÃO DE CO₂ E CADEIA DE VALOR DO USO DE BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL EM PEQUENAS CALDEIRAS A VAPOR NA REGIÃO SUL DO BRASIL

AUTOR: Bibiana Porto da Silva
ORIENTADOR: Nattan Roberto Caetano

A lenha é uma importante fonte de energia por apresentar simples armazenamento, um custo relativamente baixo e sua exploração não requer processamento. Porém, a combustão incompleta de madeira produz diversos poluentes, dentre os quais estão presentes alguns combustíveis, como o monóxido de carbono e outros hidrocarbonetos, particulados e, também, espécies químicas que participam dos mecanismos de mudanças climáticas globais, como o dióxido de carbono e o vapor d'água. A caldeira é um sistema amplamente utilizada para a geração de energia, sendo também responsável por emissões de gases poluentes. Portanto, a otimização e a análise da viabilidade de implementação dos processos são de fundamental importância. Assim sendo, o principal objetivo desse trabalho é analisar o processo de geração de energia a partir da combustão de lenha em uma caldeira da guarnição de Santa Maria em termos de emissões, aproveitamento de energia e custos. A abordagem metodológica contempla um estudo de caso de caráter quantitativo com informações obtidas experimentalmente e pela literatura. Além disso, foi realizada uma análise das incertezas de medições experimentais associadas ao volume de lenha, temperatura e combustão incompleta. As emissões geradas totalizam 36,3 tCO_{2e}, sendo que o equivalente a 98,07% pode ser sequestrado pela árvore. Os custos referentes à caldeira são de 43.856 R\$/ano, dos quais 30% foi devido à aquisição de lenha. Os resultados obtidos mostram que o caso de recirculação dos gases de exaustão, para 20%, e o caso regenerativo apresentaram uma economia de 0,98% e 1,79%, respectivamente. De acordo com os parâmetros financeiros, o caso regenerativo foi considerado viável e o caso de recirculação mostrou-se viável a partir de 5% de retorno dos gases, considerando a Selic igual a 7% como sendo a taxa mínima de atratividade. Os resultados apresentados indicam a possibilidade de economia de combustível e a redução nas emissões de poluentes.

Palavras-chave: Lenha. Balanço energético. Fontes de energia renováveis.

ABSTRACT

ANALYSIS OF CO₂ EMISSION AND VALUE CHAIN OF FIREWOOD USED AS FUEL IN SMALL SCALE BOILERS IN SOUTHERN BRAZIL

**AUTHOR: BIBIANA PORTO DA SILVA
ADVISOR: NATTAN ROBERTO CAETANO**

Firewood is an important source of energy because it demands easy storage, a relatively low cost and its exploitation may be done with little processing. However, incomplete combustion of firewood produces a number of pollutants, including some fuels, such as carbon monoxide and other hydrocarbons, as well as components that participate in the mechanism of radiation heat transfer, such as carbon dioxide and water vapor. The boiler is a widely used system for the generation of energy, being also responsible for emissions of polluting gases. Therefore, the optimization and analysis of the feasibility of implementing the processes are of fundamental importance. Thus, the main objective of this work is to analyze the process of energy generation from the burning of wood in a boiler of the Santa Maria garrison in terms of emissions, energy use and costs. The methodological approach contemplates a case study of quantitative character with information obtained experimentally and in the literature. In addition, an analysis of the uncertainties of experimental measurements associated with volume, temperature and incomplete combustion was performed. The total emissions reached 36,3 tCO₂e, and the equivalent of 98,07% can be sequestered by the tree. The costs related to the boiler are 43,856 R\$/year, of which 30% was due to the acquisition of firewood. The results show that the recirculation case, for 20%, and the regenerative case presented savings of 0.98% and 1.79%, respectively. According to the financial parameters, the regenerative case was considered feasible and the recirculation case was feasible from 5% gas return, considering Selic equal to 7% as the minimum attractiveness rate. The results presented indicate the possibility of fuel economy and reduction in pollutant emissions.

Keywords: Firewood. Energetic balance. Renewable energy sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Variação do PIB per capita e consumo de energia por pessoa, no ano de 2016.....	15
Figura 2 - Oferta interna de energia por fonte.....	16
Figura 3 - Consumo de lenha residencial e industrial	16
Figura 4 - composição química da madeira.....	19
Figura 5 - Caldeira Mista.....	26
Figura 6 - Localização do município de Santa Maria.....	37
Figura 7 - Caldeira utilizada na 6ª Brigada de Infantaria Blindada.....	38
Figura 8 - Caldeira com o dimensionamento.....	39
Figura 9 - Emissões totais de CO ₂ (tCO ₂ /ha) pela queima de lenha de Eucalyptus, para vários autores.....	54
Figura 10 – Quantidade de total de CO ₂ (tCO ₂ /ha) sequestrada pela árvore durante o processo de crescimento, para vários autores.....	55
Figura 11 - Custos operacionais anuais do povoamento de Eucalyptus, para vários autores...56	
Figura 12 – Fluxo diário de lenha na operação da caldeira da guarnição.	61
Figura 13 – Comportamento da economia de energia em função da porcentagem de gases de exaustão que retorna para a caldeira, considerando a combustão completa, Cc, e incompleta, Ci.	64
Figura 14 - Evolução dos parâmetros financeiros em função da proporção de recirculação dos gases de exaustão, considerando combustão incompleta.	67
Figura 15 - Evolução do VPL em função da taxa mínima de atratividade, para o processo de recirculação e o regenerativo.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média do tronco de madeira de Eucalyptus.	18
Tabela 2 - Consumo de lenha por setor industrial no Brasil nos anos de 2006 e 2015.	28
Tabela 3 - Espécies químicas que compõem a lenha, por diversos autores, em %.	40
Tabela 4- Emissão de dióxido de carbono de cada equipamento utilizado.	45
Tabela 5 - Consumo de combustível e geração de CO ₂ no transporte de cargas.	45
Tabela 6 – Informações referentes a custo e taxa para o cálculo da viabilidade.	50
Tabela 7- Emissão de dióxido de carbono de cada equipamento.	53
Tabela 8 – Resumo do ciclo do dióxido de carbono.	56
Tabela 9 - Custos Fixos referentes a caldeira do quartel da guarnição de Santa Maria.	57
Tabela 10 - Composição dos gases de exaustão para combustão completa e incompleta.	59
Tabela 10 - Composição dos gases de exaustão para combustão completa e incompleta.	60
Tabela 11 - Composição do gás de exaustão.	62
Tabela 12 – Parâmetros utilizados para o cálculo da radiação gasosa emitida por CO ₂ e H ₂ O em feixes tubulares, nas condições desse estudo de caso.	63
Tabela 13 – Custo do combustível e economia prevista considerando a recirculação de 20% dos gases de exaustão, para a combustão completa e incompleta.	65
Tabela 14 – Parâmetros termodinâmicos obtidos para o caso regenerativo, considerando a combustão completa e incompleta.	66
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros financeiros calculados para o caso regenerativo.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EOL	Central Geradora Eólica
GEE	Gases de Efeito Estufa
ha	hectare
IPT	Instituto De Pesquisas Tecnológicas
MP	Material Particulado
N.A.	Não aplicável.
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear.
PSS	Plano de Suprimento Sustentável
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
CH ₄	Metano
VPL	Valor Presente Líquido
VAE	Valor Anual Equivalente
TIR	Taxa Interna de Retorno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL.....	18
2.1.1	Teor de Umidade.....	19
2.1.2	Propriedades químicas	20
2.1.3	Poder calorífico	23
2.2	COMBUSTÃO	23
2.3	CALDEIRAS	24
2.4	ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL	26
2.5	O REVÉS DO TRANSPORTE DE BIOMASSA	30
2.6	SUSTENTABILIDADE E CONTROLE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	32
2.6.1	Poluentes, suas fontes e seus impactos ambientais.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	37
3.2	TERMODINÂMICA DA CALDEIRA	39
3.2.1	Reação de combustão.....	39
3.2.2	Casos propostos.....	42
3.2.3	Emissões e absorção de CO ₂	44
3.3	ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS	46
3.3.1	Estimativa da incerteza no volume das toras	46
3.3.2	Estimativa da incerteza na temperatura	47
3.3.3	Estimativa da incerteza da concentração de CO na combustão incompleta.....	47
3.3.4	Estimativa da incerteza para o caso de recirculação.....	48
3.3.5	Estimativa da incerteza para o caso regenerativo	49
3.4	ANÁLISE ECONÔMICA	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	CICLO DO DIÓXIDO DE CARBONO.....	52
4.1.1	Fase agrícola e transporte da lenha.....	52
4.1.2	Fase industrial	53
4.1.3	Sequestro de CO ₂	54
4.2	CUSTOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA	56
4.3	ANÁLISE DA TERMODINÂMICA DA CALDEIRA	58
4.3.1	Reação de combustão.....	58
4.3.2	Recirculação	62
4.3.3	Regeneração	66
4.4	ANÁLISE ECONÔMICA	66
4.4.1	Processo de recirculação	67
4.4.2	Processo regenerativo	68
4.4.3	Análise incremental	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1	CONCLUSÕES	70
5.2	LIMITAÇÕES	71
5.3	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS.....	72

ANEXO A - EMISSIVIDADE DO CO₂ PARA PRESSÃO TOTAL DE 1 ATM.....	86
ANEXO B - EMISSIVIDADE DO H₂O PARA PRESSÃO TOTAL DE 1 ATM.....	86
ANEXO C - FATORES DE CORREÇÃO PARA AS EMISSIVIDADE.....	87
ANEXO D - CORREÇÃO DA EMISSIVIDADE DEVIDO À PRESENÇA SIMULTÂNEA DOS GASES CO₂ E H₂O	87
ANEXO E - CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DE VÁRIOS GASES IDEAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	88
ANEXO F - CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DE VÁRIOS GASES IDEAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (CONTINUAÇÃO).	88
APÊNDICE A - ACOMPANHAMENTO TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO E TEMPERATURA DA PAREDE E VOLUME ADICIONADO DE LENHA.....	90
APÊNDICE B - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO COM COMBUSTÃO COMPLETA.....	91
APÊNDICE C - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DO CASO REGENERATIVO COM COMBUSTÃO COMPLETA.....	91
APÊNDICE D - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO COM COMBUSTÃO INCOMPLETA.	92
APÊNDICE E - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DO CASO REGENERATIVO COM COMBUSTÃO INCOMPLETA.....	92
APÊNDICE F – ANÁLISE ECONÔMICA PARA DIVERSAS PORCENTAGENS DE RECIRCULAÇÃO, COMPLETA (a) e INCOMPLETA (b).....	93

1 INTRODUÇÃO

A necessidade da biomassa como fonte de energia é antiga e comum, no entanto, a crescente demanda por energias renováveis, associada aos riscos associados às mudanças climáticas globais tem estimulado o aumento do aproveitamento da biomassa acompanhado do adequado controle das emissões atmosféricas (LORA; SALOMON, 2004).

O Brasil possui vantagens para o setor florestal em razão de suas condições de clima, relevo, temperatura, humidade do ar, radiação, tipo de solo, vento, composição atmosférica e precipitação pluvial, favoráveis ao cultivo de Eucalyptus, aliadas ao desenvolvimento tecnológico, o que permitiu atingir altos níveis produtivos (CAMPOS, 2013).

A produtividade tem apresentado taxa positiva de crescimento, com destaque para o ano de 2012, que os plantios de Eucalyptus atingiram 5,10 milhões de hectares, representando crescimento de 4,5% em relação ao ano anterior. O principal fator responsável por esse crescimento foi o estabelecimento de novos plantios frente à demanda (ABRAF, 2013).

O consumo total de energia residencial no Brasil em 2015 representou 25,1 % do total consumido no país, sendo que a lenha foi a principal fonte representando 25,4 % do consumo residencial. Já no setor industrial, o consumo de lenha vem aumentando, a partir de 2006 até 2014 aumentou de 7,6% a 8,9%, sendo o quarto combustível mais utilizado (BEN, 2016).

Industrialmente, a madeira destinada para fins energéticos é competitiva com relação às demais fontes, por apresentar caráter renovável, tendo em vista que no processo de fotossíntese a árvore tem a capacidade de absorver o dióxido de carbono presente no ambiente e utilizá-lo para compor sua estrutura, convertendo o CO₂ em compostos orgânicos. Sendo assim, o dióxido de carbono, seja esse originado de combustíveis fósseis ou produzido pela queima da lenha, é absorvido pelas plantas e assim o ciclo do carbono é repetido (SILVA, 2009).

Para a fonte de biocombustível ser considerada sustentável toda a cadeia de valor precisa garantir a sua sustentabilidade. Assim, apenas combustíveis produzidos de forma sustentável podem ser considerados verdadeiramente fontes de energia renováveis. Isto significa que a soma dos efeitos das etapas de produção, manuseio ou transporte de biocombustível deve minimizar o consumo de energia em relação à energia produzida e deve minimizar a produção de CO₂ de origem fóssil. O plantio, a produção, a colheita, e o transporte da lenha até o posto de abastecimento da indústria devem oferecer plena rastreabilidade da sustentabilidade, necessário para a correta análise de ciclo de vida (GLENISTER; NUNES, 2011).

Tendo em vista as limitações das emissões de gases poluentes oriundos da combustão por meio de inúmeros protocolos estabelecidos ao longo dos anos e as dificuldades de se obter energia a partir de fontes renováveis o uso de lenha de florestas plantadas é uma alternativa sustentável (COMANA, 2006). Sendo assim, o trabalho consiste em entender e quantificar o processo de produção de energia a partir da combustão desse tipo de biomassa, analisando o ciclo completo de produção em termos de custos e emissões. Objetiva-se verificar o ciclo do carbono no momento em que esse é alterado devido às emissões incorporadas na transformação e transporte, isto é, as emissões devido ao plantio, manutenção, colheita, transporte e demais atividades destinadas à produção da lenha, bem como, o balanço financeiro da energia gerada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o processo de geração de energia a partir da combustão de lenha em uma caldeira da guarnição de Santa Maria em termos de emissões, aproveitamento de energia e custos.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Estimar as taxas de emissões de dióxido de carbono produzido a partir da combustão da lenha considerando a fase agrícola, o transporte e, também, a fase industrial de operação da caldeira e avaliar o sequestro de CO₂ por meio do crescimento da árvore de Eucalyptus, a fim de analisar o ciclo do CO₂;
- b) Analisar os custos de produção de energia no cenário abordado, a fim de dimensionar o estudo de caso;
- c) Realizar uma análise termodinâmica, considerando os processos de aproveitamento de energia por recirculação dos gases de exaustão e regeneração do ciclo de potência, a fim de estimar o aumento da eficiência energética;
- d) Verificar a viabilidade econômica para os processos de aproveitamento de energia, a fim de auxiliar na tomada de decisão para a implementação dos sistemas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A matriz energética brasileira apresenta inúmeras fontes renováveis, porém, devem-se considerar a sustentabilidade em termos dos impactos de sua instalação, manutenção e desenvolvimento. A hidroelétrica é a principal matriz energética do Brasil correspondendo a 64% de todo o volume gerado. Assim, o restante é desempenhado por outras fontes como gás natural (12,9%), Biomassa (8,0%), Derivados do petróleo (4,8%), carvão (4,5%), eólica (3,5%) e solar (0,01%) (CARDOSO et al., 2015; BEN, 2016).

As usinas hidroelétricas estão em ascensão no país, trazendo assim muitos benefícios, mas também impactos ao ambiente, devido à emissão de gás metano que é 20 vezes mais nocivo que o CO₂ (CARDOSO et al., 2015). O gás metano é produzido devido à decomposição de biomassa que se desenvolveu no fundo do reservatório no período que o nível baixo de água (FEARNSIDE, 2008).

A energia solar, apresenta um alto custo, principalmente pela alta complexidade das placas fotovoltaicas e a relativa eficiência de armazenamento. Além disso, as placas necessitam de grande extração de minérios, como o zinco, e assim com o aumento da demanda por matéria prima. Isto pode causar o crescimento de políticas não sustentáveis de extração dos minerais. A elevada dependência climática é um importante fator e assim a quantidade de energia gerada depende da sazonalidade (PENA, 2017).

Os geradores de energia eólica que podem impactar na fauna e flora local. Esses são comumente instalados em uma área aberta, a qual pode ser degradada, desmatada, compactada, alterada a morfologia, topografia e fisionomia do ambiente o que causa erosão (SANTOS et al., 2014).

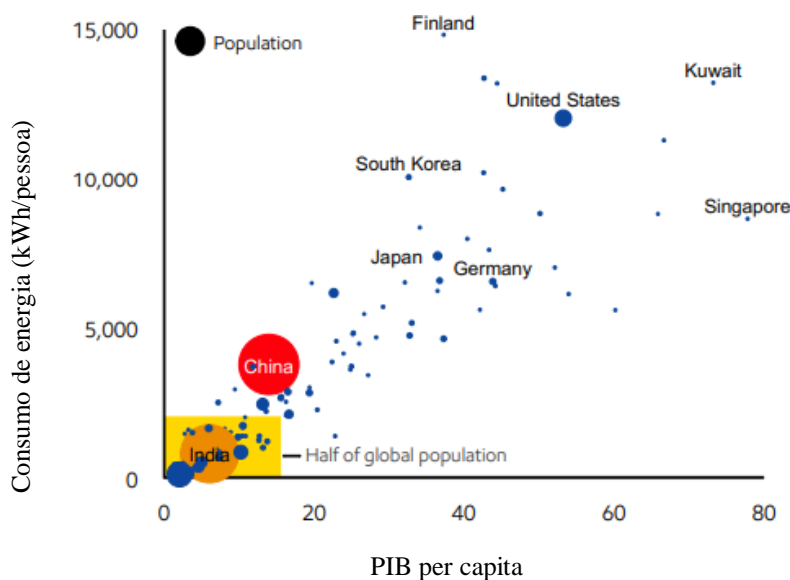
De acordo com Gentil (2010), em uma análise global, a energia ideal para uma sociedade em desenvolvimento, é aquela que apresenta baixo custo de produção e de venda, baixo risco em blecautes ou falhas no abastecimento. Tendo em vista, os diversos fatores negativos mencionados, destaca-se que toda a produção de energia causa algum tipo de dano à natureza. Assim, a madeira pode ser uma ótima alternativa devido ao seu custo e exploração relativamente baixo comparado com as demais fontes (SCHAYDER, 2014).

O consumo de energia é o principal indicador do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade (ANEEL). A economia mundial demonstra

claramente que para haver desenvolvimento e crescimento econômico é necessário investir em uma matriz energética sólida (SILVA, 2016). Portanto, a disponibilidade de energia devido a combustão de lenha é de fundamental importância para a matriz energética brasileira.

A Figura 1 apresenta a variação do produto interno bruto (PIB) e o consumo de energia em vários países, no ano de 2016. A relação entre as variáveis corrobora com as afirmações anteriores.

Figura 1 - Variação do PIB per capita e consumo de energia por pessoa, no ano de 2016.



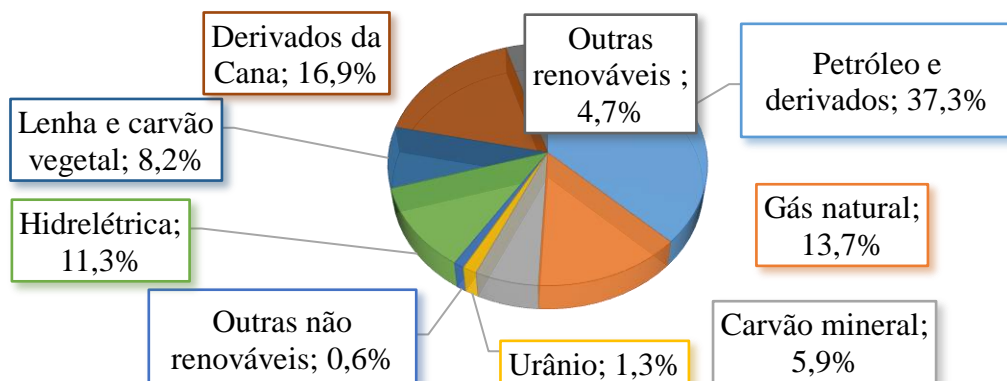
Fonte: Adaptado de CONTI et al., (2016).

A energia desempenha um papel crítico no apoio ao aumento dos padrões de vida modernos em todo o mundo, sendo que o consumo de eletricidade per capita é uma medida importante do consumo de energia. O uso de eletricidade per capita de um país está alinhado com seu nível de renda. Além disso, cerca de metade da população global reside em países onde a demanda média de eletricidade por pessoa é menor do que o consumo anual de eletrodomésticos básicos.

Do total de madeira produzida no Brasil, 38,7% é destinada a Lenha e carvão vegetal, 2,7% para compensados, 16,4% para serrados, 7,1% para painéis de madeira e 35,2% para celulose. Ressalta-se que, com exceção da lenha, do carvão vegetal, dos serrados e dos painéis de madeira industrializada, cujo consumo está basicamente concentrado no mercado interno, os demais produtos destinam-se, prioritariamente, ao mercado externo (ABRAF, 2013).

A Figura 2 apresenta em percentual do total gerado no Brasil a oferta de energia por fonte separado por renováveis e não renováveis.

Figura 2 - Oferta interna de energia por fonte.

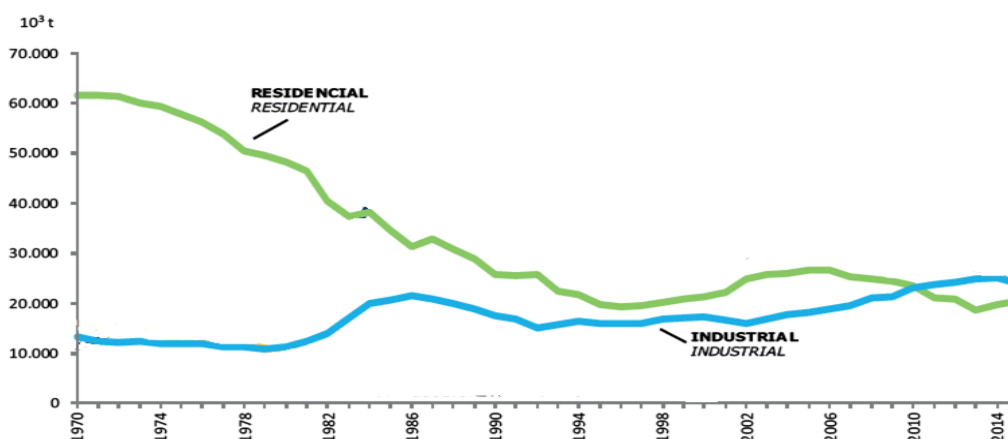


Fonte: Adaptado de BEN (2016).

Destaca-se que 41,2% são de origem renovável, derivados de cana, lenha e carvão vegetal, hidrelétrica e outras renováveis. No Brasil, predominantemente, 58,8%, da oferta de energia tem origem não renovável, tais como, derivados do petróleo, gás natural, carvão mineral e coque, urânio e outras não renováveis.

A Figura 3 apresenta o consumo de lenha no setor industrial e residencial, fazendo um comparativo entre os anos 1970 e 2014.

