

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIA HELOISA HEISS

**AVALIAÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO E DO POTENCIAL DE POLUIÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE BIOMASSA VEGETAL UTILIZADOS PARA A
GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS**

**TOLEDO
2022**

MARIA HELOISA HEISS

**AVALIAÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO E DO POTENCIAL DE POLUIÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE BIOMASSA VEGETAL UTILIZADOS PARA A
GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS**

**ASSESSMENT OF THE ENERGY COST AND POTENTIAL OF POLLUTION OF
FUEL DERIVED FROM VEGETABLE BIOMASS USED FOR THE GENERATION
OF STEAM IN BOILERS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Robson Luciano de Almeida

TOLEDO

2022



Esta licença permite compartilhamento do trabalho, mesmo para fins comerciais, sem a possibilidade de alterá-lo, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARIA HELOISA HEISS

**AVALIAÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO E DO POTENCIAL DE POLUIÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE BIOMASSA VEGETAL UTILIZADOS PARA A
GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação/
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e
Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 27 de maio de 2022

Robson Luciano de Almeida

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

Jones Erni Schmitz

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

Fabiano Bisinella Scheufele

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

TOLEDO

2022

Dedico este trabalho à minha família e amigos pelos
anos de apoio e suporte.
Enfim, o fim desta etapa está chegando...

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Então, desde já, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Robson, pela sabedoria, e paciência com que me guiou nesta trajetória.

Também agradeço ao professor Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt, da UTFPR Campus Medianeira, pela gentileza de realizar as análises de calorimetria.

Aos meus colegas de sala e amigos, os quais sempre me apoiam e me dão forças e apoio para chegar aonde eu almejo

Agradecimento mais que especial a Cassia, sócia-proprietária da empresa Prover Consultoria Ambiental e Segurança do Trabalho, primeiramente por ter abertas suas portas para que fosse sua estagiária durante um ano, empresa em que iniciei minha experiência no mercado de trabalho e que, muito além disso, continuou apoiando e deu importante suporte a este trabalho.

Agradeço também ao Marcos Paulo, sócio proprietário da Carnot Soluções em Bioenergia, pelo suporte a este trabalho de forma técnica e pelo fornecimento de dados e de amostras de materiais para a realização de testes.

Ao colegiado do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, que me acompanhou durante estes anos de graduação, deixo aqui a todo o meu agradecimento pelo suporte e conhecimento transmitido.

Gostaria de deixar registrado também o meu reconhecimento à minha família, por toda a paciência e apoio nesses 7 anos de UTFPR. Obrigada por acreditarem que eu era capaz de conseguir realizar este sonho. Além disso, um agradecimento especial as minhas irmãs por toda ajuda em trabalhos acadêmicos.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a conclusão desta graduação.

RESUMO

O vapor de água é uma das utilidades mais importantes do ponto de vista industrial quando se trata da necessidade de aquecimento nos processos. Atualmente, por sua grande utilidade, grande parte das indústrias têm sua própria unidade geradora de vapor. No entanto, dependendo do combustível utilizado na fornalha da caldeira, se pode poluir o meio ambiente com emissões gasosas que ultrapassem os limites legais permitidos para diversos poluentes. E, além disso, muitos combustíveis além de poluidores em potencial, podem encarecer o processo de produção de vapor, impactando muito nos custos da indústria. Dos principais combustíveis utilizados nas caldeiras industriais, os derivados da biomassa vegetal são os de maior importância devido a sua crescente utilização para esse fim. Assim, o objetivo geral do trabalho foi avaliar os combustíveis derivados de biomassa vegetal mais utilizados atualmente em caldeiras no oeste do estado do Paraná, tora e cavacos de eucalipto, e propor um combustível substituto que ofereça melhor custo-benefício em termos de custo energético e o potencial de poluição. Para isso, a metodologia seguida consistiu na preparação de amostras e avaliação do poder calorífico de tora de eucalipto, cavacos de eucalipto e pellets de pinus, avaliação do custo energético de possíveis combustíveis a ser usados em caldeiras e, por fim, a avaliação do potencial de poluição dos combustíveis cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que toras de eucalipto secas são o combustível de menor custo energético, chegando a ser quase 4 vezes mais barato energeticamente quando comparado aos *pellets* de pinus. No entanto, excetuando-se a questão do custo energético, os *pellets* de pinus são um combustível que apresenta um maior número de vantagens quando se comparado aos demais analisados, como maior facilidade para manuseio e transporte, maior capacidade de estocagem em espaços pequenos, maior facilidade de controle da pressão do vapor em caldeiras e menor potencial poluidor. Desta forma, o uso de *pellets* de pinus foi indicado como a melhor opção para aplicação em indústrias que buscam maiores facilidades na operação das caldeiras e vapor com melhor qualidade.