Figura 3 - Consumo de lenha residencial e industrial



Fonte: Adaptado de BEN (2016).

O consumo de lenha no setor industrial de 1970 a 1982 manteve-se constante. A partir de 1986 houve um crescimento até os últimos anos. No entanto, o consumo de lenha para fins residenciais foi de 60.000.000 toneladas em 1970. A incorporação de outras fontes de energia no setor residencial passou a utilizar cada vez menos a lenha e nos últimos anos o consumo foi reduzido para cerca de 20.000.000 toneladas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL

Os elementos principais da composição da madeira são o Carbono (49-50%), o Hidrogênio (6%), o Oxigênio (44-45%) e o Nitrogênio. A celulose, hemicelulose e lignina são os componentes macromoleculares presentes (KLOCK et al., 2015).

Na Tabela 1, são apresentados os valores em porcentagem das macromoléculas existentes na madeira (tronco sem casca) de *Eucalyptus* (Klock et al., 2015).

Tabela 1 – Composição média do tronco de madeira de *Eucalyptus*.

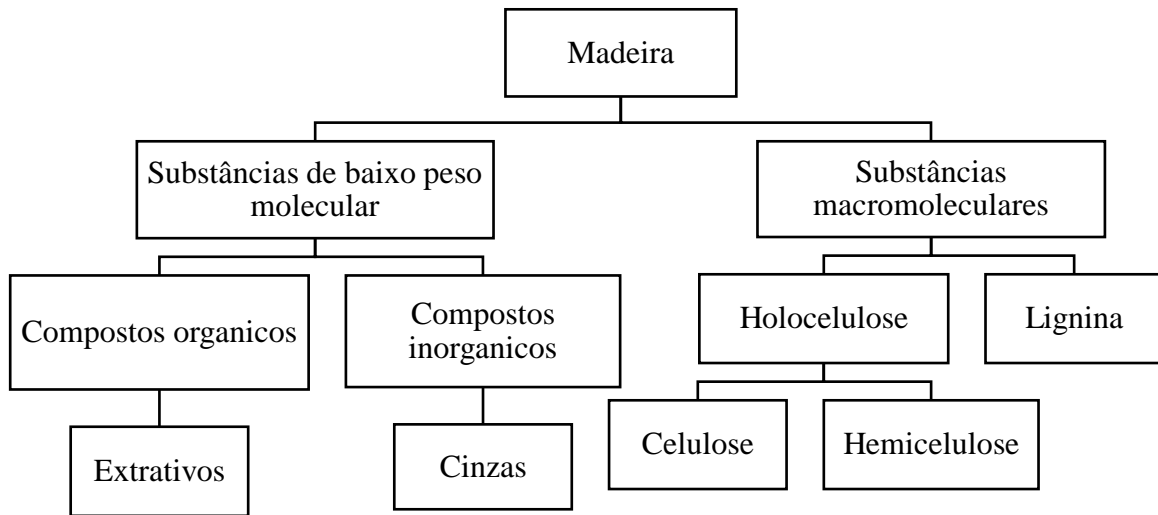
Constituinte	<i>Eucalyptus</i>
Celulose	45 ± 2%
Polioses	30 ± 5%
Lignina	20 ± 4%
Extrativos	3 ± 2%

Fonte: (KLOCK et al., 2015).

Obter o conhecimento da composição química (teor de celulose, hemicelulose e lignina) da madeira destinada a produção de energia é um fator importante para a avaliação do rendimento energético de seu processo de combustão (COUTO et al., 2004). Sendo assim, pode-se afirmar que a energia da combustão varia consideravelmente com a composição química da madeira sendo que existe relação entre o poder calorífico superior e os teores de extrativos e lignina na madeira (WHITE, 1987).

Na Figura 6, é apresentado um esquema genérico com os componentes da madeira, sendo dividida primeiramente em substâncias de baixo peso molecular e substâncias macromoleculares.

Figura 4 - composição química da madeira.



Fonte: Adaptado de Klock et al. (2015).

As substâncias macromoleculares constituem a parede celular de todas as madeiras e cuja sua remoção da parede celular implica na utilização de processos químicos ou mecânicos com elevada quantidade de energia que alteram fundamentalmente as propriedades das células. Tais macromoléculas são: a celulose, as hemicelulose e a lignina. Os componentes não estruturais, fazem parte as substâncias de baixa massa molecular como os extrativos e substâncias minerais, se encontram no lúmen das células e nos espaços vazios existentes na estrutura da madeira, podendo ser removidos pela utilização de solventes de polaridade adequada (SILVA, 2010).

A caracterização da lenha se dá por sua composição físico-química por meio da lignina, umidade, holocelulose, cinzas e extrativos o seu poder calorífico.

2.1.1 Teor de Umidade

O teor de umidade um parâmetro de análise muito importante, visto que a madeira é um material higroscópico e a relação com a água influencia diretamente na combustão do material. Segundo Klock (2005) os resultados das análises são relatados como Teor de Umidade, em %.

A determinação da umidade é estabelecida segundo a norma TAPPI (T 210 cm-93), obtida por meio de secagem em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, da madeira reduzida a serragem. A presente norma não deve ter aplicada àquelas madeiras que contenham substâncias voláteis que não seja água. Calculada a partir da expressão:

$$TU = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

onde o TU é o teor de umidade, em %; P_1 é o peso da amostra seca ao ar (peso inicial da amostra), em g; P_2 é o peso da amostra seca em estufa, em g.

2.1.2 Propriedades químicas

Para a caracterização química da madeira é realizada as análises de lignina insolúvel em ácido, compostos inorgânicos (cinzas), teores de extrativos totais, e de holocelulose.

2.1.2.1 Lignina

A propriedade energética da madeira está diretamente ligada a quantidade de lignina presente na madeira, assim sendo quanto maior o teor de lignina maior poder calorífico (SATANOKA, 1963).

A quantidade de carbono fixo, fornecida por unidade de madeira enforada, é função da porcentagem de lignina da madeira e não com teor de celulose da madeira (COLLET, 1955).

O percentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis porque queimam mais lentamente (FAO,1983).

O conteúdo de lignina é importante para análise da madeira. Os métodos quantitativos para a determinação da lignina podem ser divididos como diretos (lignina como resíduo), ou indiretos (conteúdo calculado após a determinação dos polissacarídeos, métodos espectrofotométricos, reações da lignina com agentes oxidantes) (KLOCK, 2005).

A determinação de lignina Klason a obtida segundo a norma TAPPI (T222 om-98). Teor de lignina residual é obtido por meio da equação 2,

$$L = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \times 100 \quad (2)$$

onde o L é o teor de lignina residual, em %; P_1 é o peso do resíduo, em g; P_2 é o peso inicial da amostra seca livre de extrativos, em g.

A correção do teor de lignina, equação 3,

$$L_{cor} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \times (100 - TU) \quad (3)$$

onde o L_{cor} é o teor de lignina corrigida, em %; P_1 é o peso do resíduo, em g; P_2 é o peso inicial da amostra seca e livre de extrativos, em g; TU é o teor de umidade, em %.

2.1.2.2 Compostos inorgânicos

Os principais componentes das cinzas da madeira são: K, Ca e Mg, e estes são obtidos na incineração na forma de óxidos (KLOCK, 2005). Sendo assim, a queima da madeira gera uma quantidade de cinzas, e nelas pode ser encontrado o cálcio o qual se apresenta sob a forma de cal viva (CaO) que aos poucos passa a carbonato de cálcio (CaCO₃) e ao se adicionar água à cal, forma-se hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂), que é a cal extinta. Isto promove características de matéria alcalina o que pode contribuir com a correção da acidez dos solos (CAMPANHARO, 2008).

A taxa de minerais presentes na madeira foi determinada por incineração a uma temperatura definida segundo a norma TAPPI (T 211 om-93). O teor de cinzas (TC) foi obtido por meio da equação 4,

$$TC = \frac{PC}{P} \times 100 \quad (4)$$

onde o TC é o teor de cinzas, em %; PC é o peso de cinzas, em g; P é o peso da amostra absolutamente seca depois da secagem em estufa, em g.

2.1.2.3 Extrativos

Todos os compostos formados na madeira originam-se da fotossíntese. Os extrativos são resultados de modificações sofridas pelos carboidratos no processo fisiológico da árvore (KLOCK, 2005).

O poder calorífico superior da madeira, além da umidade, está muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc.). Desta maneira, as coníferas que apresentam um conteúdo de resinas e lignina maior que as latifoliadas ostentam conseqüentemente um maior poder

calorífico superior, que varia também conforme a parte da árvore que esteja em combustão (casca, nós, ramos, madeira do toco) (JARA, 1997).

Segundo Klock (2005) os extrativos compõem uma grande variedade de compostos sendo que alguns componentes são encontrados em quantidade significativas em somente algumas espécies ou gêneros. Esses podem ser classificados em: Materiais voláteis com vapor d'água; solúveis em éter-etílico; solúveis em álcool-etílico; solúveis em água.

A determinação dos extrativos totais a obtida segundo a norma TAPPI (T264 cm-97, adaptada). Teor de extrativos é obtido por meio da equação a seguir:

$$TE = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100 \quad (5)$$

onde o TE é o teor de extrativos totais, em %; P_1 é o peso absolutamente seco depois da secagem em estufa e antes da extração, em g; P_2 é o peso absolutamente seco depois da secagem em estufa depois da extração, em g.

2.1.2.4 Holocelulose

A maior porção de carboidratos da madeira é composta por polímeros de celulose e hemicelulose, com menor quantidade de outros açúcares. A combinação de celulose e hemicelulose é denominada holocelulose (SANTOS, 2008).

Cunha (1989) afirma que o poder calorífico é tanto mais alto quanto maior o seu teor em lignina e extrativos, pois os mesmos contêm menos oxigênio do que os polissacarídeos presentes na holocelulose.

A determinação de Holocelulose obtida segundo a metodologia LCP – adaptada, por meio da equação 6,

$$H = \left(\frac{P_h}{P} \right) \times 100 \quad (6)$$

onde o H é o teor de holocelulose da amostra, em %; P_h é o peso da holocelulose, em g; P é o peso inicial da amostra seca e livre de extrativos, em g.

A correção do teor de holocelulose é dada pela equação 7,

$$H_{cor} = H \times (100 - TE) \quad (7)$$

onde o H_{cor} é o teor de holocelulose corrigido, em %; H é o teor de holocelulose, em g; TE é o teor de extrativos da amostra, em %.

2.1.3 Poder calorífico

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira (JARA, 1997). Classifica-se em superior e inferior e se dá a pressão ou volume constante.

O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE; DOAT, 1985).

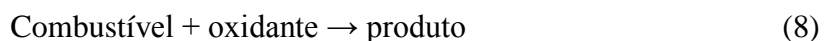
A medida experimental em laboratório é feita com o auxílio de calorímetros, que são aparelhos adiabáticos (que não trocam calor com o ambiente), dentro dos quais promove-se a combustão de uma massa conhecida do combustível. O calor gerado é transferido para uma massa de água, cuja temperatura sofre elevação. A partir dos valores experimentais coletados, calcula-se o poder calorífico (TYE; SPINNEY, 1978).

O poder calorífico determinado pela ABNT-NBR 8633/84, indicada para o carvão vegetal, e adaptada para qualquer combustível sólido (SILVA, 2008).

2.2 COMBUSTÃO

Em geral, os processos de combustão requerem a existência de uma mistura constituída por, pelo menos, duas espécies químicas sendo um combustível e a outra oxidante. No processo de combustão a composição química reativa varia ao longo do tempo. As espécies químicas que constituem a mistura inicial são designadas reagentes. As espécies que constituem a mistura final do processo por produtos (COELHO; COSTA, 2007).

Um processo de combustão pode ser descrito por uma reação química global segundo Coelho e Costa (2007), pela equação 8.



O combustível apresenta-se frequentemente como um hidrocarboneto, C_xH_y . O oxidante, ar, com composição molar de 21% de O_2 e 79% de N_2 (COELHO; COSTA, 2007).

No processo de combustão ocorre a liberação de energia em forma de calor e luz, (CAETANO; DUARTE, 2004).

A energia liberada no processo de combustão é expressada em termos de energia interna e entalpia, recorrendo ao princípio de conservação da energia expresso por meio da primeira lei da termodinâmica onde, quando negligenciamos as variações de energia cinética e potencial, a variação de energia interna ΔU de um sistema é igual à soma do calor Q trocado com o meio externo e do trabalho realizado contra o meio externo (COELHO; COSTA, 2007; ANACLETO; ANACLETO, 2007; FOGAÇA, 2017)

Os combustíveis não apresentam somente hidrocarbonetos, mas uma mistura com outros elementos, como o nitrogênio, o enxofre e o ferro. Dessa forma, esses elementos também participam da reação e produzem outros óxidos, como o dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de enxofre (SALUM, 2011).

A combustão incompleta é indesejável para fins energéticos, ambientais e de segurança (SALUM, 2011).

2.3 CALDEIRAS

Segundo a norma reguladora sobre caldeiras “As caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosfera, utilizando qualquer fonte de energia” (NR 13, 2014).

As caldeiras são equipamentos com a finalidade de transformar água em vapor. No entanto, necessita queimar um combustível para gerar a energia necessária para tal operação. Importante em diversos setores da indústria deve-se estar atento as emissões produzidas, considerando essa uma das principais fontes de emissões de poluentes em uma indústria (LEITE; MILITÃO, 2008).

A indústria de processo químico utiliza o vapor como uma fonte de aquecimento em reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros setores industriais, como metalúrgico, metal mecânico, eletrônica, entre outros, utilizam de vapor como fonte de aquecimentos (BIZZO, 2003).

A caldeira de combustível sólido é composta por uma câmara de combustível, trocador de calor ar-água, câmara de combustão, câmara de recolhimento de cinzas, alimentação de ar e saída dos produtos de combustão (MIRANDA, 2009). Essas são partes essenciais para a combustão, limpeza e emissão de gases.

As caldeiras flamotubulares são assim denominadas pelo local onde os gases provenientes da combustão trocam calor. Os gases provenientes da combustão, circulam no interior do tubo e a água a ser aquecida, circula pelo lado de fora (SOUZA, 2012).

Os tubos têm a finalidade de permitir que os gases quentes aqueçam a água que os rodeia, em dois ou três passes, permitindo assim um melhor aproveitamento do calor. Assim por meio de convecção os gases quentes aquecem as paredes do tubo e transfere calor à água. Algumas vantagens são: fácil limpeza e substituição dos tubos, menor rigor no tratamento da água (MACINTYRE, 2017).

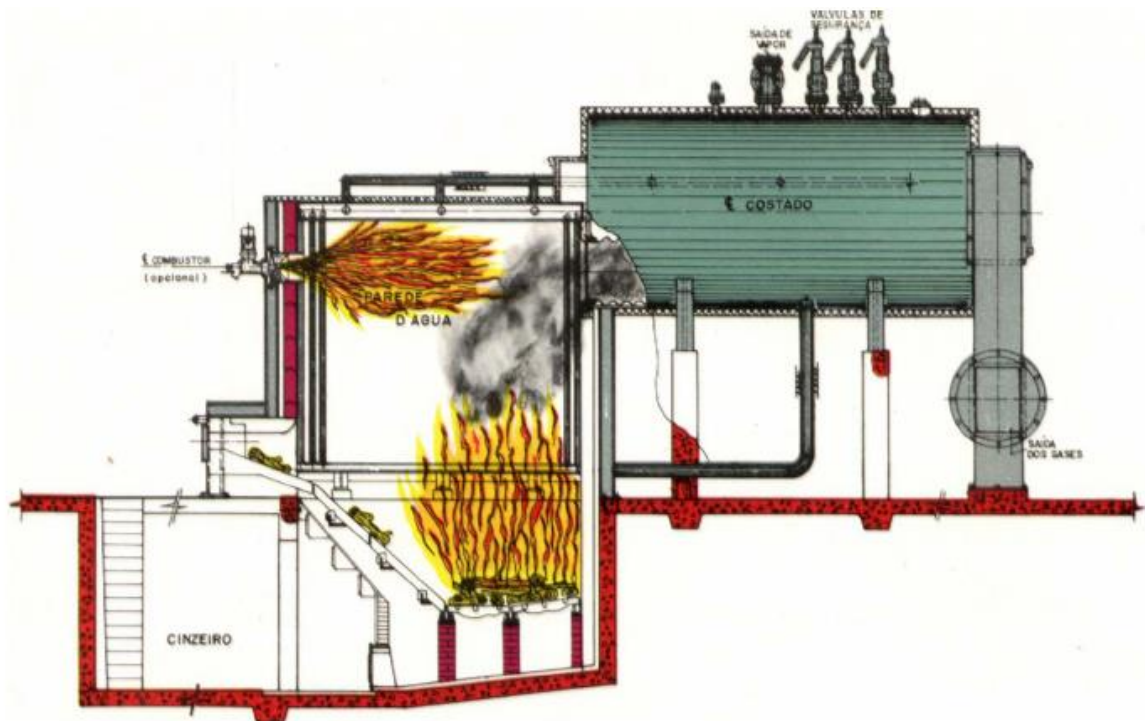
As caldeiras aquatubulares são definidas como aquelas que possuem a sua produção de vapor dentro de tubos que interligam 2 ou mais reservatórios cilíndricos. Essas caldeiras são de maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares. Assim sendo, são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, onde as flamotubulares começam a ter em seu custo de fabricação um aumento desproporcional (BIZZO, 2003).

O funcionamento dessa caldeira é dado por meio de duas seções: a seção onde a troca de calor se dá por radiação direta da chama aos tubos de água e a seção onde a troca de calor se dá por convecção forçada, dos gases quentes que saíram da câmara de combustão atravessando os tubos de água (BIZZO, 2003).

A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras pequenas fez surgir as caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos usando grelhas de diversos tipos e possibilitando o volume de câmara necessários aos combustíveis sólidos, como lenha em toras, cavacos, etc. (BRUXEL, 2011). Além disso, permitem a retirada de cinzas por baixo das grelhas (o cinzeiro).

As Caldeiras Mistas, Figura 5, não reúnem todas as vantagens das caldeiras aquatubulares, tais como segurança, maior eficiência térmica, etc., porém são uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustíveis sólidos a baixo custo.

Figura 5 - Caldeira Mista.



Fonte: BIZZO (2003).

O rendimento térmico destas caldeiras é menor que as Flamotubulares, devido à perda de calor na antecâmara. Dificilmente as paredes frontais e traseiras são revestidas de tubos, devido à dificuldade construtiva pelo pequeno tamanho da caldeira. Apresentam ainda, a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso, com a instalação de queimadores apropriados (TREVELIM, 2013).

2.4 ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL

A madeira ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade, e ainda participa com maior ou menor intensidade da matriz energética mundial (BRITO, 2007; FAO, 2003).

A madeira oriunda de reflorestamento deve ser incluída no rol de fontes energéticas consideradas quando da definição de políticas e diretrizes para o planejamento energético (LIMA; BAJAY, 1998). A madeira para fins energéticos, pode ser encontrada na forma original como troncos ou toras, ou em briquetes, cavacos e pellets.

Diversas madeireiras, serrarias e fábricas de móveis que utilizam a madeira para fins não energéticos, produzem uma grande quantidade de resíduos de madeira em diferentes tamanhos, resíduos esses que podem ser transformados em fragmentos de madeira e aproveitados como combustível nas caldeiras, para obtenção do vapor, procedimento este que oferece, ainda, benefícios de ordem ambiental (NASCIMENTO, 20017).

As tecnologias de briquetagem e de peletização são capazes de transformar a biomassa na sua forma moída em blocos compactos com diversas dimensões e prontos para a queima em fornos, caldeiras, lareiras e fogões. Essas tecnologias são conhecidas há muitas décadas e aplicadas na indústria, porém a necessidade de aproveitamento energético de resíduos tem dado especial destaque à aplicação na produção de biocombustíveis sólidos. O produto da briquetagem é o briquete e da peletização é o pélete (ou pellet) (DIAS et al, 2012).

O briquete é o nome dado às partículas de madeira que passaram pelo processo de briquetagem. A briquetagem é um método que consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de transformá-las um sólido compacto de alta densidade (LEANDRO, 2011).

O cavaco é o termo dado a matéria obtido por meio de lascas de toras de madeira, sendo esse um recurso renovável e na sua maioria destinado a caldeiras e fornos para a produção de energia (ARRUDA, 2009).

A lenha é definida pelo CONAMA como a porção de galhos, raízes e troncos de árvores e nós de madeira, utilizados na queima direta ou produção de carvão vegetal (CONAMA, 2016). A matéria orgânica, animal ou vegetal que pode ser utilizada como fonte de energia chamamos essa de biomassa e a lenha é considerada uma biomassa alternativa para a produção de energia (BUZIN, 2009).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2016), a produção de lenha teve uma redução de 13,95%, porém a lenha destinada a geração de energia elétrica teve um aumento substancial de 103,6% e aquela destinada ao setor industrial de 15,8% de 2006 a 2015 (BEN, 2016). Na Tabela 2 são apresentados os valores em tep (tonelada equivalente de petróleo) do consumo de lenha nos anos de 2006 e 2015. Pode-se perceber que em todos os setores (cimento,

química, alimentos e bebidas, papel e celulose, cerâmica e outros) obtiveram um aumento significativo no consumo.

Tabela 2 - Consumo de lenha por setor industrial no Brasil nos anos de 2006 e 2015.

Setor industrial	2006 (10³ tep)	2015(10³ tep)
Cimento	0	70
Alimentos e bebidas	1.831	2.171
Papel e celulose	1.252	1.833
Cerâmica	1.762	2.312
Outras	724	871

Fonte: Adaptado de BEN (2016).

Conforme a Tabela 2, todos os setores industriais citados obtiveram um aumento no consumo de lenha, sendo que o setor papel e celulose teve o maior aumento sendo esse de 47%. No Brasil o total de energia elétrica produzida no ano de 2015 foi de 58.111 (10³ tep), porém produzida a partir de lenha são apenas 2.180 (10³ tep) onde 162 (10³ tep) do Norte, Nordeste 131 (10³ tep), Sudeste 589(10³ tep), Sul 962 (10³ tep), Centro Oeste 337(10³ tep). Onde podemos perceber que no Sul do país que ocorre a maior produção.

O agronegócio brasileiro, medido a preços de mercado, chegou a responder por 21,26% do PIB nacional, sendo que, o setor de produção de carvão vegetal, lenha e outros produtos florestais florestal é responsável por 1,33% (MONTROYA et al., 2016). A madeira é um dos produtos mais ativos do agronegócio do Brasil. O país tem sete milhões de hectares de florestas plantadas e é atualmente o maior exportador de celulose de Eucalyptus do mundo. Utilizada como matéria-prima para diferentes fins, a produção de madeira movimentou a agropecuária brasileira, o que resultou no rendimento de R\$ 69 bilhões em 2015 (BRASIL, 2017b).

O setor florestal mantém, 4,4 milhões de postos de trabalho, incluindo empregos diretos (0,6 milhões), empregos indiretos (1,3 milhões) e empregos resultantes do efeito-renda (2,4 milhões). Especificamente, no setor de produção de lenha foram gerados 139.614 empregos diretos, 569.240 indiretos e efeito-renda 365.143 (CAGED, 2012).

De toda a madeira de florestas plantadas produzida no país estimasse que 35,2 é utilizada para a produção de celulose, 38,7% é destinada à produção de carvão vegetal, lenha e outros

produtos florestais ao passo que a produção de painéis de madeira industrializada, serrados e compensados consumiram, respectivamente, 7,1%, 16,4% e 2,7% do total de madeira produzida (ABRAF, 2013).

Embora o consumo de lenha para geração de energia doméstica seja historicamente um dos principais usos do produto, o crescimento das indústrias de papel e celulose, cerâmica, siderúrgica a carvão vegetal e agroindústria, dentre outras, tem pressionado o crescimento do volume consumido de lenha de florestas plantadas (BRAAF, 2013).

No período entre 2002 a 2012, a produção de lenha cresceu a uma taxa média de 1,2% a.a. e as Regiões Sul e Sudeste foram as maiores regiões consumidoras historicamente. Em 2012, estima-se que o Brasil produziu 52,2 milhões de m³ de lenha a partir de florestas plantadas, sendo que as Regiões Sul e Sudeste representaram 92,5% deste total (BRAAF, 2013).

Ressalta-se que, com exceção da lenha, e dos painéis de madeira industrializada, cujo consumo está basicamente concentrado no mercado interno, os demais produtos destinam-se, prioritariamente, ao mercado externo. Boa parte dos produtos das indústrias de processamento terciários (móveis, papel, pisos, molduras, etc.) também é exportada, o que demonstra a importância do mercado internacional para o setor florestal brasileiro (ABRAF, 2013).

O gênero *Eucalyptus* sendo naturalmente oriundo da Austrália chegou ao Brasil em 1904 com a finalidade de suprir as necessidades de postes, lenha e dormentes das estradas de ferro. Esse importante tipo de lenha, se adaptou às condições e clima do país tornando-se assim um dos mais importantes elementos para o desenvolvimento regional de inúmeras cidades principalmente onde muitas indústrias de celulose e papel foram gerando emprego e renda (FLORESTAR, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas no ano de 2012, a área brasileira de plantios de *Eucalyptus* atingiu 5,10 milhões de hectares, um crescimento de 4,7% em relação ao indicador de 2011. Os plantios desse gênero representaram 76,6% da área total plantada de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil (ABRAF, 2013).

A sua forma de plantio é feita no como resultando aproximadamente densidade de 1.666 plantas por hectare. Para o plantio normalmente são feitas operações de preparo do solo, adubações, e o combate às formigas, as quais são controladas por meio da aplicação de iscas granuladas que são aplicadas logo após o preparo do solo, no entanto algumas vezes é necessário ser aplicado novamente após o plantio das mudas (RODIGHERÍ, 1997).

O controle para as plantas daninhas é feito por meio de herbicidas principalmente nos dois primeiros anos de crescimento. Além disso são realizadas capinas e roçadas manuais no

caso dos pequenos produtores e mecanizadas nos grandes plantios das empresas reflorestadoras (RODIGHERÍ, 1997).

Os custos para a implantação e desenvolvimento das florestas de Eucalyptus são divididos em dois itens, onde o primeiro é chamado de custo de serviço onde engloba a demarcação da área, aplicação de formicida, retirada da vegetação, aplicação de herbicida, subsolagem, gradagem, calagem, adubação de base, abertura de covas e plantio, adubação de plantio, roçada, capina e coroamento, adubação de cobertura, monitoramento, o segundo item é o custo de insumos que está presente as mudas, gesso (cal), adubação de base (superfosfato), adubação de plantio, adubação de cobertura, formicida, herbicida. Verifica-se de modo geral que o custo com serviços e o custo com insumo respondem, respectivamente, por 62,39 % e 37,60 % do valor do custo total de produção (DE QUEIROZ; DA GAMA, 2016).

De acordo com Silva et al. (2004), o custo médio para a implantação de 1 hectare de Eucalyptus tem como os maiores custos a aquisição das bandejas e toletes (28,3%), combate a formigas (16,7%), preparo do solo (14,1%) e mão de obra (11,1%). No entanto, segundo Souza Junior (2012), quando levados em consideração o custo colheita e transporte (64%), as porcentagens dos demais custos tendem a diminuir. Sendo assim, o planejamento (6%), preparo de solo (3%), plantio (2%), insumos (9%), tratos culturais (3%), tratos silviculturas (3%), manutenção (1%), custo de capital (11%) do custo total da produção.

Sendo assim no Eucalyptus cultura, o maior custo ocorre no primeiro ano, e refere-se à implantação e manutenção outros componentes que mais contribuem para o maior custo das empresas são as operações de mecanização e a mão de obra (RODIGHERÍ, 1997).

Além disso, é importante saber a idade que pode ser feito o corte sendo, o primeiro corte aos 7 anos, o segundo aos 14 anos e o terceiro aos 21 anos de plantio. Contudo, se houver a necessidade de lenha, pode-se fazer o corte com quatro, cinco e seis anos, portanto quanto mais tempo demorar para o corte, a madeira apresentará melhores rendimentos alcançando preços mais atraentes (RODIGHERÍ, 1997).

2.5 O REVÉS DO TRANSPORTE DE BIOMASSA

A madeira apresenta um baixo valor agregado. Assim, o transporte deve considerar a relação entre seu volume/peso, sendo que um valor alto implica em um alto custo para transportar esse tipo de mercadoria. Além disso, a distância entre a indústria e os locais de reflorestamento deve ser estratégica para o negócio. Desta forma, o planejamento detalhado e

as decisões estratégicas são extremamente importantes para este tipo de negócio (SILVA et al., 2007).

A distância máxima viável de transporte de madeira deve ser considerada, uma vez que o custo de transporte elevado pode inviabilizar zonas de reflorestamentos localizados mais distantes dos centros de consumo (SILVA et al., 2007). Outros fatores importantes são a existência ou não de frete de retorno, as condições da rede viária e construção e manutenção de estradas, quantidade de carga transportada por composição veicular, pagamento de pedágios, combustível. Além disso, a forma da carga e descarga e sua eficiência, incluindo assim os tempos de espera (SEIXAS, 2001).

Os custos do transporte são basicamente divididos em custos fixos e custos indiretos. Sendo assim os custos fixos são de acordo com a Associação Nacional do Transporte de Cargas correspondente aos custos de operação e esse é composto da remuneração mensal do capital investido, salário do motorista, reposição do veículo, licenciamento, seguro do veículo, seguro de responsabilidade civil facultativo (DECOPE, 2014).

Os custos indiretos que também são conhecidos como as despesas administrativas que de acordo com a estrutura de custos adotada pela FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas da USP inclui os salários, ordenados, honorários de diretoria, encargos sociais aluguéis de áreas e imóveis, tarifas de serviços públicos. Além de, serviços de manutenção, serviços profissionais de terceiros, impostos e taxas, despesas com conservação de bens e instalações, refeições e lanches. Observa-se que são aquelas que não estão relacionadas diretamente com a operação do veículo, ou seja, não variam, portanto, com a quilometragem rodada (DECOPE, 2014).

O custo total é a soma do custo fixo com os custos indiretos. No entanto, pode ser necessário acrescentar custos variáveis que são aqueles que são iguais a zero quando não ocorre a necessidade deles, mas são necessários em caso de manutenção como os seguintes itens: Peças; Acessórios; Material de manutenção; Despesas com combustível; Lubrificantes; Lavagem e Lubrificações; Pneus e recauchutagens (DECOPE, 2014).

Os veículos usualmente utilizados no transporte de madeira por via rodoviária classificam-se pela capacidade de carga. Sendo assim, os veículos leves têm capacidade de carga que não ultrapassa 10 toneladas; veículos pesados suportam de 30 a 40 toneladas de carga; e os veículos extrapesados (bitrem, tremilhão, rodotrem) que tem uma capacidade de carga acima das 40 toneladas (MACHADO et al., 2000).

2.6 SUSTENTABILIDADE E CONTROLE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O conceito berço ao berço tem como objetivo uma mudança em relação à lógica berço ao túmulo, propondo, principalmente, resgatar o princípio cíclico da natureza, onde dejetos de uma espécie ou de uma atividade servem de alimento à outra (VAN DER RYN e COWAN, 1996; McDONOUGH e BRAUNGART, 2002). Utiliza-se o conceito berço ao berço como parâmetro de comparação e forma de avaliação das iniciativas que visam alcançar a sustentabilidade ambiental, social e econômica (JACQUES, 2011).

Ao final do processo os recursos não devem simplesmente ser descartados, mas utilizados e isto deve ser pensado em termos de produção, de uso e de logística. Quanto mais cíclica a utilização dos recursos, mais “verde” será o produto no caso a energia produzida. O ritmo de consumo e a busca pelo uso responsável dos recursos naturais estão relacionados à necessidade de descarte correto dos produtos, para que não se tornem dejetos e voltem para o ciclo produtivo (GUIMARÃES, 2009).

A legislação brasileira para os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira para fontes fixas industriais e de geração de energia elétrica, são estabelecidos por meio de resoluções próprias pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA:

a) Resolução nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Complementada pelas Resoluções nº 03, de 1990, nº 08, de 1990, e nº 436, de 2011.

b) Resolução nº. 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixa. Complementada pela Resolução nº 436, de 2011.

O Brasil instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) por meio da Lei nº 12.187/2009, que define o compromisso nacional voluntário na adoção de medidas e ações de mitigação com o objetivo a reduzir as emissões de GEE, entre 36% e 39%, em relação às emissões projetadas até 2020. Segundo o Decreto nº 7.390/2010, que regulamenta a Política Nacional sobre Mudança do Clima, a projeção de emissões de gases de efeito estufa para 2020 foi estimada em 3.236 Gt CO₂eq (BRASIL, 2013).

A Legislação Florestal de acordo com a Lei Federal nº12.651/2012 regulamenta que, a extração da lenha e demais produtos florestais é livre desde que a seja de florestas plantadas e não podendo ser áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal (BRASIL, 2017a).

Todas essas legislações e normatizações são essenciais para o controle das emissões atmosféricas, pois atribuem limites aos fatores de risco.

2.6.1 Poluentes, suas fontes e seus impactos ambientais

O impacto da poluição atmosférica foi levado em consideração só a partir da década de 60 quando foi criado um programa federal de poluição atmosférica, ligado ao Departamento de Saúde Educação e Bem-Estar Social dos Estados Unidos da América (EUA). Porém isso não foi suficiente e ainda na década de 60, os Estados Unidos estabeleceram padrões de qualidade do ar, especificando os seis poluentes atmosféricos que seriam controlados, quais sejam: particulados totais, dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e chumbo (Pb). A fim de efetivar esse controle, criou-se a Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA) (BRAGA; PEREIRA; SALDIVA, 2002).

Há uma crescente preocupação com os estudos visando a melhoria dos equipamentos, substituição de combustíveis, adição de materiais absorventes, entre outros métodos para evitar que sejam encaminhados para a atmosfera os gases nocivos para a saúde e bem-estar da sociedade. Essas medidas são estratégicas para o controle das emissões, no entanto ações indiretas como a manutenção adequada dos equipamentos, controle operacional adequado e o treinamento contínuo dos operadores não devem ser esquecidas, pois também, são essenciais para o bom funcionamento de todos os equipamentos (MACHADO; SILVA; FREIRE, 2001).

Os poluentes atmosféricos mais comuns ligados a queima da madeira são os óxidos de nitrogênio, enxofre, monóxido e dióxido de carbono e o material particulado.

2.6.1.1 Óxidos de nitrogênio

O Nitrogênio ativo é aquele com atividade química e biológica e possui potencial para modificar as propriedades físicas do ambiente ou da biota. Esse se apresenta na forma de gases (NO, NO₂, N₂O e NH₃) ou compostos solúveis na água (NH₄⁺ e NO₃⁻) e é responsável por provocar problemas ambientais locais e regionais como a chuva ácida, a contaminação de águas e ainda com grande potencial para afetar a biodiversidade de florestas naturais (CARDOSO; MACHADO; PEREIRA, 2008)

NO_x, óxidos de nitrogênio, é o termo utilizado para demonstrar os compostos formados pelo processo térmico e pela oxidação do nitrogênio presente no vegetal, sendo os mais

importantes o óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (RIBEIRO; ASSUNÇÃO, 2002).

Pode-se verificar que ambos estão presentes em concentrações significativas em atmosferas poluídas e são bastante reativos nesse meio apresentando propriedades toxicológicas importantes, sendo que o NO₂ é muito mais tóxico que o NO. Em nível ambiental, contribuem para o aquecimento da superfície terrestre (KURIYAMA; MOREIRA; DA SILVA, 1997).

2.6.1.2 Óxidos de enxofre

Os Óxidos de enxofre (SO_x) são a combinação de dois produtos dos processos de combustão, onde todo o enxofre que está presente no combustível aparece como o SO₂ e SO₃ (COSTA, 2013).

Quando se necessita a utilização de combustíveis sólidos uma das análises de extrema importância é a determinação do teor de enxofre total, pois esse influencia diretamente no poder calorífico onde a energia liberada pelo enxofre é inferior à do carbono e do hidrogênio. Além disso, esse composto pode ocasionar corrosão, chuva ácida e a formação de ácido sulfídrico (H₂S) que é um composto que tem ação tóxica para os seres humanos (TAMBANI et al., 2013; BRAGA; PEREIRA; SALDIVA, 2002).

2.6.1.3 Monóxido e dióxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás perigoso que pode ser incolor, inodoro, sem sabor, não irritante e ser asfíxiante. Podendo deixar uma pessoa inconsciente, ele é produzido pela combustão incompleta de matérias carbonáceas orgânicas, como o carbono, a madeira, o papel, o óleo, o gás e a gasolina (WHO, 1979).

O dióxido de carbono é um gás incolor e pouco solúvel em água. Esse composto é obtido por meio a combustão direta do carbono com oxigênio (BIZZO, 2003):

O CO₂ produzido a partir da queima de combustíveis fósseis como o carvão, óleo e gás natural em países em desenvolvimento vem crescendo rapidamente nos últimos anos e deve se igualar à dos países desenvolvidos até 2035, quando cerca de 12 bilhões de toneladas de CO₂ ao ano serão lançadas no total (GOLDEMBERG; GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

A queima de combustíveis fósseis acarreta conhecidos problemas ambientais com a liberação do CO₂ e CO na atmosfera, sendo a maior responsável pelo aumento do efeito estufa do planeta (CORDANI; TAIOLI, 2003). Porém, o CO₂ não é apenas produzido, mas consumido. Desempenha no ar atmosférico fundamental referência para o crescimento de vegetais que por meio da fotossíntese assimila o CO₂ e desassimila o oxigênio sendo esse indispensável para a vida na Terra (SANTOS, 1999).

2.6.1.4 *Material particulado*

O Material particulado é definido como uma mistura complexa de sólidos ou líquido com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas. O material particulado usualmente é classificado conforme diâmetro das partículas, tendo em vista que o diâmetro está relacionado com a possibilidade ou não dessas invadirem no trato respiratório (BRASIL, 2016).

O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, tendo em vista que quanto menores maiores são seus efeitos. Além disso, o material particulado pode também reduzir a visibilidade na atmosfera (CETESB, 2001).

O material particulado pode ser classificado como as partículas totais em Suspensão (PTS) cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 50 µm. As partículas inaláveis (MP10) são aquelas que têm diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm e a Fumaça (FMC) que está associada aos processos de combustão, sendo o método de determinação da fumaça baseado na medida de refletância da luz que incide diretamente relacionado ao teor de fuligem na atmosfera (CETESB, 2001).

2.7 **Comentários finais**

Da revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, é possível perceber que, no que tange à combustão de lenha em caldeiras duas propostas de projetos de melhorias podem ser propostas. A primeira é o uso de regeneração da água condensada e segunda é o retorno dos gases de exaustão. Como será visto no próximo capítulo, o presente trabalho utiliza técnicas

que permitirão estudar a reação de combustão, os casos propostos, as emissões e absorção de CO₂. Além da análise e quantificação das incertezas e a análise econômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é composto pela localização e caracterização da área de estudo, emissões e absorção de CO₂, cálculo da reação de combustão, casos propostos, análise econômica, análise e quantificação das incertezas experimentais.

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Santa Maria está localizada no Rio Grande do Sul e por sua posição geográfica central, como ilustra a Figura 6, foi historicamente estratégica desde os tempos do Império, na questão dos conflitos com os “países do Prata”. Essa condição estratégica, por várias décadas, provocou investimentos concentrados na cidade referentes à segurança nacional e assim Santa Maria se tornou a cidade a possuir a 2ª maior Guarnição Militar do país (SCALABRIN, 2012).

Figura 6 - Localização do município de Santa Maria



Localização geográfica: 29°41'19.0"S, 53°49'03.9"W

Fonte: Projetoetics (2008).

A cidade também é conhecida como Santa Maria da Boca do Monte, pois situa-se em 29°41'19.0"S, 53°49'03.9"W, sendo uma região central e cercada por morros. Abriga bases do Exército e da Aeronáutica.

Na guarnição de Santa Maria estão localizados o comando da 3ª Divisão de Exército (3ª DE), a Base Aérea local (BASM) e um número expressivo de organizações militares do Exército. Cerca de 17.500 homens da força terrestre integram a 3ª DE, além dos 1.600 efetivos da Força Aérea Brasileira (FAB) que atuam na BASM (PROJETOS, 2017).

Avaliados os quartéis da guarnição de Santa Maria, para o estudo de caso foi utilizada a caldeira utilizada da 6ª Brigada de Infantaria Blindada localizada na Rua Borges de Medeiros, 1515. Sendo essa, como ilustrado na Figura 7, uma caldeira mista, instalada na guarnição neste ano.

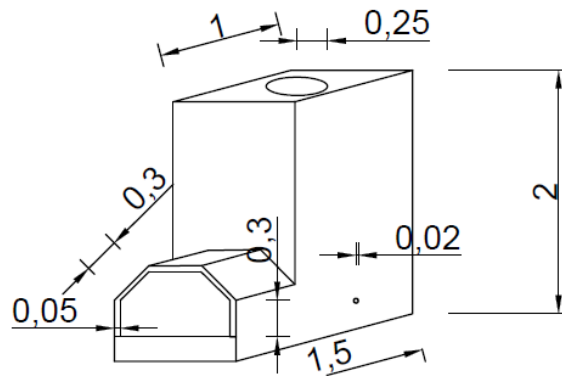
Figura 7 - Caldeira utilizada na 6ª Brigada de Infantaria Blindada.



Fonte: Autor.

Na Figura 8 ilustra o dimensionamento da caldeira utilizada, sendo que a saída dos gases de exaustão ocorre na parte superior da caldeira e a tubulação apresenta 0,25 m raio, a entrada de água é apresentada na parte lateral direita da caldeira e a tubulação tem 0,02 m de raio.

Figura 8 - Caldeira com o dimensionamento.



Fonte: Autor.

O fluxo de operação da caldeira inicia-se ao ser verificado pelo sensor o nível baixo de água e assim é acionado a bomba que envia a água líquida da caixa d'água para a caldeira. A água entra na caldeira a temperatura ambiente e entra em contato com o calor originado da combustão aumentando sua temperatura até a mudança de fase. O vapor é utilizado para aquecer serpentinas de panelas e a linha para servir a alimentação. A água já condensada que sai do processo ainda quente, no entanto retorna a caixa d'água onde se mistura a uma grande quantidade de água a temperatura ambiente retornando assim para a caldeira a temperatura ambiente.

3.2 TERMODINÂMICA DA CALDEIRA

3.2.1 Reação de combustão

A lenha é amplamente utilizada a nível industrial e tem vantagens de mediante programas bem estruturados de reflorestamento, ter suas reservas em continua reposição.

Embora apresente características bastante variáveis, a composição química da lenha (base seca) deve oscilar em torno dos valores apresentados na Tabela 3.

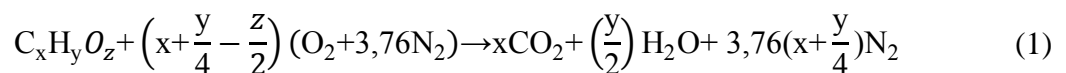
Tabela 3 - Espécies químicas que compõem a lenha, por diversos autores, em %.

Espécies químicas	Bazzo (1995)	Balat (2011)	Vlassov (2001)	Brito; Barrichelo, (1979)
C	49,00	48,00	47,50	50,2
H	6,00	6	6,00	6,1
N	-	-	1,00	0,2
O	44	45	44	43,4
Cinzas	1,00	-	1,50	0,2
PCI (kJ/kg)	16000	-	15586	-

Fonte: Adaptado de Bazzo (1995), Balat (2011), Vlassov (2001) e, Brito e Barrichelo (1979).

Quando ocorre o processo de combustão da lenha, essa se transforma em calor, produtos químicos e gases. Na combustão completa produz vapor d'água e CO₂ juntamente com calor e cinzas não combustíveis. A incompleta, no entanto, ocorre a formação de CO, hidrocarbonetos e outros gases (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Uma mistura reativa (combustível + oxidante) designa-se por estequiométrica quando a quantidade de oxidante nessa mistura é teoricamente necessária e suficiente para queimar completamente todo o combustível num processo de combustão ideal. Um processo de combustão ideal pressupõe a formação de espécies químicas completamente oxidadas nos produtos de combustão. No caso da combustão de um hidrocarboneto em ar, essas espécies químicas são CO₂ e o H₂O, pelo que a reação estequiométrica se escreve do seguinte modo adaptado (TURNS, 2013) segundo a reação 1:



O número de mols de O₂ necessários a combustão é a quantidade x. Como a combustão é feita, no caso, com ar atmosférico, para cada molécula de oxigênio do ar, é considerado obrigatoriamente 3,76 mols de nitrogênio (a relação de volumes entre os dois gases no ar atmosférico). A necessidade de oxigênio "x" é calculada fazendo-se o balanceamento dos átomos de oxigênio.

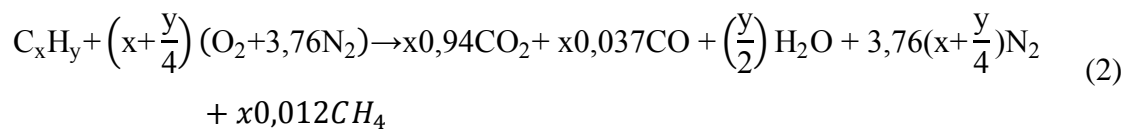
Sendo que a quantidade real de ar necessária é maior do que a quantidade teórica e essa é denominada de "excesso de ar". Para combustíveis sólidos o excesso de ar deve situar-se entre

30 e 60 % da quantidade de ar teórico (LOPES, 2000). A quantidade inferior ao ar teórico necessário deve ser evitada, pois propiciam a combustão incompleta.

Se a quantidade de $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ disponível é menor do que a calculada, tem-se uma combustão incompleta. O excesso de ar deve ser aumentado pelas aberturas de entrada de ar, diminuição da espessura da camada de combustível ou aumento da tiragem. A presença de CO nos gases de combustão também é uma indicação útil da qualidade da combustão, pois evidencia que a mesma não está ocorrendo de forma completa. A presença CO pode ser usada como indicação da qualidade da combustão haja vista que o CO é o subproduto da combustão que queima a temperatura maior (LOPES, 2000).