Palavras-Chave: Caldeiras. Vapor de água, Combustíveis. Biomassa. *Pellets*.

ABSTRACT

Steam is one of the most important utilities from an industrial point of view when it comes to the need for heating in processes. Currently, due to its great utility, most industries have their own steam generating unit. However, depending on the fuel used in the boiler's furnace, the environment can be polluted with gaseous emissions that exceed the legal limits allowed for various pollutants. And, in addition, many fuels, in addition to potential polluters, can make the steam production process more expensive, greatly impacting the industry's costs. Of the main fuels used in industrial boilers, those derived from vegetable biomass are the most important due to their increasing use for this purpose. Thus, the general objective of the work was to evaluate the fuels derived from vegetable biomass most used today in boilers in the west of the state of Paraná, eucalyptus logs and chips, and to propose a substitute fuel that offers better cost-benefit in terms of energy cost and the pollution potential. For this, the methodology followed consisted in the preparation of samples and evaluation of the calorific value of eucalyptus logs, eucalyptus chips and pine pellets, evaluation of the energy cost of possible fuels to be used in boilers and, finally, the evaluation of the potential pollution from eucalyptus chips and pine pellets. From the results obtained, it was possible to conclude that dry eucalyptus logs are the fuel with the lowest energy cost, being almost 4 times cheaper in energy when compared to pine pellets. However, except for the issue of energy cost, pine pellets are a fuel that has a greater number of advantages when compared to the others analyzed, such as greater ease of handling and transport, greater storage capacity in small spaces, greater ease of steam pressure control in boilers and less polluting potential. In this way, the use of pine pellets was indicated as the best option for application in industries that seek greater facilities in the operation of boilers and steam with better quality.

Keywords: Boilers. Steam. Fuels. Biomass. Pellets.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista interna de caldeiras (a) flamotubular e (b) aquatubular	18
Figura 2 – Cavacos de eucalipto	21
Figura 3 – Toras de Eucalipto	22
Figura 4 – <i>Pellets</i> de biomassa	24
Figura 5 – Reações químicas das combustões completa e incompleta	25
Figura 6 – Calorímetro IKA C200	31
Figura 7 – Analisador de gases Ecil Chemisti 500	32
Quadro 1 – Padrões para emissões de fontes novas de combustão externa utilizando derivados de madeira como combustível	28
Quadro 2 – Padrões para emissões de fontes existentes de combustão externa utilizando derivados de madeira como combustível	29
Quadro 3 – Padrões para emissões de fontes existentes de combustão não externa utilizando derivados de madeira como combustível	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de PCS para os combustíveis sólidos analisados	34
Tabela 2 – Valor do PCS para diferentes combustíveis	36
Tabela 3 – Custo energético para diferentes combustíveis	37
Tabela 4 – Extrato após análise de gases para a combustão de cavaco de eucalipto e Pellets de pinus	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Caldeiras	17
3.2 Poder calorífico	18
3.3 Combustíveis das caldeiras	19
3.2.1 Combustíveis gasosos	19
3.2.2 Combustíveis líquidos	20
3.2.3 Combustíveis sólidos.....	20
<u>3.2.3.1 Cavacos de eucalipto</u>	<u>21</u>
<u>3.2.3.2 Tora de eucalipto</u>	<u>22</u>
<u>3.2.3.3 Pellets de madeira</u>	<u>23</u>
3.4 Processo de combustão em caldeiras	25
3.5 Emissões atmosféricas	25
3.5.1 Tipos de poluentes e seus impactos ambientais.....	26
3.5.2 Padrões de emissões para o estado do Paraná	27
3.5.3 Métodos para análise e quantificação de emissões de poluentes	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Avaliação do custo energético dos combustíveis de caldeira	34
5.2 Avaliação do potencial de poluição dos combustíveis de caldeira	39
6 CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE A - EXTRATOS RETIRADOS DO EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE GASES	46

1 INTRODUÇÃO

Há séculos a sociedade vê a necessidade de unidades destinadas à geração de vapor para o uso principalmente na produção de força e movimento, sendo que as primeiras aplicações práticas dentro do ambiente industrial que se tem conhecimento são datadas do século XVII. Durante a Revolução Industrial o vapor de água era basicamente utilizado para mover máquinas e turbinas, porém, com o crescimento das indústrias o vapor passou a ser utilizado em diversas outras áreas, dentro e fora das indústrias.