Portanto, no caso da “combustão incompleta” (não havendo oxigênio suficiente para oxidar completamente todo o carbono e todo o hidrogênio), o oxigênio disponível queimará todo o hidrogênio, passará todo o C a CO, e uma parte do CO formado será oxidado a CO_2 pelo oxigênio ainda restante.

Segundo os valores apresentados por Welter (2017), na reação de combustão da madeira de Eucalyptus com relação a concentração de carbono nos gases emitidos esse apresenta 94,98% de CO_2 , 3,74% de CO e 1,28 de outros hidrocarbonetos, conforme a reação 2.



Isso significa uma perda de combustível sob a forma de CO, o qual também pode ser oxidado liberando calor. Se adicionarmos mais oxigênio ou ar, o CO pode oxidar produzindo ainda a reação exotérmica seguinte:



A entalpia dessa reação é 282 kJ/mol (COELHO; COSTA, 2007).

A massa foi obtida multiplicando a molaridade pela massa molecular, a densidade foi calculada parcialmente para cada um dos gases utilizando a equação 10:

$$\rho = PM/RT \quad (9)$$

onde ρ é a densidade da mistura, P é a pressão atmosférica, M é a massa moléculas, R é a constante universal dos gases perfeitos (8,32 J/mol.K).

3.2.2 Casos propostos

Essa secção destina-se, a exemplificar e embasar nossa pesquisa. Esta tem o objetivo de apresentar os dois casos em discussão. O caso da recirculação dos gases quentes que é muito utilizado para motores de carros, no entanto, não foi encontrado trabalhos utilizando recirculação de gases de exaustão de caldeiras e o caso regenerativo que é uma importante variação do ciclo Rankine que aquece a água de alimentação da caldeira, esse amplamente utilizado.

3.2.2.1 Caso de recirculação

A recirculação dos gases de exaustão (EGR) é um método reconhecido para a redução das substâncias poluentes não só nos motores a gasolina e praticamente todos os motores diesel modernos estão equipados com a mesma para cumprir os regulamentos relativos aos gases de exaustão cada vez mais exigentes (SAQUAIELLA, 2010).

Os gases de escape podem ser originados de uma combustão completa e assim os gases de escape contêm H₂O (água) e CO₂ (dióxido de carbono) e outros gases presentes no ar. Quando originado de uma combustão incompleta os gases de escape contêm, além H₂O e CO₂, outros compostos poluentes como: CO, HC, NO_x e outros a gases nocivos à saúde e ao meio ambiente.

A medida em que aumenta o conteúdo de gases do tipo CO₂ e H₂O e a temperatura se torna mais significativa parcela de energia trocada por paredes na forma de ondas infravermelhas, sendo essa a radiação em meio participante, ou radiação gasosa. No caso de caldeiras, SO₂ e demais gases não tem participação significativa ou são essencialmente transparentes a radiação (KAWÁS, 2014).

A radiação apresentada em feixes tubulares, sendo que esses se apresentam sempre cobertos de fuligem, implicando em emissividade efetivamente mais altas, aproximando-se da condição ideal de corpo negro. Nessas condições, a energia líquida transferida do volume de gás para as paredes vizinhas, sob temperaturas uniformes, pode ser avaliada, com razoável aproximação pela equação 10,

$$\dot{q}_g = \sigma * A * f * (\varepsilon_g * T^4 - \alpha_g * T_p^4) \quad (10)$$

onde \dot{q}_g é o calor trocado por radiação gasosa (W), A é a área de troca de calor (m^2), f é o fator de correção para invólucros cinzas, ε_g é a emissividade do gás (avaliado em T), α_g é a Absortividade do gás para a radiação proveniente do invólucro negro na temperatura absoluta T_p , T_p é a temperatura da parede e T é a temperatura dos gases de exaustão.

A espessura efetiva da camada gasosa, ou comprimento efetivo de feixe, como também é tratado, depende principalmente da geometria do involucro, sendo assim primeiramente se faz necessário com base na geometria da caldeira supor as dimensões da área de troca de calor. Sugere-se adotar a equação 11,

$$L_e = 0,85 * \frac{4 * V}{A} \quad (11)$$

onde L_e é a espessura efetiva a camada gasosa expresso em m , V é o volume total do gás expresso em m^3 e A é a área superficial em contato com o gás.

Os valores de emissividade ε_g e de absortividade α_g dos gases podem ser obtidos seguindo-se procedimento simplificado proposto por Hottel, Sarofim, Ludwing e outros pesquisadores, equação 12,

$$\varepsilon_g = f_c * \varepsilon_c + f_w * \varepsilon_w - \Delta_\varepsilon \quad (12)$$

onde ε_c é a emissividade do CO_2 , avaliada na temperatura absoluta T e produto $P_c * L_e$ (Ver Anexo A), ε_w é a emissividade do H_2O , avaliada na temperatura absoluta T e produto $P_c * L_e$ (Ver Anexo B), f_c é o fator de correção da emissividade do CO_2 para a pressão desejada, f_w é o fator de correção da emissividade do H_2O para a pressão desejada (Ver Anexo C), Δ_ε é a correção devido à presença simultânea de gases CO_2 e H_2O na temperatura absoluta T (Ver Anexo D). Do mesmo modo, para a determinação da absortividade do gás, equação 13,

$$\alpha_g = f_c * \varepsilon_c \left(\frac{T}{T_p} \right)^{0,65} + f_w * \varepsilon_w \left(\frac{T}{T_p} \right)^{0,45} - \Delta_\varepsilon \quad (13)$$

onde α_g é a absortividade do gás.

3.2.2.2 Caso regenerativo

Consideremos um corpo de massa m à temperatura inicial, T_i . Fornecendo-se uma quantidade de calor Q a esse corpo, suponha que sua temperatura aumente até T_f . A experiência

mostra que a quantidade de calor Q é proporcional à massa m e à variação de temperatura ($T_f - T_i$) apresentado na equação 15,

$$q = m C_e (T_f - T_i) \quad (14)$$

onde q é a quantidade de calor, m é a massa, C_e é o calor específico da substância, T_f é a temperatura final e T_i a temperatura inicial.

O calor específico é uma grandeza que caracteriza a facilidade ou dificuldade de um determinado material variar sua temperatura quando troca energia na forma de calor. É importante ressaltar que esta característica depende apenas do material de que é feito o corpo. O calor específico de um gás em função de sua temperatura, é dada por meio da equação 16,

$$C_e = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3 \quad (15)$$

onde C_e é o calor específico em kJ/kgK, C_0, C_1, C_2, C_3 são valores parciais encontrados no Anexo E e Anexo F, θ é a temperatura dos gases de emissão em K (VAN WYLEN, 1995).

3.2.3 Emissões e absorção de CO₂

A lenha foi o sistema analisado nesse estudo e incluiu os seguintes subsistemas a etapa agrícola na produção da lenha, o transporte entre a etapa agrícola e a queima, a etapa industrial de consumo.

Para atingir o objetivo final de comparação entre a absorção de CO₂ e as emissões foram estimadas para o consumo de 1 ano de lenha.

Para a fase agrícola, o cenário utilizado foi o de uma empresa que possui uma área total de 1430 hectares os quais 100 ha são destinados a plantios de Eucalyptus em áreas planas, 287 ha para reserva legal e área de preservação permanente (APP), para cumprimento da legislação vigente e 143 ha para infraestrutura como estradas, escritório, galpão de manutenção e almoxarifado (CARMO et al, 2016).

O espaçamento médio de plantio foi de 3x3 totalizando aproximadamente 1.112 mudas por hectare. Para o estudo foi estimado uma produtividade média de 220 m³/ha e idade de corte de 6 anos (CARMO et al, 2016).

Para o plantio, segundo Carmo et al (2016), cada equipamento apresenta uma quantidade total de emissões de CO₂ para o plantio e colheita. Supondo 1 anos de plantio, teremos uma produção total de tCO_{2e}/ha, considerando o consumo de diesel, gasolina e óleo lubrificante pelas máquinas agrícolas.

O consumo anual de combustíveis foi de 80.938,08 litros sendo que foram 71.008,56 litros de óleo diesel e 9.929,52 litros de gasolina e de lubrificantes foram 4.990,33 litros. O trator agrícola foi o que consumiu mais lubrificantes sendo 31,16 % do total consumido pela empresa (CARMO et al, 2016). A Tabela 4 mostra o total de emissões equivalentes originadas do consumo de combustível de cada máquina.

Tabela 4- Emissão de dióxido de carbono de cada equipamento utilizado.

Equipamento	Emissões totais (tCO₂e/ha)
Trator agrícola	0,31
Trator agrícola auto carregável	0,27
Caminhões	0,50
Camionete	0,07
Motosserra	0,11
Total	1,26

Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2016).

O valor é informado por tCO₂e/ha, no entanto para que seja possível fazer a análise e necessário o volume anual utilizado. Convertendo o valor de tCO₂e/ha para tCO₂e/ano.

As emissões do transporte entre a etapa agrícola e a etapa industrial são estimadas considerando a quantidade de diesel, consumida por caminhões para transportar, do local do plantio (São Pedro do Sul) até a cidade de Santa Maria incluindo a viagem de volta, a quilometragem e a quantidade de lenha. As emissões do transporte entre a etapa agrícola e a etapa industrial são estimadas a partir da Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo de combustível e geração de CO₂ no transporte de cargas.

Consumo Diesel l/1000(t.km)	Emissão MIN kgCO₂/1000 (t.km)	emissão MAX kgCO₂/1000 (t.km)
76	253,1	259,5
82,3	274,1	281
96	319,8	327,8

Fonte: Adaptado de WRI/GHG Protocol (2010), FIPE (2010), MME (2010) e, MT (2007).

As emissões da etapa de queima da lenha são calculadas por meio de valores obtidos pela literatura utilizando o fator de emissão que originou para cada um dos trabalhos analisados as tCO₂/ha convertida para tCO₂/ano.

Os parâmetros para o cálculo do CO₂ sequestrado pela árvore pela fotossíntese no seu crescimento lenha são calculadas por meio de valores obtidos pela literatura e estimados para o cenário em questão.

3.3 ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A caracterização da incerteza dos resultados experimentais permite avaliar quão bem as medições são realizadas em um trabalho, e o nível de confiança estatístico atribuído aos resultados. O foco da análise da incerteza experimental deste trabalho é fornecer informação suficiente para avaliação do grau de confiança dos resultados. Para tanto, são declarados todos os componentes dos equipamentos necessários para o emprego das técnicas de diagnóstico e as respectivas análises de incertezas individuais, incluindo uma descrição concisa da propagação das incertezas para os resultados. Assim sendo, a estimativa da incerteza é baseada na análise de erros sistemáticos e na quantificação da repetitividade dos experimentos.

A incerteza é fruto da imprecisão dos equipamentos de medição. O método de Kline-McClintock determina a incerteza propagando as incertezas individuais de cada fonte sobre essas medições (KLINE, McCLINTOCK, 1953; MOFFAT, 1982).

A representação da incerteza relativa dos resultados, u_{Total} , assumindo que os fatores que determinam as incertezas sejam todos independentes, é:

$$u_{Total} = \pm \left[\sum_{i=1}^n (u_i)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

onde u_i é cada uma das incertezas relativas às quantidades medidas e n é o número dessas quantidades que contribuem como fontes de incerteza para medidas.

3.3.1 Estimativa da incerteza no volume das toras

Nesta seção é apresentada uma análise da incerteza envolvida na obtenção dos resultados experimentais, em particular considerando o valor estimado do volume de toras. A

determinação da faixa de incerteza é dada pela estimativa de incerteza do equipamento utilizado para medição.

O elemento que contribui para a incerteza do volume das toras é o diâmetro e o comprimento. O diâmetro $D_t = 100 \text{ mm}$ e o comprimento $L_t = 1000 \text{ mm}$, foram medidos por uma trena de 0,5 mm de resolução. Portanto, a estimativa da incerteza relativa do diâmetro e comprimento é de $u_{Dt} = \pm 0,005$ e $u_{Lt} = \pm 0,0005$.

A equação da incerteza relativa do volume é obtida considerando a incerteza da trena conhecida é de:

$$u_v = \pm[(u_{Dt})^2 + (u_{Lt})^2]^{1/2} = 0,5\% \quad (17)$$

3.3.2 Estimativa da incerteza na temperatura

A temperatura da parede, foi medida por um termômetro infravermelho (Fluke 561; Fluke Corporation), segundo a informação do fabricante tem incerteza de 2%. Incerteza experimental devido a análise estatística das medidas foi de 2%.

A temperatura dos gases de exaustão, foi medida por um termômetro (Fluke 51; Fluke Corporation), segundo a informação do fabricante tem incerteza de 0,05%, considerando a incerteza do equipamento e do experimento (devido a emissividade o índice de refração do meio). Considerando os erros sistemáticos devido à radiação emitida pela sonda do termopar, a incerteza experimental foi de 5%. Esse erro sistemático pode ser subtraído, dos valores medidos, portanto a incerteza total da medida de temperatura pelo termopar é de 6 °C.

3.3.3 Estimativa da incerteza da concentração de CO na combustão incompleta.

Nesta seção é apresentada uma análise da incerteza envolvida na obtenção dos resultados experimentais da concentração de CO nos gases de exaustão.

Para a quantificação, foram realizadas medições das concentrações de gases, por meio do analisador de gases de combustão modelo Chemist 500x, da Seitron, qual tem sensores de medição de CO, C_xH_y e cálculos de CO_2 . Segundo a informação do fabricante tem incerteza de 5%, considerando a incerteza do equipamento e do experimento (ECIL, 2015). Considerando

os erros sistemáticos devido ao posicionamento do equipamento, variação da temperatura, tempo de amostragem a incerteza experimental foi de 5%.

Esse erro sistemático pode ser subtraído, dos valores medidos, portanto a incerteza total da medida de concentração de gases de exaustão foi de 7%.

3.3.4 Estimativa da incerteza para o caso de recirculação

Nesta seção é apresentada uma análise da incerteza proveniente da dificuldade de se determinar com exatidão o ponto requerido a partir da interpolação dos valores disponíveis nos gráficos os quais são apresentados no Anexo A, Anexo B, Anexo C e no Anexo D.

Nesta seção é apresentada uma análise da incerteza envolvida na obtenção do calor trocado pela radiação gasosa. Os elementos que contribuem para a incerteza do calor trocado é a absorvidade e emissividade do gás, a espessura efetiva da camada gasosa.

Absorvidade do gás, α_g , depende de f_c , f_w , ε_c , ε_w , Δ_ε , T_p e T . A incerteza de T_p e T , é respectivamente 2 % e 5 %. O f_c é 0 % pois no gráfico todos os valores a 1 atm, se encontram no mesmo ponto. O f_w , tem uma incerteza no eixo x $u_{f_w x}$ de 3 % e no eixo y $u_{f_w y}$ de 4%. A equação da incerteza relativa do valor de f_w , é obtida considerando a incerteza do eixo x e y que é de cerca de 5%.

O ε_w , tem uma incerteza no eixo x $u_{\varepsilon_w x}$ de 4% e no eixo y $\varepsilon_{f_w y}$ de 1%. A equação da incerteza relativa do valor de ε_w , é obtida considerando a incerteza do eixo x e y que é de cerca de 4%.

O ε_c , tem uma incerteza no eixo x $u_{\varepsilon_c x}$ de 4 % e no eixo y $\varepsilon_{f_c y}$ de 2%. A equação da incerteza relativa do valor de ε_w , é obtida considerando a incerteza do eixo x e y que é entorno de 4%.

O Δ_ε , tem uma incerteza no eixo x $u_{\Delta_\varepsilon x}$ de 0% , pois no gráfico todos os valores a 0,5 atm, e no eixo y $\varepsilon_{\Delta_\varepsilon y}$ de 4%. A equação da incerteza relativa do valor de $\varepsilon_{\Delta_\varepsilon}$, é obtida considerando a incerteza do eixo x e y que é entorno de 4%.

A equação da incerteza relativa a absorvidade do gás, α_g , é a equação 19,

$$u_{\alpha_g} = \pm \left[(u_{\varepsilon_c})^2 + (u_{\varepsilon_w})^2 + (u_{f_w})^2 + (u_{f_c})^2 + (u_{\Delta_\varepsilon})^2 + (u_T)^2 + (u_{T_p})^2 \right]^{1/2} = 9\% \quad (18)$$

A equação da incerteza relativa emissividade do gás, ε_g é obtida pela equação 20,

$$u_{\varepsilon g} = \pm \left[(u_{\varepsilon c})^2 + (u_{\varepsilon w})^2 + (u_{f w})^2 + (u_{f c})^2 + (u_{\Delta \varepsilon})^2 \right]^{1/2} = 7\% \quad (19)$$

A espessura efetiva da camada gasosa, L_e , é obtida utilizando os valores de volume dos gases de emissão e a área superficial de contato com o gás. Devido aos cálculos para estimar o volume de gases por meio de sua densidade e a área superficial desejada para o contato com o gás, a incerteza relativa ao L_e é de 10%.

A radiação gasosa em feixes tubulares, \dot{q}_g , depende da constante de Boltzmann, A área de troca de calor, o fator f de correção para invólucros cinzas, a Emissividade do gás, ε_g , e a absorvidade do gás, α_g . A incerteza relativa a radiação gasosa é cerca de 16%.

3.3.5 Estimativa da incerteza para o caso regenerativo

Nesta seção é apresentada uma análise da incerteza proveniente da dificuldade de se considerar com exatidão a concentração dos gases de exaustão. Assim, primeiramente foi considerado que nos gases de exaustão existem apenas nitrogênio, monóxido e dióxido de carbono e água, nas proporções consideradas por Welter (2017) com a incerteza de 5%, tanto para a massa como para o calor específico da mistura de gases. A incerteza de T_i e T_f , é respectivamente 2% e 5%. Sendo assim, a incerteza para o caso regenerativo é de 10%.

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

As análises de viabilidade financeira dos dois sistemas levaram em consideração os custos e coeficientes técnicos apresentados na Tabela 6.

A construção dos fluxos de caixa ocorreu com base nas estimativas de entradas (receitas) e saídas (custos) de cada cenário no tempo. O resultado líquido (receita menos custos) é utilizado como referência, no qual todos os valores são atualizados por meio de fórmulas de acumulação ou desconto de juros.

Desse modo, para a prognose econômica das alternativas de investimentos foram analisados os custos envolvidos. Para avaliar os cenários utilizaram-se métodos que consideram os valores monetários no tempo, principalmente por serem mais confiáveis e eficientes. As análises de viabilidade financeira dos dois casos levaram em consideração os custos e coeficientes técnicos apresentados na Tabela 6.

Desta forma, os projetos foram avaliados por meio dos critérios: Valor presente líquido (VPL) e o valor atual equivalente (VAE), taxa interna de retorno (TIR) e o payback (REZENDE; OLIVEIRA, 2013).

Tabela 6 – Informações referentes a custo e taxa para o cálculo da viabilidade.

INFORMAÇÕES	VALOR	FONTE
Preço da tubulação de exaustão	80,00	LEONARDO, 2017
Manta Isolante de Lã De Vidro	60,00	KONMAQ, 2017
Tocador de calor	800,00	FDOLINSKI, 2017
Taxa de juros Selic (% a.a.)	7,00	BCB, 2017
Custo da lenha (R\$/m ³)	83,00	-
Consumo de lenha (m ³ /dia)	0,50	-

Os critérios de análise econômica para avaliação do projeto são dados pelas equações a seguir. O VPL (Valor Presente Líquido) é basicamente, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos somados a um custo inicial estariam valendo atualmente. Para ser viável, o projeto deve ter $VPL \geq 0$ e é obtido pela equação 20,

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} \quad (20)$$

onde C_j é o custo no final do ano j , R_j é a receita no final do ano j , i é a taxa de desconto, n é a duração do projeto, em anos; t é o número de períodos de capitalização.

O VAE (Valor anual equivalente) é o método que consiste em achar a série uniforme equivalente (A) ao fluxo de caixa do investimento em análise se o $VAE \geq 0$ o projeto é viável, segundo a equação 21,

$$VAE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1](1+i)^{nt}}{(1+i)^{nt} - 1} \quad (21)$$

onde o VPL é o valor presente líquido, i é a taxa de desconto, n é a duração do projeto em anos (REZENDE E OLIVEIRA, 2013).

O TIR é a taxa interna de retorno é a taxa que iguala os recebimentos futuros com os investimentos feitos no projeto, é a taxa de desconto para a qual tem-se $VPL=0$, então a TIR é a taxa i para a qual a equação 22,

$$\sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} = 0 \quad (22)$$

onde C_j é o custo no final do ano j , R_j é a receita no final do ano j , i é a taxa de desconto, n é a duração do projeto, em anos; t é o número de períodos de capitalização.

O payback, é um método muito usado para permitir a avaliação do risco por meio do tempo necessário para recuperar o capital investido. O payback é obtido pela equação 23,

$$\text{Payback} = \frac{C}{R} \quad (23)$$

onde C é o custo no final do ano , R é a receita no final do ano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, a saber: o balanço do dióxido de carbono e os custos de produção foram feitos por meio de revisão da literatura e análise de relatórios técnicos fornecidos pela guarnição; análise dos processos de aproveitamento de energia foram realizadas empregando soluções algébricas de termodinâmica; análise financeira foi feita com base em teorias econômicas.

4.1 CICLO DO DIÓXIDO DE CARBONO

Este tópico apresenta o ciclo do dióxido de carbono por meio de estimativas de emissões na fase agrícola, transporte e na fase industrial, seguido do sequestro correspondente ao crescimento da árvore de *Eucalyptus*. Na fase agrícola foram utilizadas informações referentes a empreendimentos florestais considerando o plantio, manutenção e colheita (SILVA, 2007). O transporte foi avaliado segundo o consumo de combustível necessário para a entrega da lenha e retorno do caminhão a empresa de fornecimento (SEIXAS, 2001). A fase industrial corresponde a produção de energia.

A taxa de consumo de lenha pela caldeira da guarnição foi estimada como sendo de 182,5 m³/ano, o que equivale a 5 hectares de lenha de *Eucalyptus* por ano. Estes valores foram utilizados como base para estimar as emissões e sequestro de CO₂ neste estudo de caso, a fim de permitir comparações proporcionalmente com resultados apresentados literatura.

4.1.1 Fase agrícola e transporte da lenha

A Tabela 7 mostra os resultados da avaliação da emissão de CO₂ na fase agrícola, os quais visam quantificar as emissões do dióxido de carbono. Os equipamentos utilizados nessa fase foram o trator agrícola, o trator agrícola auto carregável, o caminhão, a caminhonete e a motosserra.

O total de emissões oriundas dos equipamentos foi de 1,2 tCO₂e/ha, vide Tabela 4 na seção 3.2.3. Portanto, neste estudo a quantidade total de CO₂ emitida pelos equipamentos foi de 6,3 tCO₂e/ano. A camionete emitiu o menor valor, 0,3 tCO₂e/ha, a motosserra, 0,5 tCO₂e/ha, o trator agrícola auto carregável, 1,3 tCO₂e/ha, o trator agrícola, 1,5 tCO₂e/ha e, por último, o caminhão com 2,5 tCO₂e/ha. O caminhão apresentou maior emissão, representando 40% do

total. Os tratores apresentam emissão considerável, 45%, e os 15% restantes são devidos à camionete e motosserra.

Tabela 7- Emissão de dióxido de carbono de cada equipamento.

Equipamento	Emissões totais (tCO₂e/ano)
Trator agrícola	1,5
Trator agrícola auto carregável	1,3
Caminhão	2,5
Camionete	0,3
Motosserra	0,5
Total	6,3

Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2016).

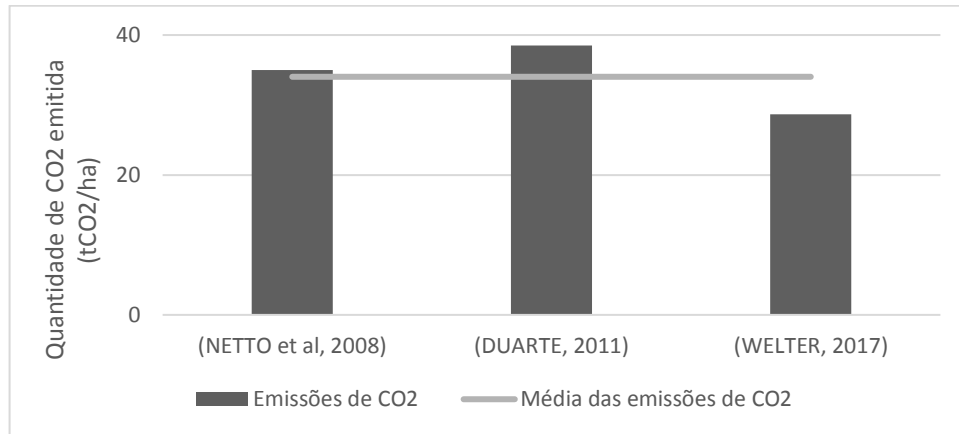
Apesar de alguns trabalhos não considerarem a fase agrícola na cadeia de valor da lenha esta fase é de fundamental importância para o conceito berço ao berço. O balanço de todas as etapas do processo de obtenção de energia visa alcançar a sustentabilidade ambiental e a verificação do ciclo neutro do CO₂. Portanto, a análise detalhada de cada fase contribui para um resultado completo.

A segunda etapa da fase agrícola, compreende as emissões de CO₂ originadas pelo transporte da lenha. A guarnição recebe 30 m³ de lenha a cada 2 meses e a distância percorrida entre as cidades de São Pedro do Sul e Santa Maria é de 77,2 km (ida e retorno), como apresentado no Apêndice B. Assim sendo o valor estimado para esse caso foi de 1,8 tCO₂/ano.

4.1.2 Fase industrial

A Figura 9 mostra os resultados da avaliação da fase industrial, os quais foram baseados em estudos que quantificaram as emissões do dióxido de carbono produzido pela combustão de lenha de Eucalyptus (DUARTE, 2011; NETTO et al., 2008; WELTER, 2017).

Figura 9 - Emissões totais de CO₂ (tCO₂/ha) pela queima de lenha de Eucalyptus, para vários autores.



Fonte: Autor.

As emissões de CO₂ mostraram um comportamento diretamente proporcionais ao teor de carbono existente na composição da lenha (DUARTE, 2011; NETTO et al., 2008). Por outro lado, o teor de umidade que é um fator importante para a redução das emissões apresentou comportamento indiretamente proporcional as emissões de CO₂ (WELTER, 2017; DUARTE, 2011).

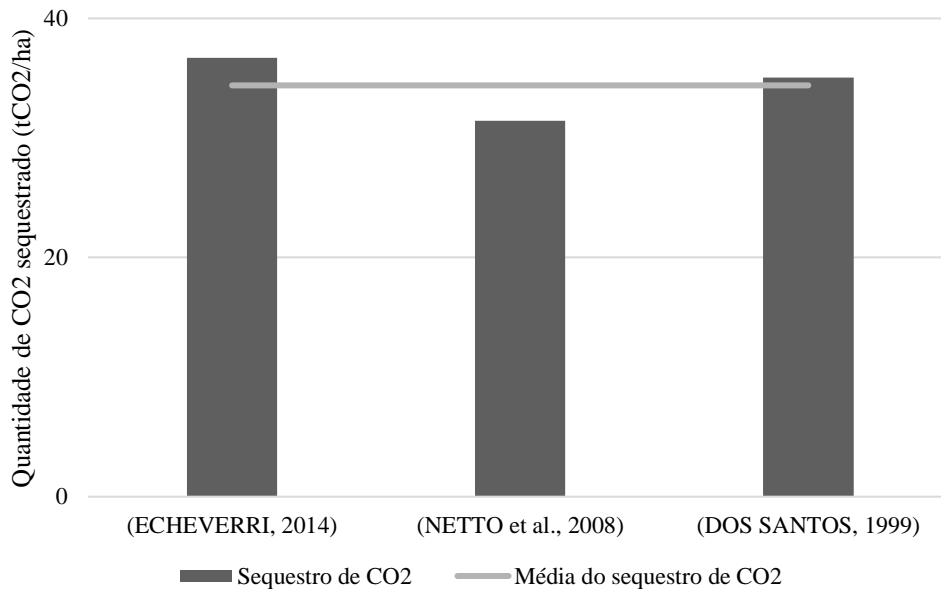
Valores de teor de umidade acima de 30% provocam um aumento da quantidade de partículas não queimadas (CORE et al, 1982). No entanto, a lenha com teor de umidade abaixo de 20% apresenta alta velocidade da reação. Isso pode levar a uma deficiência de oxigênio durante o processo, provocando aumento da produção de CO e CH₄ (SIMONEIT, 2002; DUARTE (2011).

O valor médio das emissões produzidas pela queima de lenha foi de 34,04 tCO₂/ha, estimado com base nos valores encontrados a partir dos trabalhos disponíveis na literatura. Dessa maneira, na perspectiva deste estudo com a utilização de 0,82 ha/ano quantidade total de CO₂ emitida foi de 28,23 tCO₂ em um ano.

4.1.3 Sequestro de CO₂

A Figura 10 mostra os resultados da avaliação do sequestro de CO₂, os quais foram baseados em estudos que quantificam o sequestro do dióxido de carbono durante o processo de crescimento da árvore (ECHEVERRI, 2014; NETTO et al. 2008, DOS SANTOS, 1999).

Figura 10 – Quantidade de total de CO₂ (tCO₂/ha) sequestrada pela árvore durante o processo de crescimento, para vários autores.



Fonte: Autor.

Os valores de CO₂ sequestrado mostraram o comportamento diretamente proporcional à incidência do sol (DOS SANTOS, 2014; ECHEVERRI, 2014; NETTO et al., 2008).

O valor médio da quantidade de CO₂ sequestrado foi de 34,4 tCO₂/ha, o qual foi estimado com base nos valores encontrados a partir dos trabalhos disponíveis na literatura. Dessa maneira, na perspectiva deste estudo a quantidade total de CO₂ sequestrada foi de 28,5 tCO₂ em um ano.

O Eucalyptus possui 25,6% de folhas, galhos, cascas e raiz que sequestram o dióxido de carbono durante o crescimento da árvore. Essa porção de biomassa não participa da emissão no balanço de CO₂ por não ser queimada na caldeira (NETTO et al, 2008). Portanto, para nesse estudo foi calculado a quantidade total sequestrada de 35,6 tCO₂ em um ano.

A Tabela 8 mostra os resultados resumidos das avaliações de emissões dos equipamentos, transporte e fase industrial e do sequestro de CO₂.

Tabela 8 – Resumo do ciclo do dióxido de carbono.

Emissões e sequestro	tCO₂/ano
Emissões dos equipamentos fase agrícola	6,3
Emissões no transporte	1,8
Emissões na fase industrial	28,2
Emissões total	36,3
Sequestro	35,6

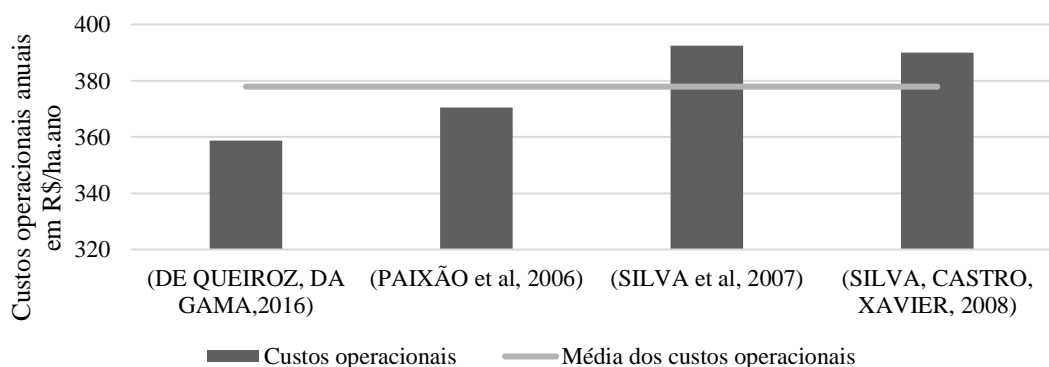
Fonte: Autor.

No ciclo de produção de energia foi considerado que anualmente 36,3 tCO₂ são emitidas na fase agrícola em regime padrão de operação, incluindo o transporte e a fase industrial. Sendo assim, 60% do total de CO₂ equivalente emitido na geração de energia foi sequestrado pela árvore para compor sua estrutura. Portanto, o ciclo neutro de carbono é perfeitamente viável, sendo necessário que 40% das árvores reflorestadas não sejam queimadas. Essas podem ser destinadas a outros fins, como por exemplo a fabricação de móveis, construção civil, etc. (LIMIRO, 2009).

4.2 CUSTOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

A Figura 11 mostra os resultados da avaliação dos custos operacionais anuais, os quais foram baseados em estudos dos custos operacionais para a produção de lenha de Eucalyptus (DE QUEIROZ, DA GAMA, 2016; PAIXÃO et al. 2006; SILVA et al. 2007; SILVA, CASTRO, XAVIER, 2008).

Figura 11 - Custos operacionais anuais do povoamento de Eucalyptus, para vários autores.



Fonte: Autor.

Os custos operacionais mostraram um comportamento diretamente proporcional ao manejo e tecnologia utilizada (DE QUUEIROZ, DA GAMA, 2016; PAIXÃO et al. 2006; SILVA et al. 2007; SILVA, CASTRO, XAVIER, 2008).

O valor do custo operacional foi de 377,89 R\$/ha.ano, o qual foi estimado com base nos valores encontrados a partir dos trabalhos disponíveis na literatura. Dessa maneira, na perspectiva deste estudo o custou 9,40 R\$/m³ em um ano. Os trabalhos consultados não consideraram a depreciação das máquinas, arrendamento da terra e impostos.

A Tabela 9 apresenta os custos fixos referentes a caldeira do quartel da guarnição de Santa Maria, sendo estas informações relacionadas ao custo de aquisição da lenha, manutenção, operação e salários.

Tabela 9 - Custos Fixos referentes a caldeira do quartel da guarnição de Santa Maria.

Informações	Custo (R\$/ano)
Aquisição de lenha	14.940,00
Manutenção	7.440,00
Operação	3.360,00
Comprador	116,64
Operador	18.000,00
Total	43.856,64

Fonte: Autor.

O quartel compra por meio de licitação a lenha de Eucalyptus com o preço de 83,00 R\$/m³. O gasto anual para a aquisição de lenha pelo quartel é de R\$ 14.940,00. O gasto estimado com o salário do comprador é de 116,64 R\$/ano, o qual foi estimado com base no salário do comprador e o tempo necessário para fazer a licitação.

O custo médio de manutenção para o funcionamento da caldeira foi estimado em 7.440,00 R\$/ano, que inclui o custo de limpeza da tubulação, câmara de combustão, câmara de recolha de cinzas e o custo com o tratamento da água.

O custo médio de operação foi estimado em 3.360,00 R\$/ano, ou seja, o custo da energia elétrica necessária para bombear a água e o custo da água, devido à parte da água perdida na linha e vapor que escapa em válvulas de alívio de pressão.

O gasto com o salário do operador foi estimado em 18.000,00 R\$/ano. Esse operador é encarregado de manter a caldeira na temperatura e pressão de trabalho, adicionando lenha e verificando o nível da água.

O custo total anual para utilização da caldeira foi estimado em R\$ 43.856,64, abrangendo a aquisição de lenha, a mão de obra, a manutenção e a operação. O valor para a aquisição da caldeira abordada no estudo foi de R\$ 108.000,00 no ano de 2017, considerando que esse equipamento possui tempo estimado de utilização de 10 anos.

No capítulo a seguir será considerado os casos propostos para melhoria da utilização da energia gerada na caldeira por meio da combustão de lenha.

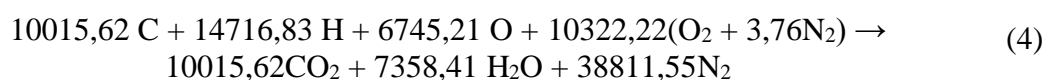
4.3 ANÁLISE DA TERMODINÂMICA DA CALDEIRA

Este subcapítulo apresenta a análise térmica de dois casos proposto, o caso de recirculação dos gases de exaustão e o caso regenerativo do condensado. Os valores de composição em massa do Eucalyptus foram utilizados para calcular as reações de combustão completa e incompleta. A teoria da radiação de gases e o processo regenerativo no ciclo Rankine foram considerados na análise teórica, a fim de propor melhorias no processo de aproveitamento de energia.

4.3.1 Reação de combustão

Na reação de combustão completa ocorre somente formação de CO₂, H₂O, N₂ e na combustão incompleta, além dos gases citados, a produção de CO e CH₄ que são combustíveis. Como apresentado na seção 3.2.1 na reação 1, a combustão completa pode ser calculada utilizando a composição em massa da madeira de Eucalyptus.

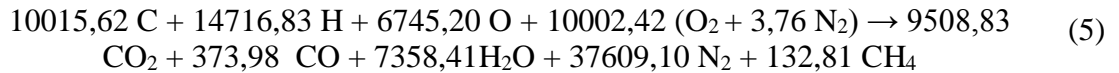
A reação de combustão completa é representada na reação 4, em base molar:



Na reação 4, todo o oxigênio disponível nos reagentes é consumido na reação e o carbono produz somente moléculas de CO₂, o hidrogênio somente moléculas de água e o nitrogênio não participa da reação.

A combustão incompleta foi fundamentada por meio do estudo proposto por Welter (2017) conforme mostra a equação 2.

Os valores de hidrocarbonetos equivalentes produzidos pela combustão incompleta podem ser expressos em uma quantidade determinada de metano (SILVA, 2009). Sendo assim, foi obtida a reação 5.



A combustão incompleta tem como produtos CO_2 , H_2O e N_2 como na combustão completa, por outro lado, apresenta também o CO e o CH_4 que são gases nocivos e combustíveis. Os gases monóxido de carbono e metano apresentam efeitos negativos na saúde (RIBEIRO, 2008). O CO quando inalado liga-se à hemoglobina, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue (SANTOS et al, 2001). O metano por sua vez é eficiente na captura de radiação e assim seu impacto sobre o efeito estufa é mais de 20 vezes maior do que o CO_2 (SOARES, 2009).

O monóxido de carbono e metano podem ser simplesmente queimados para reduzir os seus impactos (DAVIES et al, 2000; TSGA, 2009), sendo que a poder calorífico superior para CO é de 282,5 kJ/mol e para o CH_4 é de 888,6 kJ/mol (MOORE, 1976). Assim, o CO e o CH_4 colaboram para o aumento da produção de energia no caso de recirculação, como será visto na seção 4.3.2.

A Tabela 9 mostra a composição dos gases de exaustão em termos da massa, da densidade e da fração em massa de cada elemento, considerando a combustão completa e incompleta. Estes valores foram utilizados neste trabalho para os cálculos termodinâmicos.

Tabela 10 - Composição dos gases de exaustão para combustão completa e incompleta.

(continua)

	Massa (kg)	Densidade (kg/m³)	Fração (%)
Combustão completa			
CO_2	440,69	1,12	26,55
H_2O	132,45	0,46	7,98
N_2	1086,72	0,71	65,47
Combustão incompleta			

CO ₂	425,48	1,11	26,32
H ₂ O	129,02	0,45	7,98
N ₂	1053,48	0,70	65,17

Tabela 11 - Composição dos gases de exaustão para combustão completa e incompleta.

(continuação)

	Massa (kg)	Densidade (kg/m³)	Fração (%)
CO	7,01	0,70	0,43
CH ₄	1,53	0,40	0,09

Fonte: Adaptado de Bazzo (1995).

4.3.1.1 Casos analisados

Essa seção destina-se a analisar dois casos para melhorar o aproveitamento da energia produzida pela combustão na caldeira. O primeiro caso é o da recirculação dos gases e exaustão para dentro da caldeira, a fim de transmitir energia dos gases quentes pelo mecanismo de radiação para o interior da câmara de combustão e, também, utilizar os combustíveis não queimados presentes nos gases de exaustão. O segundo caso é o de regeneração da energia dos gases de exaustão para o pré-aquecimento do condensado, visando o aproveitamento da entalpia do sistema.

O caso da recirculação dos gases quentes não foi encontrado trabalhos utilizando recirculação de gases de exaustão de caldeiras a lenha (SAIDUR et al., 2011). O processo de recirculação foi aplicado em motores diesel de pequeno porte, gerando uma economia de aproximadamente 5% (SAQUAIELLA, 2010).

O caso regenerativo é uma importante variação do ciclo Rankine, sendo um processo consolidado e amplamente utilizado em caldeiras (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2007).

Este trabalho avaliou o caso de recirculação e o caso regenerativo analiticamente, a fim de produzir informações acerca da viabilidade de implantação desses métodos na caldeira da guarnição de Santa Maria.

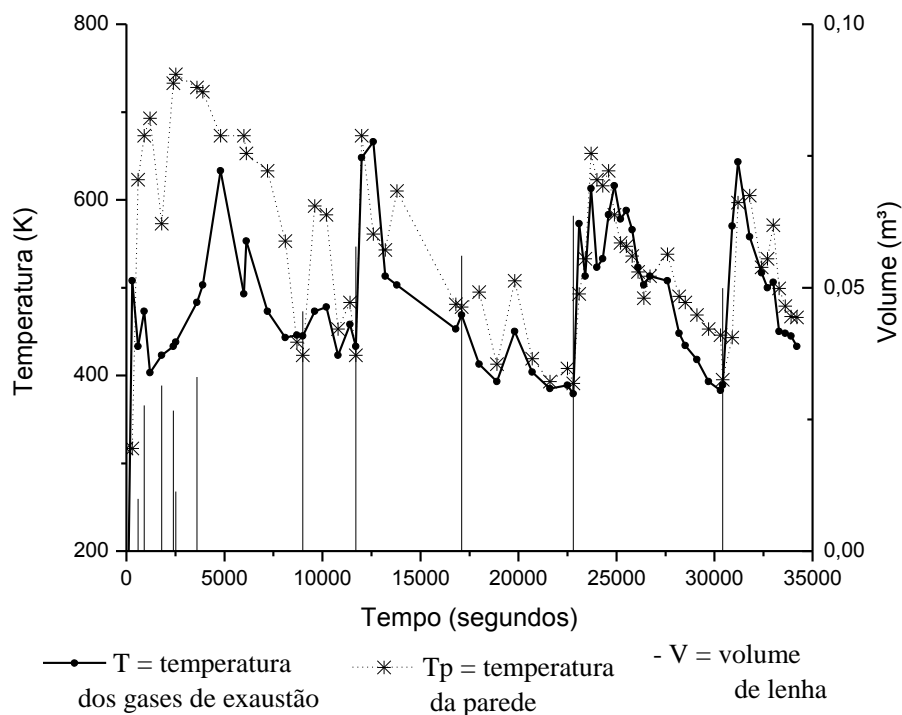
Em ambos os casos, o consumo de biomassa foi verificado conforme a rotina diária. O volume de lenha utilizada como combustível durante uma hora de utilização da caldeira é em média de 0,05 m³ (vide Apêndice A).

A temperatura dos gases de exaustão apresentou inicialmente um valor de 293 K, com aumento brusco devido à disponibilidade de combustível, porém como a entrada de lenha não é contínua os valores de temperatura apresentam uma tendência decrescente até atingir em torno de 400 K, sendo necessário a entrada de mais combustível para retomar o processo.

O valor inicial da temperatura medido na parede da caldeira foi de 317 K, e a diferença inicial entre T_p e T , a qual está em temperatura ambiente, indica que a caldeira está em repouso. No entanto, a temperatura inicial em T_p mostra que a caldeira retém o calor devido ao isolamento, visto que o isolante térmico utilizado na caldeira é um material que evita a dissipação de energia devido à alta resistência térmica (INCROPERA; WITT, 1998). No instante de tempo 2.500 s foi observado o maior valor de temperatura da parede, 743 K. No entanto, a maior temperatura T foi observada no tempo de 12.600 s e foi de 666 K.

A Figura 12 apresenta as medidas de temperatura da parede, de temperatura dos gases de exaustão e o volume de biomassa adicionada ao longo do tempo, durante um dia de operação.

Figura 12 – Fluxo diário de lenha na operação da caldeira da guarnição.



Fonte: Autor.

A Figura 12 mostra que, cerca de 40% do total de lenha utilizada num dia foi adicionado até o instante de 3000 s. Com o passar do tempo foi acrescentado mais lenha conforme requerido pelo sistema, a fim de manter a pressão de trabalho em 50 kPa.

A média das temperaturas medidas foi de 483 K, que é aproximadamente 10% superior à média da temperatura do gás de exaustão previsto no projeto da caldeira, independente da biomassa utilizada como combustível (DO NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010).

A curva T_p apresenta um comportamento similar a T possuindo a tendência crescente com o crescimento da disponibilidade de biomassa. Porém, nota-se um atraso no aumento da temperatura devido à presença de umidade na lenha, a qual consome calor para evaporar. Posteriormente, ocorre um aumento brusco nas temperaturas, T e T_p , seguido de uma suave redução. Portanto, é necessário o monitoramento constante do processo por um profissional que insere lenha no momento oportuno para manter os níveis de operação adequados.

4.3.2 Recirculação

Os resultados para o caso de recirculação dos gases de exaustão foram obtidos fazendo uso dos cálculos para radiação em feixes tubulares (BAZZO, 1995) e, também da reação de combustão conforme as reações 4 e 5.

A Tabela 11 apresenta a composição em massa de cada molécula presente no gás de exaustão, considerando a combustão completa e incompleta.

Tabela 12 - Composição do gás de exaustão.

Molécula	Combustão completa (%)	Combustão incompleta (%)
CO ₂	26,5	26,3
H ₂ O	8,0	8,0
N ₂	65,5	65,2
CO	-	0,4
CH ₄	-	0,1

Fonte: Adaptado de Welter (2017) e Bazzo (1995).