As unidades geradoras de vapor mais conhecidas são as caldeiras, sendo que não importando o tipo do equipamento sempre será constituído por três partes essenciais: a fornalha, ou câmara de combustão, e as câmaras de líquido e de vapor. Os condutos para a descarga de gases e a chaminé não formam parte integral da caldeira, criando construções independentes que são adicionadas ao corpo resistente da mesma, não estando expostas a pressão de vapor (TEIXEIRA, 2017).

Para que se obtenha a geração de vapor é necessário o uso de algum tipo de combustível, sendo que atualmente o mais utilizado para esse setor é a biomassa, que é obtida a partir de madeiras em geral, e disposta na forma de toras, lenha, cavacos, serragem ou *pellets*. Outros tipos podem ser utilizados em caldeiras, como bagaço de cana de açúcar, óleo diesel ou óleo de xisto, no entanto, dependendo do combustível polui-se mais o meio ambiente, podendo ultrapassar os limites legais permitidos, além de encarecer o processo de produção de vapor.

Apesar da biomassa ser um combustível considerado renovável, na sua combustão é possível verificar a geração de gases poluidores para a atmosfera, podem aumentar o efeito estufa, assim como os outros tipos de combustíveis (CASTRO, 2018). Mas, estudos tem mostrado que combustíveis produzidos a partir da biomassa podem oferecer vantagens em termos de poluição atmosféricas em relação aos demais. No entanto, os dados são incipientes, sendo que mais estudos devem ainda ser feitos em relação ao potencial poluidor da biomassa.

Atualmente a preocupação com a conservação do meio ambiente está cada vez mais relevante, sendo que as indústrias são consideradas as maiores fontes poluidoras da atmosfera, com a emissão de gases considerados poluentes, além da geração de fluente líquido e resíduos. E esses gases devem ser monitorados pelos órgãos competentes a fim de que normas ambientais federais sejam atendidas, como a resolução CONAMA nº 382/2006, que delimita os parâmetros de emissões para os

diferentes combustíveis utilizados. Em específico, no estado do Paraná a resolução que delimita os parâmetros de emissões atmosféricas é a SEMA nº 16/2014 que, por sua vez, é mais rígida se comparada a regulação federal, prevalecendo sobre ela. O não cumprimento da legislação pode acarretar à indústria complicações com o órgão de fiscalização ambiental, necessidade de ajuste de conduta e multa.

No entanto, dependendo do combustível utilizado na fornalha da caldeira, se pode poluir o meio ambiente com emissões gasosas que ultrapassem os limites legais permitidos para diversos poluentes. E, além disso, muitos combustíveis além de poluidores em potencial, podem encarecer o processo de produção de vapor, impactando muito nos custos da indústria.

Dos principais combustíveis utilizados nas caldeiras industriais, os derivados da biomassa vegetal são os de maior importância devido a sua crescente utilização para esse fim. E, no Brasil, sobretudo da região oeste do estado do Paraná onde o trabalho foi realizado, os principais combustíveis derivados de biomassa vegetal utilizados são as toras e cavacos de eucalipto.

Há, portanto, a necessidade de uma investigação sobre o real potencial poluidor desses combustíveis mais utilizados, seu custo-benefício em relação ao poder calorífico fornecido e a possibilidade de substituição desses por outro que tenha menor potencial de poluição e com melhor aproveitamento de seu potencial energético. Os *pellets* de pinus são possivelmente o combustível que atende aos requisitos de baixo custo energético quando comparados aos demais e que oferece o mínimo de potencial poluidor ao meio ambiente. Essa é, no entanto, ainda uma hipótese a ser verificada.

Pinus é um gênero de plantas trazidas da América do Norte ao Brasil por imigrantes há mais de cem anos, sendo que aqui as árvores deste gênero ficaram conhecidas como pinheiros, juntamente com espécies nativas que não fazem parte do mesmo gênero, como a araucária. Os *pellets* de pinus é um produto relativamente novo que está sendo oferecido como substituto aos combustíveis existentes como um combustível de maior poder calorífico e também indicado como solução para redução da poluição atmosférica resultante da queima.

Cabe, então, como um meio de contribuir para uma solução, um estudo que quantifique e compare o potencial de poluição e o poder calorífico desses combustíveis, de forma a verificar se realmente os *pellets* de pinus poderiam ser o

melhor combustível a ser indicado em substituição aos mais utilizados em caldeiras atualmente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi avaliar os combustíveis derivados de biomassa vegetal mais utilizados atualmente em caldeiras no oeste do estado do Paraná, tora e cavacos de eucalipto, e propor um combustível substituto que ofereça melhor custo-benefício em termos de custo energético e o potencial de poluição.