Os gases de exaustão para a combustão completa são compostos por CO₂, H₂O e N₂, nas proporções em massa de 26,5%, 8,0% e 65,5%, respectivamente. No entanto, considerando a combustão incompleta a composição do gás é de CO₂, H₂O, N₂, CO e CH₄ sendo respectivamente de 26,3%, 8,0% e 65,2%, 0,4%, 0,1%, em massa.

A solução das equações de radiação em feixes tubulares requer o dimensionamento da área de emissão de radiação no interior da câmara de combustão, as medidas de temperatura dos gases e na parede e o fluxo de geração de calor devido à combustão.

A área foi considerada como um jato de formato cilíndrico com raio de 0,05 m e comprimento de 1,5 m, totalizando 0,5 m².

A temperatura média dos gases de exaustão, T, foi de 483 K, e a temperatura média da parede, T_p, foi de 531 K.

O consumo de lenha em um dia de funcionamento da caldeira foi de 0,05 m³/h. Portanto, a taxa de fluxo de calor calculada nesse estudo foi de 114,7 kJ/s. Esse valor é próximo do encontrado em outros trabalhos na literatura para a combustão de lenha (OLIVEIRA FILHO, 1987; SILVA et al., 1991).

Os parâmetros utilizados para o cálculo de radiação gasosa de CO₂ e H₂O em feixes tubulares considerando a configuração de temperatura e pressão abordada neste estudo de caso são mostrados na Tabela 12.

Tabela 13 – Parâmetros utilizados para o cálculo da radiação gasosa emitida por CO₂ e H₂O em feixes tubulares, nas condições desse estudo de caso.

Parâmetros	Unidade	Recirculação	
		Combustão completa	Combustão incompleta
A	m ²	0,50	0,50
vt	m ³ /s	0,06	0,06
vg	m ³	0,01	0,01
L _e	m	0,05	0,05
ε _c	Wm ⁻² K ⁻⁴	0,18	0,18
ε _w	Wm ⁻² K ⁻⁴	0,15	0,15
Δε	Wm ⁻² K ⁻⁴	0,004	0,004
ε _g	Wm ⁻² K ⁻⁴	0,34	0,34
α _g	Wm ⁻² K ⁻⁴	0,32	0,32
q _g	kJ/s	0,16	0,16
q _{CO2}	kJ/s	-	0,36
q _{CH4}	kJ/s	-	0,43
f _c	-	1,00	1,00
f _w	-	1,10	1,10

Fonte: Adaptado de Bazzo (1995).

Para a combustão completa foi encontrado a espessura efetiva da camada gasosa, L_e, de 0,05 m, com uma área superficial em contato com o gás e o volume do gás de 0,50 m² e 0,01 m³,

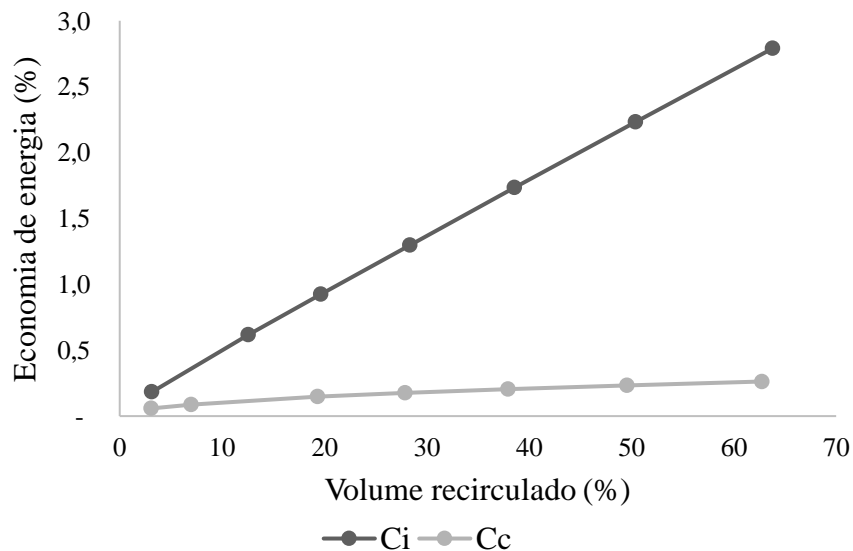
respectivamente. A emissividade do CO_2 , ε_w , de $0,18 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, a emissividade da água, ε_w , de $0,15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, o fator de correção para a emissividade do CO_2 , f_c , de 1,00, fator de correção para a emissividade da água, f_w , de 1,10 e o fator de correção devido à presença simultânea dos gases CO_2 e H_2O , $\Delta\varepsilon$, de 0,004 (BAZZO, 1995).

O valor de emissividade do gás, ε_g , encontrado neste estudo foi de $0,34 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, que corrobora com os valores encontrados por Bizzo (2003) para combustíveis sólidos. A absorvidade do gás, α_g , foi de $0,32 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Assim sendo, considerando o fator de correção para invólucros cinzas, f , de 0,99, a radiação gasosa em feixes tubulares, q_g , calculada para esse caso foi de 0,28 kJ/s.

Os parâmetros encontrados na combustão completa são iguais aos da combustão incompleta, visto que, na radiação em feixes tubulares somente há participação do CO_2 e da H_2O . Porém, conforme apresentado na Tabela 10, na combustão incompleta também ocorre a formação de moléculas CO e CH_4 , cuja proporção em base mássica foi de 0,4 e 0,1% do total, respectivamente (WELTER, 2017).

A Figura 13 mostra a porcentagem de economia de energia em função das porcentagens de gás recirculado.

Figura 13 – Comportamento da economia de energia em função da porcentagem de gases de exaustão que retorna para a caldeira, considerando a combustão completa, C_c , e incompleta, C_i .



Nota-se que, a economia de energia em função do volume de gases de exaustão recirculado apresentou comportamento linear, ou seja, foi observado uma redução no consumo de lenha diretamente proporcional ao retorno dos gases de exaustão. Além disso, o processo de combustão incompleta apresentou uma economia de aproximadamente cinco vezes se comparado com a combustão completa, devido à presença de CO e CH₄. Sendo assim, a recuperação dos gases de exaustão é vantajosa devido à redução na emissão de gases poluentes para a atmosfera, conforme discutido na seção 4.3.1.

A taxa de retorno dos gases foi estipulada em 20%, a fim de criar um cenário para a comparação com os resultados obtidos no caso regenerativo, apresentado na seção 4.3.3. Esse valor de taxa de retorno foi proposto considerando a aplicação deste processo na caldeira, sem a necessidade de utilizar um sistema de ventilação para redirecionar parte dos gases de exaustão. Na prática, o fechamento parcial da chaminé, obstrui a saída dos gases de exaustão. Isto promove um aumento de pressão na tubulação, permitindo assim o retorno parcial dos gases diretamente para a câmara de combustão (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006). Essa etapa do trabalho visa exclusivamente estimar a economia gerada pela recirculação dos gases. Portanto, não foi abordada uma análise detalhada para determinar o limite máximo de recirculação.

A Tabela 13 apresenta o gasto com a compra de lenha e a economia gerada pelo processo de aproveitamento de energia pela recirculação dos gases, considerando a combustão completa e incompleta.

Tabela 14 – Custo do combustível e economia prevista considerando a recirculação de 20% dos gases de exaustão, para a combustão completa e incompleta

Custo total	Economia	
	Combustão completa	Combustão incompleta
14.940,00 R\$/ano	21,77 R\$/ano	138,34 R\$/ano

Fonte: Autor.

Os resultados indicam uma economia de 0,14% no consumo da lenha para a combustão completa, que representa 21,78 R\$/ano. Além disso, considerando que o CO e CH₄ correspondem a 0,5% em massa nos produtos da combustão e que retornam na mesma

proporção juntamente com os gases de exaustão, a economia alcançada para a combustão incompleta foi de 0,98%, que representa 138,34 R\$/ano.

4.3.3 Regeneração

A Tabela 14 relaciona os parâmetros termodinâmicos fundamentais para a análise energética no caso regenerativo, considerando a combustão completa e incompleta.

Tabela 15 – Parâmetros termodinâmicos obtidos para o caso regenerativo, considerando a combustão completa e incompleta.

Parâmetros	Unidade	Combustão completa	Combustão incompleta
Calor específico	kJ/kgK	1,29	1,11
m_{mist}	kg	1.659,86	1.616,52
q_e	kJ	349.016,39	293.119,44
Eficiência	%	8,89	7,46
Economia	R\$/ano	1.328,66	1.115,87

Fonte: Autor.

m_{mist} = massa da mistura, q_e = calor de exaustão, eficiência é a porcentagem de redução consumo de energia para gerar a mesma quantidade de energia, economia é a redução do custo anual.

Os resultados foram obtidos baseando-se no rendimento térmico, considerando que apresenta um aumento de 100% com o processo regenerativo (VAN WYLEN, 1995). Na combustão completa e incompleta o calor específico do gás de exaustão foi de 1,29 kJ/kgK e 1,11 kJ/kgK, e a massa foi de 1.659,86 kg e 1.614,37 kg, respectivamente.

O calor dos gases de exaustão, considerando as temperaturas medidas nesse trabalho, foi de 349.016,39 kJ e 293.119,44 kJ, na combustão completa e incompleta, respectivamente. Assim, a redução do consumo de energia para a combustão completa foi de 8,89%, o que representa 1.328,66 R\$/ano.

4.4 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica para os processos de aproveitamento de energia propostos neste estudo foi realizada num horizonte de planejamento de 10 anos. O investimento previsto para o caso de recirculação foi de R\$ 200,00, com tubulação, isolamento e mão de obra. Para o caso

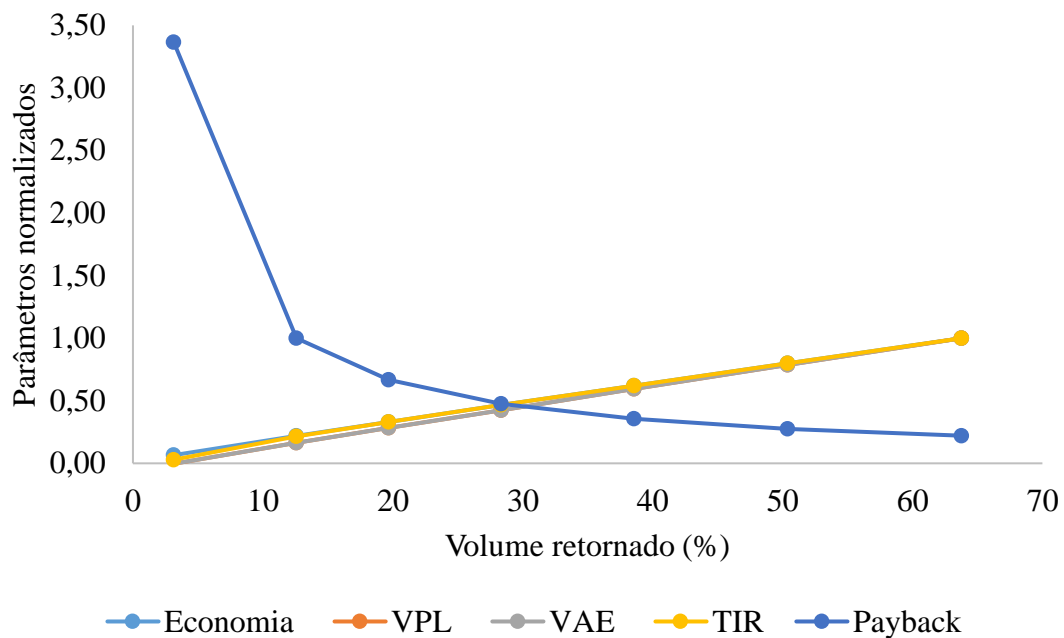
regenerativo o investimento foi de R\$ 1.000,00, considerando a necessidade de um trocador de calor e mão de obra especializada. Os fluxos de caixa para o caso de recirculação com combustão completa e combustão incompleta são apresentados nos Apêndices C e D, respectivamente.

4.4.1 Processo de recirculação

Os valores encontrados para os parâmetros financeiros, considerando a combustão incompleta, indicam a inviabilidade econômica do projeto devido ao investimento inicial.

A Figura 14 mostra os parâmetros financeiros normalizados para a combustão incompleta, considerando que não há necessidade de ventilação forçada.

Figura 14 - Evolução dos parâmetros financeiros em função da proporção de recirculação dos gases de exaustão, considerando combustão incompleta.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Figura 14 mostram uma tendência crescente da economia de combustível de acordo com o aumento da proporção de recirculação dos gases de exaustão para a combustão incompleta. Os parâmetros financeiros indicam a viabilidade econômica do projeto para recirculações superiores a 5%.

Conforme discutido na seção 4.3.2, para a recirculação de 20%, tem-se o VPL igual a R\$ 771,68, o VAE igual a 109,87 R\$/ano, a TIR de 69% e o payback de 1,45 anos.

Os fluxos de caixa para o caso de recirculação com combustão completa e combustão incompleta são apresentados nos Apêndices C e D, respectivamente.

4.4.2 Processo regenerativo

A Tabela 15 apresenta os parâmetros financeiros calculados para o caso regenerativo, considerando a combustão completa e incompleta, respectivamente.

Tabela 16 - Resumo dos parâmetros financeiros calculados para o caso regenerativo.

Parâmetros	Combustão completa	Combustão incompleta
VPL (R\$)	8.331,94	6.837,40
VAE (R\$/ano)	1.186,28	973,49
TIR (%)	133	112
Payback (anos)	0,75	0,90

Fonte: Autor.

Nota-se na Tabela 14 que para a combustão completa os parâmetros VPL, VAE, TIR e payback foram R\$ 8.331,94, 1.186,28 R\$/anos, 133% e 0,75 anos, respectivamente. Para a combustão incompleta os parâmetros VPL, VAE, TIR foram 30% inferiores e o payback 20% superior aos valores obtidos considerando a combustão completa.

4.4.3 Análise incremental

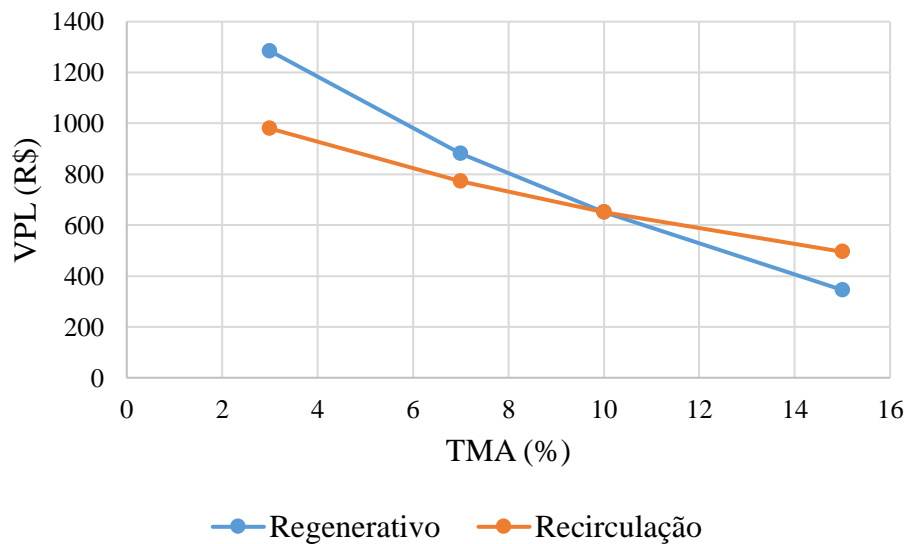
A análise incremental foi calculada para comparar os projetos de implementação dos processos de aproveitamento de energia, discutidos na seção 4.4.1 e 4.4.2., devido à aparente contradição entre VPL e TIR, visto que, a recirculação apresenta TIR maior e VPL menor que a regeneração.

O investimento fictício para a análise foi calculado por meio do fluxo de caixa do investimento maior, que neste trabalho foi o caso regenerativo com combustão incompleta, subtraindo o fluxo de caixa do investimento menor, caso de recirculação com combustão

incompleta e considerando que 24% efetivamente participam da troca térmica. Assim, foi obtido o valor da TIR de 10% para o projeto fictício, identificando a taxa onde tem-se o VPL igual para ambos os processos.

A Figura 15 mostra o VPL em função da taxa mínima de atratividade para os processos, recirculação e regenerativo.

Figura 15 - Evolução do VPL em função da taxa mínima de atratividade, para o processo de recirculação e o regenerativo.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Figura 15 mostram que para investir com uma taxa menor de 10% a implementação do processo regenerativo gerou melhor resultado. Por outro lado, o processo de recirculação foi superior financeiramente, para investimentos com uma taxa maior que 10%. Neste estudo, foi considerado a taxa mínima de atratividade como sendo a Selic de 7%, assim o processo regenerativo foi mais vantajoso. Porém, aumentando a proporção de retorno dos gases o processo de recirculação pode superar financeiramente a regeneração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados. Em complemento, as limitações e sugestões para trabalhos futuros também são apresentados.

5.1 CONCLUSÕES

A pesquisa realizada nessa dissertação de mestrado teve como ponto de partida a análise da energia e emissões em caldeiras. A caldeira em estudo é nova e mista, com grande potencial de alterações para aumentar o aproveitamento de energia e diminuir o custo de produção de vapor.

Com base no estudo de caso proposto foi calculado o balanço das emissões na fase agrícola, no transporte e na fase industrial. O valor total de emissões foi estimado em 28,5 tCO₂. No entanto, as árvores sequestram 35,6 tCO₂ durante o crescimento. Assim sendo, o equivalente a 98,07% do total de CO₂ emitido na geração de energia é sequestrado pela árvore para compor sua estrutura.

Os custos anuais para a manutenção e operação da caldeira são distribuídos entre custos de aquisição da lenha, o volume comprado, o custo a mão de obra do comprador, o custo de manutenção, o custo de operação, e o custo com o operador. Isso totaliza R\$ 43.856,64 em um ano para o caso abordado neste estudo, sendo que R\$ 14.940,00 gasto com a compra de lenha.

Foram propostos dois processos de aproveitamento de energia para a otimização do sistema, sendo o caso regenerativo e o caso de recirculação, considerando a combustão completa e incompleta em ambos os casos.

Para a recirculação de 20% dos gases de exaustão foi calculado uma economia de 0,14% no consumo da lenha para a combustão completa, isto é, 21,78 R\$/ano. No entanto, a economia alcançada para a combustão incompleta foi de 0,98%, que equivale a 138,34 R\$/ano. Para o caso regenerativo foi estimada uma economia de aproximadamente 267,81 R\$/ano, ou seja, 1,79 % no consumo de lenha.

Os parâmetros financeiros da análise econômica para o caso de recirculação com combustão incompleta num horizonte de 10 anos mostraram que o projeto é viável a partir de 5% de retorno dos gases de exaustão. Porém, o investimento inicial para implementar o caso

regenerativo foi avaliado em R\$ 1.000,00 e para o caso de recirculação R\$ 200,00. Portanto, foi realizada uma análise econômica para verificar a viabilidade dos projetos.

O caso regenerativo apresentou valores de TIR e payback de 38% e 2,5 anos, respectivamente. Considerando a hipótese de 20% de recirculação apresentou a TIR de 69% e o payback de 1,45 anos. Assim sendo, o último caso mostrou um maior retorno. Porém, ambos os casos podem ser implementados simultaneamente, aumentando assim a economia.

5.2 LIMITAÇÕES

A principal limitação desta pesquisa está condicionada a ausência de análise do combustível regional e inexistência de medições das emissões da caldeira em estudo. Além da escassez de recursos para a pesquisa, como produtos químicos e equipamentos para a análise da lenha e dos gases de emissão. Além disso, a pesquisa não pode ser generalizada devido a indisponibilidade de acesso a um número maior de cenários.

5.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Analisar um maior número de caldeiras.

Realizar a análise físico-química da lenha utilizada pelo quartel, para obter valores específicos da biomassa.

Verificar a precificação da lenha com os fornecedores os custos intrínsecos ao plantio e colheita. Além disso, o consumo de combustível pelos equipamentos e as emissões geradas pelos produtores de São Pedro do Sul.

Implementar experimentalmente os processos estudados neste trabalho, a fim de verificar a validade das propostas.

Determinar o limite máximo de recirculação sem a necessidade de incluir um sistema de ventilação.

REFERÊNCIAS

- ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF 2013 – Ano base 2012**, Brasil, 2013.
- ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Brasil, v. 6 n.1. 2010.
- AMORIM, E. B. **Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa**. 2012. 114 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
- ANACLETO, J.; ANACLETO, A. Sobre a primeira lei da termodinâmica: as diferenciais do calor e do trabalho. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, nº 2, p. 488-490, 2007.
- IBÁ 2014, Anuário. **Indústria Brasileira de Árvores**, Brasília, 100p. 2014.
- ARRUDA, M. Z. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 2009. 74 f. Monografia Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1492****NBR 14660**: Madeira - Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro, 2003. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003. 4p.
- BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n.2, p. 858 – 875, 2010.
- BATISTA, B. M. F., DA SILVA, J. V., SÁNCHEZ, D. C. M., MARTINEZ, D. T., & PASA, M. C. Revisão dos impactos ambientais gerados na fase de instalação das hidrelétricas: Uma análise da sub-bacia do Alto Juruena-MT. **Biodiversidade**, v.11, nº1, p. 17, 2012.
- BAZZO, E.; *Geração de Vapor*, 2ª Ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.
- BCB, BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Selic**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/?SELICDIARIOS>>. Acesso em: 15 de dez. 2017.
- BEN. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. **Empresa de Pesquisa Energética**, Rio de Janeiro, p. 296, 2016.

BIZZO, W. A. Geração, distribuição e utilização de vapor. **UNICAMP**. v. 2, p. 66-80, 2003.

BORGES, V. F.; GATTI, L. V.; MARTINEWSKI, A.; DE CARVALHO CORREIA, C. S.; DOMINGUES, L. G. Análise da concentração dos gases de efeito estufa na costa nordeste brasileira. **II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, p. 5, 2014.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia, **UNICAMP**, v.18, p. 20, 2002.

BRASIL **fatura R\$ 69 bilhões com produção de madeira**. Disponível em :<<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/agro-a-industria-riqueza-do-brasil/noticia/2016/11/brasil-fatura-r-69-bilhoes-com-producao-de-madeira.html>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

BRASIL. Capacidade de Geração do Brasil. 23 jan. 2017. **AEEL**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a medida provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 25 fev. 2017a.

BRASIL. Ministério Da Ciência, Tecnologia E Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. **Centro de Estudos em Sustentabilidade**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<http://gvces.com.br/arquivos/177/EstimativasClima.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2017b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. **Empresa de Pesquisa Energética**, Brasília, 2015.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. **Poluentes atmosféricos**, Brasília, 2016. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

BRIANE, D.; DOAT, J. Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois. Aix-en-Provence, **ÉDISUD**, p.180, 1985.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, nº 59, p.185-193, 2007.

BRITO, S. S.; BARRICHELO, L. E. G. Tópicos atuais. Energia, economia, meio-ambiente: as fontes renováveis de energia no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v.1, n.3, 1979.

- BRUXEL, R. L. **Utilização de resíduos de macarrão como combustível em caldeira**. 2011. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.
- BUZIN, P. J. W. K. **Desenvolvimento de briquetes auto-redutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco**. 2009. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.
- CAETANO, L; DUARTE JUNIOR, L. A. Estudo comparativo da queima de Óleo BPF e de lenha em caldeiras-estudo de caso. ABCM (Ed.). **Anais do XI CREEM**. Nova Friburgo, 2004.
- CAGED – **Cadastro Geral do Empregados e Desempregados**. 2012. Disponível em <portal.mte.gov.br/caged/>. Acesso em: 07 mar. 2017.
- CAMPANHARO, M.; MONNERAT, P. H.; RIBEIRO, G.; PINHO, L. G. da R. Utilização de cinza de madeira como corretivo de solo. **Fertibio**, 2008.
- CAMPOS, A. A. **Desempenho operacional e análise de custos da implantação florestal mecanizada de Eucalyptus**. 2013. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. 2013.
- CARDOSO, A. A.; MACHADO, C. D. M. D.; PEREIRA, E. A. Biocombustível, o mito do combustível limpo. **Química nova na escola**, v. 28, p. 9-14, 2008.
- CARDOSO, O. R.; DAMBRÓS, M. M. G.; XAVIER, R. A.; WEISS, C. V.; GAUER, N. P. A Utilização de SIG no Auxílio da Análise dos Impactos Ambientais Causados pelas Usinas Hidroelétricas Passo São João e São José Localizadas no Rio Ijuí-RS. **Scientia plena**, v. 11, nº 2, 2015.
- CARMO, F. C. DE A. DO C. ; MINETTE, L. J. ; FIEDLER, N.C. Alternativas para redução da emissão de gases em máquinas florestais. In: Nilton Cesar Fiedler; José Luis Penetra Cerveira Lousada; Flávio Cipriano de Assis do Carmo. (Org.). **Emissão de gases e sequestro de carbono em sistemas florestais**. 1ed.Alegre, ES: CAUFES, 2016, v.1 , p. 63-81.
- CASTRO, R. M. Introdução à energia eólica. Energias Renováveis e Produção Descentralizada. **DEEC / Secção de Energia**, ed.1, 2007.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Secretaria de Estado do Meio Ambiente .25 jan. 2001. **Ambiente**. Disponível em:<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp#mp>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- COELHO, P.; COSTA, M. Combustão. **Edições Orion**. 1º ed. Outubro de 2007.
- COLLET, F. Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal - **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, v. 42, nº 12, p. 5-14,1955.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **CONAMA nº 382**, de 26 de dezembro de 2006. Publicada no DOU no 1, de 2 de janeiro de 2007, Seção 1, pagina 131-137. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, 2006.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº 474**. Dispõe sobre procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros., Brasil, 2016.

CONTI, J., HOLTBERG, P., DIEFENDERFER, J., LAROSE, A., TURNURE, J. T., & WESTFALL, L. **International Energy Outlook 2016 With Projections to 2040**. USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States). Office of Energy Analysis, 2016.

CORDANI, U; TAIOLI, F. A terra, a humanidade e o desenvolvimento sustentável. In: TEIXEIRA, Wilson [et al.] (org.). Decifrando a terra. 2ª reimpressão. **Oficina de textos**, São Paulo, p. 12, 2003.

CORE, J.E., COOPER, J.A., DECESAR, R.T., HOUCK J.E. Residential wood combustion study. **Seattle: United States Environmental Protection Agency**, 1982.

COSTA, M. P. D. **Avaliação da concentração de dióxido de nitrogênio no entorno de uma Usina Termelétrica em Manaus-AM**. 2013, 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Recursos da Amazônia), Universidade Federal do Amazonas, 2013.

COSTA, M.A.F.; COSTA, M.F.B. Projeto de Pesquisa: entenda e faça. 5. Edição. Rio de Janeiro: **Ed. Vozes**, 2014.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F. CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

CUNHA, M. P. S. C., PONTES, C. L. F., CRUZ, I. A., CABRAL, M. T. F. D., NETO, Z. B. C. E BARBOSA, A. P. R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. **Anais 3º Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**: São Carlos, SP, v. 2, p. 93-121, 1989.

DALLAROSA, J. B. **Estudo da formação e dispersão de ozônio troposférico em áreas de atividade de processamento de carvão aplicando modelos numéricos**. 2005, 127 p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2005.

DAVIES, R. B. D. C.; ROUTLEDGE, P. A. Monóxido de Carbono. In: Manual de Toxicologia Básica, In: Mencías, E.; Mayero L. M. Madrid: Editorial Diaz de Santos, p. 593-595, 2000.

DE CARVALHO SOUZA JR, J. A. **Emissões em processos de combustão**. Unesp, 2003.

DE QUEIROZ, A. M. , ; DA GAMA, Z. A. G. P. Aspectos Econômicos Dos Plantios Com Eucalyptus (Eucalyptus spp.) Na Região Do Baixo Acre. **Floresta**, v.46, nº 3 p. 287-296, 2016.

DE TOLEDO PIZA, M. W.; DE CARVALHO BUENO, O. Os Pequenos Potencias Hidrelétricos Como Vetor De Desenvolvimento Sustentável. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 7, nº 2, 2011.

DECOPE, 2014. **Departamento de Custos Operacionais**. Estudos Técnicos e Econômicos. Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas - 2014. São Paulo/SP. Edição: 2014.

DEMO, P. **Metodologia do conhecimento científico**. São Paulo: Atlas, 2000.

DIAS, J. D. S., dos SANTOS, D. T., BRAGA, M., ONOYAMA, M. M., MIRANDA, C. H., BARBOSA, P. F., & ROCHA, J. D. (2012). Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia**. 2012.

DOS SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta amazônica**. 1999. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

DUARTE, Márcio Alexandre Correia. **Emissões de compostos carbonosos pela queima doméstica de biomassa**. 2011. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade de Aveiro. 2011.

ECHEVERRI V. J. D. **Modelagem do sequestro de carbono em plantação de Eucalyptus para fins energéticos no cerrado**. 2014. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ECIL. **Manual de Instrução Chemist 500**. 2015.

ELESBÃO, L. E. G. **Crescimento e produção de Pinus taeda L. na região dos Campos de Cima da Serra, Rio Grande do Sul**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

EPE/MME. 2010. **Balço Energético Nacional 2010: Ano Base 2009**. Rio de Janeiro: s.n., 2010.

FAO Wood Energy. Promoting Sustainable Energy Systems. **Forest Products Division**, Rome, October, 2003.

FAO, Roma, Itália. **Métodos simples para fabricar carbón vegetal**. Estudio FAO: Montes, 41, Roma, 1983. 154p.

FAO. Organização das Nações Unidas Para a Alimentação e a Agricultura. **Relatório da consulta técnica sobre a pesquisa e desenvolvimento da energia com base na madeira na África**. Roma, 1985. 25 p.

DO NASCIMENTO, M. D.; BIAGGIONI, M. A. M. avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104-117, 2010.

FEARNSIDE, P. M. Hidrelétricas como " fábricas de metano": o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de gases de efeito estufa. *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, n. 1, p. 11, 2008.

FDOLINSKI, C. **Trocador de calor de 30 placas em inox**. Disponível em <<
https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-905617297-chiller-trocador-de-calor-de-30-placas-em-inox-_JM?source=gps>> Acesso em: 20 dez. 17.

FIGUEIREDO, F. A. B.; VALARELLI, I. D. D.; SCALON, V. L. Análise da eficiência de dois tipos de trocadores de calor de aquecimento indireto, para a secagem de grãos. In: CONEN, 2002. **II Congresso nacional de Engenharia mecânica**. 2002.

FIPE. 2010. IDET. **Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas**. 2010. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br/web/index.asp>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

FLEIG, F. D.; SCHNEIDER, P. R.; BRUM, E. T. Análise econômica dos sistemas de produção com acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild.) No Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 3, nº 1, p. 203-240, 1999.

FLORES, J. C. de O.; FLORES, C. S. M. Fogueiras de São João e o impacto ambiental nas matas do Planalto da Conquista - Ba. **Anais. VII Congresso Brasileiro em Defesa do Meio Ambiente**. Rio de Janeiro. 2004.

FLORESTAR São Paulo. Informações Gerais de Eucalyptus. **Floresta**. Disponível em: <<http://www.floresta.org.br/index.php?interna=textos/Eucalyptus&grupo=4>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

FOGAÇA, J. R. V. "Combustão completa e incompleta"; **Brasil Escola**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/combustao-completa-incompleta.htm>>. Acesso em 26 jan. 2017.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica Dos Fluidos**. Grupo Gen-LTC, 2000.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. **Editora Interciência**. Rio de Janeiro, p. 385, 2002.

GENTIL, L. V. G. Energia da madeira na matriz brasileira. **Revista Política Agrícola** v. 19, nº 3, p.10, 2010.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4º ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GLENISTER, D.; NUNES, V. Entendendo a produção sustentável de Biocombustíveis, a Diretiva da EU de energia renovável e as iniciativas internacionais para verificação de sustentabilidade. **Guia Técnico. Systems and Services Certification (SGS)**. 2011.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia, meio ambiente e desenvolvimento, **Edusp**, 3º ed., 2008.

GOLUB A.; HERTEL T.; LEE H.-L.; ROSE S.; SOHNGEN B., The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry, **Resource and Energy Economics**, v. 31, p. 299–319, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. 1991. Fundamentos de Física 2. Gravitação, ondas e termodinâmica. Tradução Adir Moysés. **LTC- Livros Técnicos e Científicos**. Rio de Janeiro 1991.

IMAZON. Produção de madeira processada. 2004. **Consciência**. Disponível em: <<http://www.consciência.br>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, editora: LTC. 3ed., 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Ensaio químico em lenho e cascas de cajueiro**. São Paulo, IPT – Laboratório de Celulose e Papel, Centro de Tecnologia de Recursos Florestais. 8p. Relatório Técnico. v. 114, p. 219 - 205, 2009.

JACQUES, J. **Estudo de Iniciativas em Desenvolvimento Sustentável de Produtos em Empresas Calçadistas a partir do Conceito Berço ao Berço**. Ph.D. Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 2011.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas**. Comunicação Técnica, nº 1797, 6 p., São Paulo, 1997.

JUNFENG, L.; PENGFEI, S.; HU, G. China wind power outlook 2010. **GWEC**, Bélgica, 55 p., 2010.

KAWÁS, H. B. **Monitoramento das emissões atmosféricas de caldeiras de projetos distintos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

KLINE, S. J. e McCLINTOCK, F. A., **Describing uncertainties in single-sample experiments**, Mechanical Engineering, 1953.

KLOCK, U., MUÑIZ, G. I. B. D., HERNANDEZ, J. A., & ANDRADE, A. D. **Química da madeira**. Curitiba, UFPR, 3 eds., p. 86, 2005.

KRUPA, S. V.; LEGGE, A. H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. **Environmental Pollution**, v. 107, p. 31-45, 2000.

KURIYAMA, G. S.; MOREIRA, J. C.; DA SILVA, C. R. S. Exposição ocupacional ao dióxido de nitrogênio (NO₂) em policiais de trânsito na cidade do Rio de Janeiro Nitrogen dioxide (NO₂) occupational exposure assessment on Rio de Janeiro's city traffic wards. **Cad. Saúde Públ**, v.13, nº 4, p. 677-683. 1997.

LACAVA, Carlos Ibsen Vianna. Avaliação da qualidade do ar. In: Emissões atmosféricas. 2003. p. 131 - 180. **Ambiental ufpr**. Disponível em: <http://www.ambiental.ufpr.br/wp-content/uploads/2014/08/Livro_TGA-EA-_cap_2__QUAL_AR.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2016.

- LEANDRO, M. R. **Briquetagem Visando Utilização De Resíduos De Uma Serraria**. 2011, 37 p. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro, 2011.
- LEITE, N. R., MILITÃO, R.A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. 2008. 4f. Escola politécnica - Depto. Eng. Mecânica. 2008.
- LEONARDO, M. P. Duto Semi-flexível Alumi Para Coifa De 150 Mm (rl.c/ 1,5mts). Disponível em: < https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-830403897-duto-semi-flexivel-alumi-para-coifa-de-150-mm-rlc-15mts-_JM?source=gps >. Acesso em: 10 dez. 2017.
- LIMA, C.R. **Contribuições da cogeração de energia na qualidade da madeira como material de construção civil**. 1993. 70 f. Dissertação de Mestrado em Arquitetura – EESC/USP, São Carlos, 1993.
- LIMIRO, D. **Créditos de Carbono-Protocolo de Kyoto e Projetos de MDL**. Jurua Editora, 2009.
- LISBOA, H. M.; KAWANO, M. Controle da poluição atmosférica. **Monitoramento de poluentes Atmosféricos**. Montreal, cap. v., 73 p., 2007.
- LOPES, R. P., OLIVEIRA FILHO, D., DONZELES, S. M. L. FERREIRA, W. P. M. Controle da combustão em fornalhas a lenha. **In: Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural**. 2000.
- LORA, E. E. S.; SALOMON, K. R. Análise comparativa da utilização da biomassa com tecnologias convencionais de geração aplicando a eficiência ecológica. **Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2004.
- MACHADO, C. C. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Editora UFV, Viçosa, MG, 2000. 167p.
- MACHADO, R. M. G.; SILVA, P. D.; Freire, V. H. Controle ambiental em indústrias de laticínios. **Brasil Alimentos**, v. 7, p. 34-36, 2001.
- MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas: prediais e industriais**. Ed. LTC. 4.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.
- MANUAL FLUKE 561; Fluke Corporation. **LIF**, Göttingen, Alemanha, 2007.
- MARENCO, J.A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. **Série Biodiversidade** . Brasília. v.26, 2º ed, 212 p., 2007.
- MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, nº 1, 2008.
- MATTOS, L. B. R. **A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa - O Caso do Município do Rio de Janeiro**. 2001. 222 p. Dissertação

(Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

MIRANDA, L. B. Custos florestais: Implantação de um sistema de custeio em uma propriedade rural, tendo como enfoque o controle dos custos incorridos em uma plantação de *Pinus taeda*, situada na zona rural, da cidade de Sengés, estado do Paraná. **REDECA, Revista Eletrônica do Departamento de Ciências Contábeis & Departamento de Atuária e Métodos Quantitativos**. v.3, nº 2, p. 110-129, 2016.

MIRANDA, M. J. M. **Estágio realizado na Bosch Termotechnika, S.R.O. (República Checa)**. 2009, 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 2009.

MODA, B. B. **A Importância da Avaliação de Impactos Ambientais dentro do Processo de Licenciamento Ambiental para a Construção de Empreendimentos Hidrelétricos no Brasil**. 2014, 147 p. Dissertação (Mestrado em Direito). Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2014.

MOFFAT, R. J., Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis, **Journal of Fluids Engineering**, vol. 104, pp. 250-258, 1982.

MONTOYA, M. A., PASQUAL, C. A., LOPES, R. L., & GUILHOTO, J. J. M.. Consumo de energia, emissões de co2 e a geração de renda e emprego no agronegócio brasileiro: uma análise insumo–produto. **Economia Aplicada**, v. 20, n. 4, p. 383-413, 2016.

MOORE, W J. Físico-Química, vol. 1 e 2. **Editora Edgard Blücher Ltda: São Paulo**, p. 6-8, 1976.

MT, 2007. Ministério dos Transportes. Endereço eletrônico: Disponível em <<http://www.abgroup.com.br/download/LuizEduardoFEBCHidroviasdoBrasil.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2017.

MÜLLER, I. **Avaliação da produtividade da *Acácia mearnsii* de wind (acácia negra) em função de diferentes espaçamentos**. 2006.133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica**. 2007, 103 p. Dissertação (Mestre em Agronomia, Área de Concentração Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Botucatu, SP, 2007.

NETTO, S. P., KAUANO, É. E., CORAIOLA, M., WEBER, S. H., & ERDELYI, S. Estimativa do potencial de neutralização de dióxido de carbono no programa VIVAT NEUTRACARBO em Tijucas do Sul, Agudos do Sul e São José dos Pinhais, PR, **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 293-306, abr./jun. 2008.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. NR-13 - Caldeiras e Vasos de Pressão. 2014.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. G. D., SILVA, A. B. D., MANTOVANI, J. R., MIRANDA, J. M., & FLORENTINO, L. A. Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia

do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 412 - 419, out./dez. 2015

PAIXÃO, F. A., SOARES, C. P. B., JACOVINE, L. A. G., SILVA, M. L. D., LEITE, H. G., & SILVA, G. F. D. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de Eucalyptus. 2006. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.411-420, 2006.

PEIXOTO, N. H. Higiene ocupacional II. Neverton Hofstadler Peixoto, Leandro Silveira Ferreira. – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; **Rede e-Tec Brasil**, 212 p., 2013.

PENA, R. F. A. **Vantagens e desvantagens da energia solar**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/vantagens-desvantagens-energia-solar.htm>>. Acesso em: 10 de fev. 2018.

PINTO, O. G., Operador de Caldeira. **LuBrasil Lubrificantes Ltda**. Jul 29, 2016. Disponível em < <http://www.slideshare.net/OsmarGomes/caldeiras-1>>. Acesso em: 26 de jan. 2017.

POLLIN, R.; GARRETT-PELTIER, H.; HEINTZ, J.; SCHARBER, H. Green Recovery – A Program to Create Good Jobs and Start Building a Low-Carbon Economy. Centre for American Progress and Political **Economy Research Institute (PERI)**, University of Massachusetts, Washington, DC and Amherst, MA, USA. 42 p. 2008.

PROJETOETICS. Mapa do estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: < <http://projetoetics.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 10 de mar. 2018.

PROJETOS de modernização e capacidade instalada fazem de Santa Maria importante pólo de defesa no país. **Revista Forças Armadas**, Santa Maria 24 fev. 2018.

RAMPAZZO, L. Metodologia científica: para alunos dos cursos de graduação e pósgraduação. São Paulo: Loyola, 2010. 142. **Revista EDICIC**, v. 1, n. 3, p. 127-142, 2011.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D.O.A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; MACÊDO; ICHIHARA, J. A. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**, Brasília: Ministério de Minas e Energia, 192p. 2008.

REZENDE, J.L.P. de; OLIVEIRA, A.D. de. Análise econômica e social de projetos florestais. **Editora UFV** - 3ª Edição. 385 p. 2013.

RIBEIRO, H. Sugar cane burning in Brazil: respiratory health effects. **Revista de Saúde Pública**, v. 42, n. 2, p. 370-376, 2008.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos avançados**, v. 16, nº 44, p. 125-148, 2002.

RIBEIRO, K, FONSECA, D. K. **Eutrofização**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm>>. Acesso em: 10 de fev. 2017.

RIBEIRO, R. R. M.; ESPEJO, M. M. D. S. B; CAMACHO, R. R.; DE OLIVEIRA MORAES, R. **Análise da abordagem metodológica: um estudo das teses e dissertações em contabilidade gerencial.** ConTexto, Porto Alegre, RS, v. 13, n° 25 p. 84-97, 2013.

RODIGHERÍ, H. R. Rentabilidade econômica comparativa entre plantios florestais e sistemas agroflorestais com erva-mate, Eucalyptus e pinus e as culturas do feijão, milho, soja e trigo. **EMBRAPA - CNPF**, 5 p. 1997.

RODIGHERI, H. R.; DA SILVA, H. D.; TUSSOLINI, E. L. Indicadores de custos, produtividade e renda de plantios de Eucalyptus para energia na região de Guarapuava, PR. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2007.

ROVERSI, T., MATTEI, V., JUNIOR, P. S., & FALCK, G. Superação da dormência em sementes de acácia negra (*Acacia mearnsii* Willd.). **Current Agricultural Science and Technology**, v. 8, n°2, p.162-193, 2002.

SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.

SALUM, A. D. **Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira.** 2011, 54 p. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Industrial). Universidade Federal de Bahia, Bahia, BA, 2011.

SANTOS, B.; PAZZINI, D.; RIBEIRO, F.; BARBOSA, L. M. Energia eólica: vantagens e desvantagens. **Anais do Salão de Iniciação Científica e Tecnológica e Salão de Extensão do IFRS - Câmpus Canoas**, Canoas, RS, v. 3, n° 1, 2014.

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta amazônica.** 1999, p. 87. Dissertação (Mestre em ciências em Engenharia Mecânica). Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** Brasília: Universidade de Brasília, 2008. 57 p.

SANTOS, U. P., GANNAM, S., ABE, J. M., ESTEVES, P. B., FREITAS, F. M., & WAKASSA, T. B. Emprego da determinação de monóxido de carbono no ar exalado para a detecção do consumo de tabaco. **J Pneumol**, v. 27, n. 5, p. 231-6, 2001.

SAQUAIELLA, L. L. F. Efeito do sistema de recirculação dos gases de escape no controle de emissões de NOx em motores a diesel. Campinas, SP, 2010.

SATANOKAS, S. **Hokkaido Daigaku, enshurin Hokoku**, From: C.A. v. 22, n° 2, p. 609-814, 1963.

SAVI, A. F.; CANEPELLE, F. L.; OLIVEIRA, M. R. G. Custo de diferentes veículos de carga no setor madeireiro. **Revista Da Madeira**, Ed.134, 2013.

SCALABRIN, V. **O desenvolvimento urbano da cidade de Santa Maria.** 2012, 38 p. Monografia (Licenciado em Geografia). Santa Maria, RS, 2012.

SCHAYDER, L. F. **AVALIAÇÃO DA COLAGEM A FRIO EM MADEIRA SÓLIDA DE Pinus sp.** 2014. 39f. Monografia (título de Engenheiro Industrial Madeireiro) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

SEIXAS, F. Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira. **Simpósio Brasileiro Sobre Colheita E Transporte Florestal**, v. 5, p.1-27, 2001.

SEIXAS, Fernando. Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira. **SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL**, v. 5, p. 1-27, 2001.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (São Paulo). Celulose. **Editora SENAI – SP**. São Paulo. 2013.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p. Disponível em: <www.posarq.ufsc.br/download/metPesq.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2017.

SILVA, J. D. C., CASTRO, V. R. D., XAVIER, B. A. **Cartilha do fazendeiro florestal**. 2008.

SILVA, K. R., MINETTI, L. J., FIEDLER, N. C., VENTUROLI, F., MACHADO, E. G. B., & SOUZA, A. D. Custos e rendimentos operacionais de um plantio de Eucalyptus em região de cerrado. **Revista Árvore**, v. 28, n° 3, p. 361-366, 2004.

SILVA, L.C. **Agronegócio: Logística e Organização de Cadeias Produtivas**. II SEMANA ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – ENGENHARIA DO AGRONEGÓCIO. Disponível em: <http://www.agais.com/manuscript/ms0107_agronegocio.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2017.

SILVA, M. E. C. M. **Apontamentos de tecnologia dos produtos florestais: composição química da madeira**. Vila Real-Portugal: UTAD, p. 18, 2010

Silva, M. L. D., Oliveira, R. J. D., Valverde, S. R., Machado, C. C., & Pires, V. A. V. Cost and distance of reforestation wood transport for different types of trucks. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SILVA, M. L. D., OLIVEIRA, R. J. D., VALVERDE, S. R., MACHADO, C. C., & PIRES, V. A. V. Cost and distance of reforestation wood transport for different types of trucks. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SILVA, M. L. D., OLIVEIRA, R. J. D., VALVERDE, S. R., MACHADO, C. C., & PIRES, V. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos, **Revista Árvore** Viçosa, v. 31, n° 6, 2007.

SILVA, M. T. C **Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO₂ resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração**. 2009. 129 p. Dissertação (Mestre em Bioenergia). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

SILVA, R. L. **Viabilidade do uso da energia solar no Brasil**. 2016. 76 p. Trabalho de conclusão (Especialista em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável). Centro Universitário de Brasília (UniCEUB/ICPD), Brasília, DF, 2016.

Simoneit, B. R. T. Biomass burning. a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. **Applied Geochemistry**, v. 17, n. 3, p. 129-162, 2002.

SMITH, J. M., VAN NESS, H. C., ABBOTT, M. M. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química, 7ª edição. **LTC**, 02/2007.

SOARES, L. D. B., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S., & BODDEY, R. M. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. **Embrapa Agrobiologia-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2009.

SOUSA, W. L. **Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens**. 2000. 160 p. Dissertação (Mestrado em ciências e planejamento energético). Departamento de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2000.

SOUZA JUNIOR, J. D. O. **Análise econômica em plantios de pinus e Eucalyptus no planalto serrano catarinense**. 2012. 174 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012.

SOUZA, P. R. G. **Comportamento Dinâmico do Sistema Térmico de uma Caldeira Genérica**. The 4th International Congress on University-Industry Cooperation – Taubate, SP – Brazil – December 5th through 7th, 2012

TAMBANI, P. C.; SANTOS, J. L. D.; HIRAYAMA, D. E.; MENDONÇA, M. A.; ANTONOFF, H. B. Estudo comparativo entre as metodologias eschka, infravermelho, condutividade térmica (tcd) e ultravioleta para a determinação de enxofre total em combustíveis sólidos. **Quim. Nova**, v. 36, nº 6, p. 870-873, 2013.

TANAC, Cultura da acácia negra, **Cartilha de Recomendações Técnicas**. Disponível em: <www.tanac.com.br/sites/default/files/certificados/Recomendacoes_tecnicas.pdf>. Acesso em: 02 de mar. 2017.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods**. Atlanta: TAPPI Press, 1999.

TREVELIM, W. J. CALDEIRAS FLAMOTUBULARES-RECONSTITUIÇÃO DE PRONTUÁRIOS. **Revista Eletrônica da Faculdade de Alta Floresta**, v. 2, n. 2, 2013.

TSGA, Projeto. **Cartilha de tecnologias sociais para a gestão da água na suinocultura**. 2009.

URNS, S. R. Introdução à combustão, recurso eletrônico: conceitos e aplicações; tradução Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior. 3. Ed. Dados eletrônicos. **Editora AMGH**. Porto Alegre. 2013.

TYE, R.P., SPINNEY, S.C. Measurement of the Specific of Building Materials. **ASHRAE Transactions**. v. 84, part 1, p. 675-687, 1978.

UCZAI, P. R.; TAVARES, W. M; QUEIROZ FILHO, A. P. D. Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade. Câmara dos Deputados. **Edições Câmara**. Brasília. 2012. 275 p.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., GORDON, J., & RICHARD, E. S. **Fundamentos de termodinâmica**. 4 ed. Editora **Blucher**. São Paulo, 1995.

VIEIRA, L. C. **Uso De Amostradores Passivos Para O Monitoramento Do Ar**. 2012. 62 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental). Universidade De Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2012.

VLASSOV, D. Combustíveis, combustão e câmaras de combustão. Curitiba: **ed. FIEP/CIEP/SESI/SENAI/IEL**, 2001.

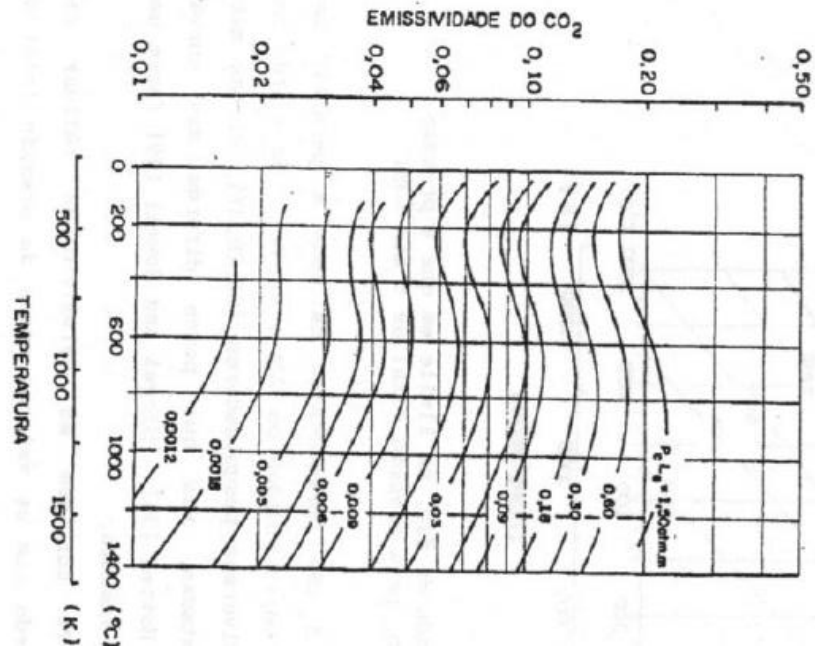
WELTER, C. A. **Uso da biomassa Florestal como estratégia de redução dos gases de efeito estufa: estudo de caso na fusicultura do sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). 2017. 68 p. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2017.

WHITE, R. H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. **Wood and Fiber Science**, v. 19, n. 4, p. 446–452, 1987.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Carbon monoxide**. Enviromental health criteria 13, Geneva: WHO, 1979.

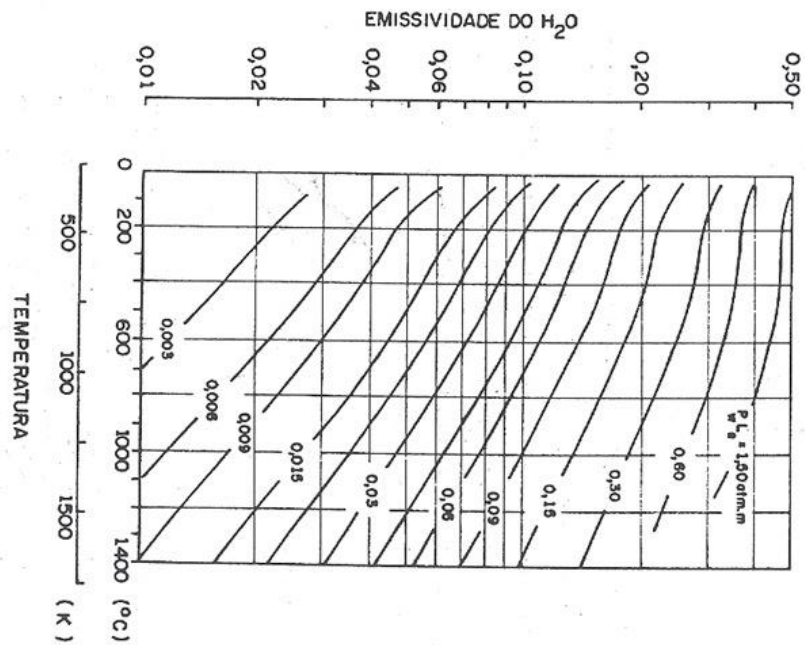
WRI/GHG Protocol, World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, “Scope 3 Accounting and Reporting Standard (draft)”, **The greenhouse gas protocol**, November, 2010.

ANEXO A - EMISSIVIDADE DO CO₂ PARA PRESSÃO TOTAL DE 1 ATM.



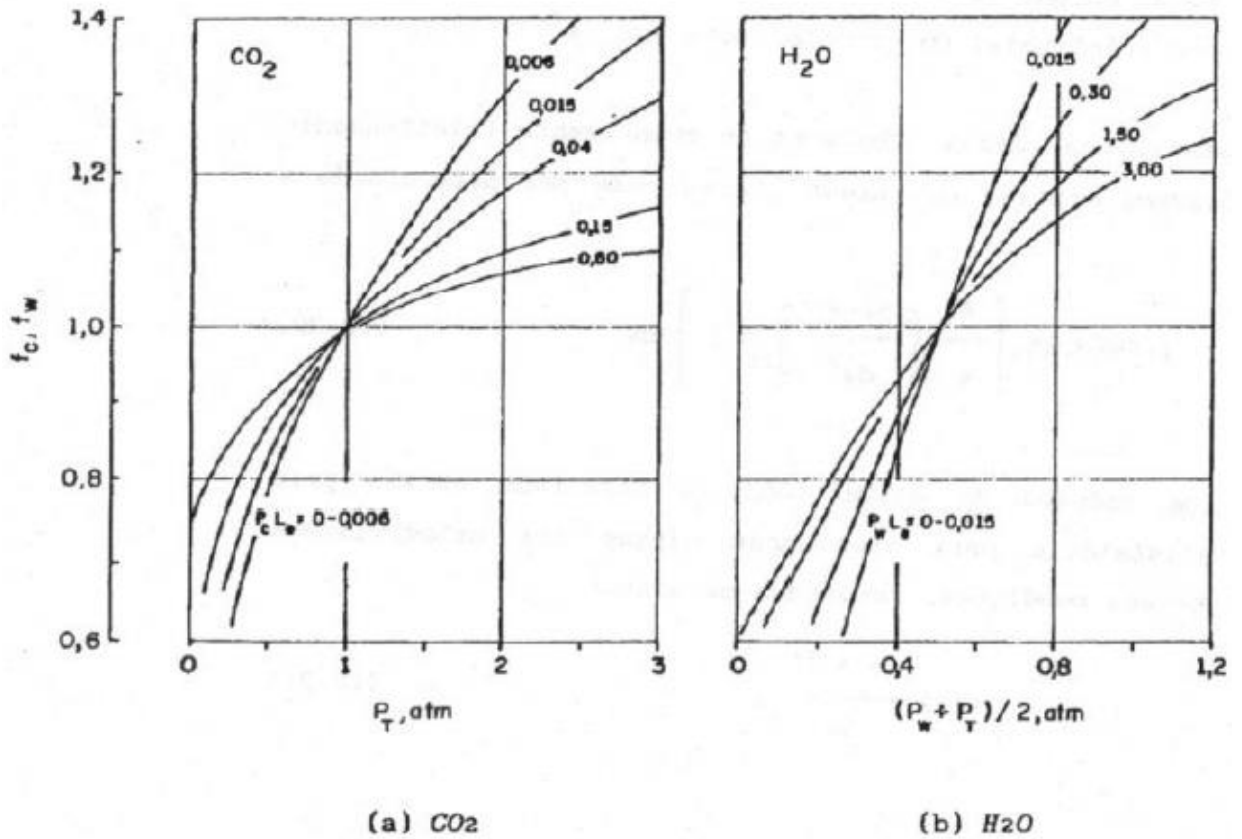
Fonte: BAZZO (1995).

ANEXO B - EMISSIVIDADE DO H₂O PARA PRESSÃO TOTAL DE 1 ATM.



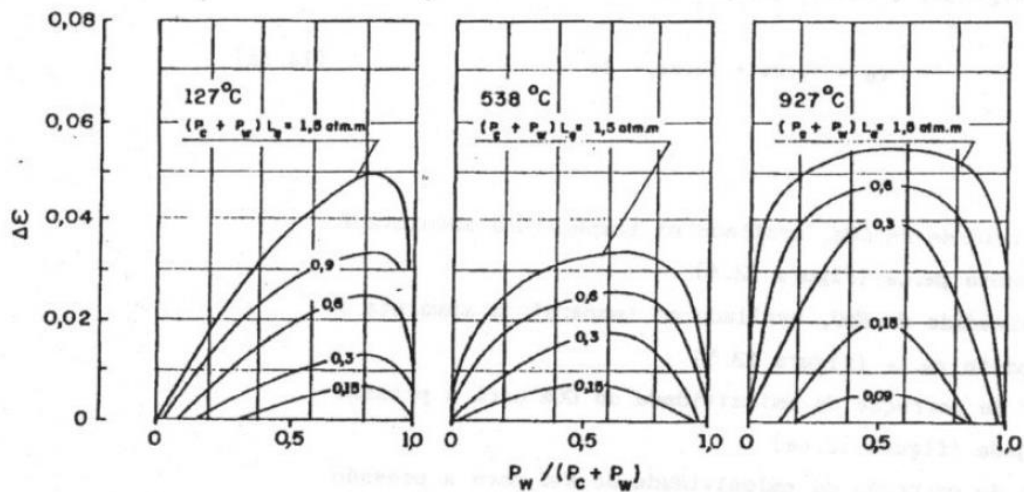
Fonte: BAZZO (1995).

ANEXO C - FATORES DE CORREÇÃO PARA AS EMISSIVIDADE.



Fonte: BAZZO (1995).

ANEXO D - CORREÇÃO DA EMISSIVIDADE DEVIDO À PRESENÇA SIMULTÂNEA DOS GASES CO_2 E H_2O



Fonte: BAZZO (1995).

ANEXO E - CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DE VÁRIOS GASES IDEAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

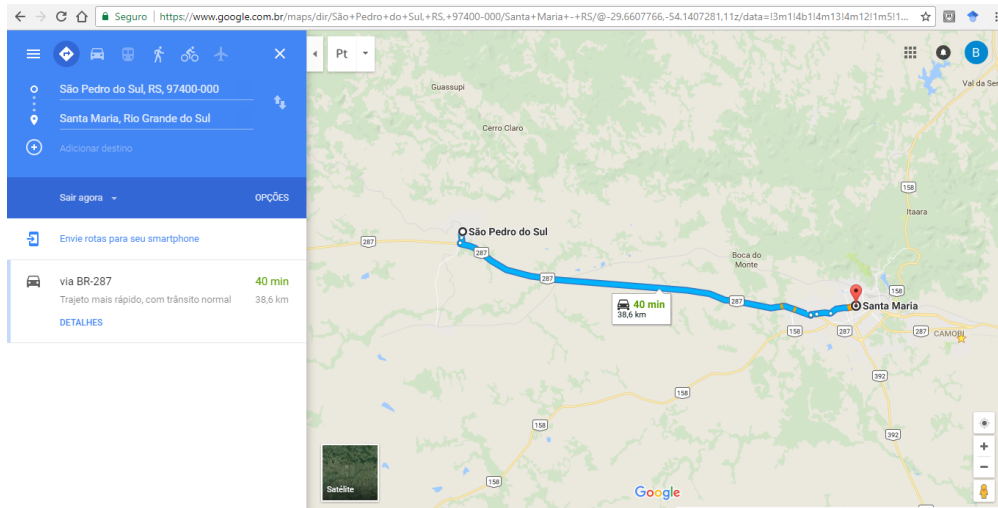
$c_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ kJ/kg K $\theta = T$ (Kelvin)/1000						
Gás	Formula	C_0	C_1	C_2	C_3	Intervalo K
Acetileno	C ₂ H ₂	1,03	2,91	-1,92	0,54	250 – 1200
Água (vapor)	H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,20	250 – 1200
Amônia	NH ₃	1,60	1,40	1,00	-0,7	250 – 1200
Ar (atmosférico)	-	1,05	-0,365	0,85	-0,39	250 – 1200
Argônio	Ar	0,52	0	0	0	250 – 1200
Butano	C ₄ H ₁₀	0,163	5,70	-1,906	-9,049	250 – 1200

Fonte: Van Wylen (1995).

ANEXO F - CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DE VÁRIOS GASES IDEAIS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (CONTINUAÇÃO).

Gás	Formula	C_0	C_1	C_2	C_3	Intervalo K
Dióxido de carbono	CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39	250 – 1200
Dióxido de enxofre	SO ₂	0,37	1,05	-0,77	0,21	250 – 1200
Etano	C ₂ H ₆	0,18	5,92	-2,31	0,29	250 – 1200
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0,20	-4,65	-1,82	0,03	250 – 1200
Etileno	C₂H₄	1,36	5,58	-3,00	0,63	250 – 1200
Hélio	He	5,193	0	0	0	250 – 1200
Hidrogênio	H ₂	13,46	4,6	-6,85	3,79	250 – 1200
Metano	CH ₄	1,2	3,25	0,75	-0,71	250 – 1200
Metanol	CH ₃ OH	0,66	2,21	0,81	-0,89	250 – 1200
Monóxido de carbono	CO	1,10	-0,46	1,00	-0,454	250 – 1200
Neônio	Ne	1,03	0	0	0	250 – 1200
Nitrogênio	N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42	250 – 1200
n – octano	C ₈ H ₁₈	-0,053	6,75	-3,67	0,775	250 – 1200
Óxido nítrico	NO	0,98	-0,031	0,325	-0,14	250 – 1200
Óxido nítrico	N₂O	0,49	1,65	-1,31	0,42	250 – 1200
Oxigênio	O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33	250 – 1200
Propano	C ₃ H ₈	-0,096	6,95	-3,60	0,73	250 – 1200
R-12	CCl ₂ F ₂	0,260	1,47	-1,25	0,36	250 – 500
R-22	CHClF ₂	0,200	1,87	-1,35	0,35	250 – 500
R-32	CF₂H₂	0,227	2,27	-0,93	0,041	250 – 500
R-125	CHF ₂ CF ₃	0,305	1,68	-0,284	0	250 – 500
R-134a	C ₂ F ₅ CH ₂ F	0,165	2,81	-2,23	1,11	250 – 500
Trióxido de enxofre	SO ₃	0,24	1,70	-1,50	0,46	250 – 1200

Fonte: Van Wylen (1995).

ANEXO G - IMAGEM GOOGLE MAPS, SÃO PEDRO DO SUL A SANTA MARIA.

Fonte: Google maps (2017).

APÊNDICE A - ACOMPANHAMENTO TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO E TEMPERATURA DA PAREDE E VOLUME ADICIONADO DE LENHA.

Hora	T (K)	Tp (K)	Volume (m³)	Hora	T (K)	Tp (K)	Volume (m³)
08:00	0	317	0,091	14:15	389	408	0
08:05	508	317	0	14:20	379	391	0,064
08:10	433	623	0,01	14:25	573	493	0
08:15	473	673	0,028	14:30	513	533	0
08:20	403	693	0	14:35	613	653	0
08:30	423	573	0,031	14:40	523	623	0
08:40	433	733	0,027	14:45	533	616	0
08:42	438	743	0,011	14:50	583	633	0
09:00	483	728	0,033	14:55	616	583	0
09:05	503	723	0	15:00	578	551	0
09:20	633	673	0	15:05	588	547	0
09:40	493	673	0	15:10	566	536	0
09:42	553	653	0	15:15	523	518	0
10:00	473	633	0	15:20	503	488	0
10:15	443	553	0	15:25	513	513	0
10:25	446	438	0	15:40	508	538	0
10:30	445	423	0,046	15:50	448	490	0
10:40	473	593	0	15:55	434	483	0
10:50	478	583	0	16:05	418	469	0
11:00	423	453	0	16:15	393	453	0
11:10	458	483	0	16:25	383	446	0
11:15	433	423	0,058	16:27	389	395	0,05
11:20	648	673	0	16:35	570	443	0
11:30	666	561	0	16:40	643	597	0
11:40	513	543	0	16:50	558	605	0
11:50	503	610	0	17:00	517	523	0
12:40	453	481	0	17:05	500	533	0
12:45	469	478	0,056	17:10	506	571	0
13:00	413	495	0	17:15	450	499	0
13:15	393	413	0	17:20	448	479	0
13:30	450	508	0	17:25	445	467	0
13:45	404	419	0	17:30	433	466	0
14:00	385	393	0	Média	479,71	535,71	-
				Soma	-	-	0,504

APÊNDICE B - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO COM COMBUSTÃO COMPLETA.

Taxa	7% a.a.										
Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tubulação	80										
Isolamento	60										
mão de obra	60										
Custos Totais	200										
Receitas		21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77
Saldo	-200	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77	21,77
VPL (R\$)	-R\$ 47,10										
VAE (R\$/ano)	-R\$ 6,71										
TIR (%)	2%										
payback (anos)	9,19										

APÊNDICE C - FLUXO DE CAIXA DA IMPLANTAÇÃO DO CASO REGENERATIVO COM COMBUSTÃO COMPLETA.

Taxa	7% a.a.										
Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trocador de Calor	900										
mão de obra	100										
Custos Totais	1000										
Receitas		1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66
Saldo	-1000	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66	1328,66
VPL (R\$)	R\$ 8.331,94										
VAE (R\$/ano)	R\$ 1.186,28										
TIR (%)	133%										

payback (anos) 0,90

APÊNDICE F – ANÁLISE ECONÔMICA PARA DIVERSAS PORCENTAGENS DE RECIRCULAÇÃO, COMPLETA (a) e INCOMPLETA (b).

Combustão completa						Informações normalizadas					
Retorno (%)	Economia (R\$/ANO)	VPL	VAE	TIR	Payback	Retorno (%)	Economia	VPL	VAE	TIR	Payback
3,10	8,71	-138,81	-19,76	-12,82	22,96	3,10	0,22	-1,84	-1,84	-0,88	1,00
6,97	13,07	-108,22	-15,41	-7,07	15,30	6,97	0,33	-1,44	-1,44	-0,49	0,67
19,37	21,78	-47,03	-6,70	1,58	9,18	19,37	0,56	-0,62	-0,62	0,11	0,40
27,90	26,14	-16,44	-2,34	5,19	7,65	27,90	0,67	-0,22	-0,22	0,36	0,33
37,97	30,49	14,16	2,02	8,51	6,56	37,97	0,78	0,19	0,19	0,58	0,29
49,60	34,85	44,75	6,37	11,62	5,74	49,60	0,89	0,59	0,59	0,80	0,25
62,77	39,20	75,35	10,73	14,57	5,10	62,77	1,00	1,00	1,00	1,00	0,22

(a)

Combustão incompleta						Informações normalizadas					
Retorno (%)	Economia (R\$/ANO)	VPL (R\$)	VAE (R\$/ano)	TIR (%)	Payback(anos)	Retorno (%)	Economia	VPL	VAE	TIR	Payback
3,15	27,36	-7,82	-1,11	6,15	7,31	3,15	0,07	0,00	0,00	0,03	3,36
12,60	92,03	446,35	63,55	44,88	2,17	12,60	0,22	0,16	0,16	0,22	1,00
19,69	138,34	771,68	109,87	68,80	1,45	19,69	0,33	0,28	0,28	0,33	0,67
28,35	193,99	1162,50	165,51	96,88	1,03	28,35	0,47	0,43	0,43	0,46	0,47
38,59	258,96	1618,82	230,48	129,45	0,77	38,59	0,62	0,59	0,59	0,62	0,36
50,41	333,25	2140,64	304,78	166,62	0,60	50,41	0,80	0,78	0,78	0,80	0,28
63,80	416,87	2727,95	388,40	208,43	0,48	63,80	1,00	1,00	1,00	1,00	0,22

(b)