Os objetivos específicos foram:

- a) Estudo dos principais combustíveis que poderiam ser utilizados em caldeiras, avaliando sua disponibilidade regional, potencial de poluição e poder calorífico.
- b) Quantificação do custo energético atual e potencial de poluição dos combustíveis com possibilidade de uso em caldeiras na região oeste do estado do Paraná, incluindo tora de eucalipto, cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus.
- c) Verificação se os *pellets* de pinus podem ser indicados como combustível substituto aos demais com melhor relação custo-benefício em relação em termos de custo energético e o potencial de poluição.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui é apresentada a conceituação dos tópicos de análise do trabalho. Inicia-se pela descrição do equipamento gerador de vapor, a caldeira, seguido pelos combustíveis utilizados para a geração de calor, o processo de combustão destes para a liberação de energia. E, por fim, são abordadas as emissões atmosféricas, os problemas que estas causam ao meio ambiente, as resoluções vigentes no estado do Paraná e os métodos que devem ser utilizados para análise das emissões.

3.1 Caldeiras

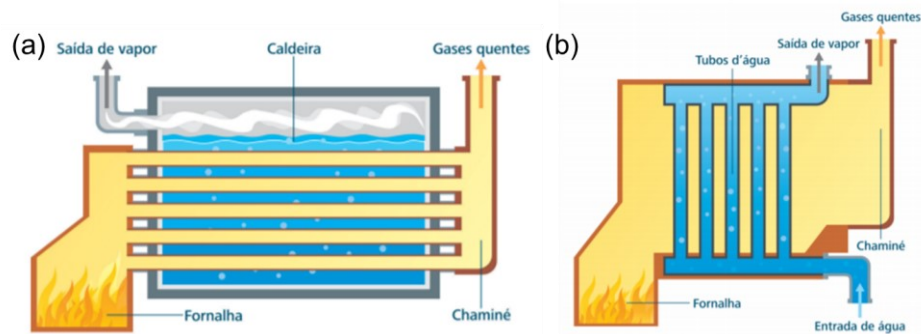
Caldeira é o nome popular dado a unidade geradora de vapor, cuja maior aplicação encontra-se no setor industrial, sendo que também são frequentemente utilizadas como unidades geradoras de energia elétrica em centrais termoelétricas. Desta forma, todas as atividades que necessitam de vapor para seu funcionamento devem ter obrigatoriamente em seu processo uma caldeira (ALTAFINI, 2002).

Segundo Torneira (1995) apud Teixeira (2017, p.48) a caldeira a vapor é como um trocador de calor que produz vapor de água com pressão superior à pressão atmosférica, a partir de energia térmica liberada pela queima de um combustível e um elemento comburente, na maioria das vezes ar, constituído por diversos equipamentos associados e perfeitamente integrados para permitir a obtenção do maior rendimento possível.

As caldeiras podem ser construídas de diversos tipos e tamanhos, sendo os tipos mais comuns os que são classificados como flamotubulares e aquatubulares. Em todo caso, o tipo escolhido e suas devidas características variam de acordo com as condições e necessidades, visto que possuem plantas individuais (TEIXEIRA, 2017).

As caldeiras flamotubulares são aquelas em que os gases quentes ou de combustão passam por dentro dos tubos e a água a ser aquecida e evaporada fica ao redor destes tubos. Estas são mais utilizadas em operações que necessitam de vapor saturado (ARRUDA, 2009). Já nas aquatubulares a água passa por dentro e os gases de combustão por fora dos tubos, ou seja, o lado da água fica para dentro e o lado de fogo fica para fora dos tubos (BEGA, 2003). A Figura 1 ilustra uma vista externa dos dois tipos de caldeiras.

Figura 1- Vista interna de caldeiras (a) flamotubular e (b) aquatubular



Fonte: Aita e Peixoto, p. 43,44 (2013).

3.2 Poder calorífico

O poder calorífico, ou calorimétrico, é uma das formas de se medir a capacidade energética de um combustível, este tipo de medida pode ser obtido através de bomba calorimétrica ou calorímetro, por exemplo. Está pode ser definida como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa (normalmente 1 kg) do material combustível (SILVA *et al.*, 2011).

O poder calorífico de um material pode ser expresso de duas formas: poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O PCS é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de 1 kg do combustível, mas tendo toda a água resultante na fase líquida. Já o PCI é a quantidade de energia em forma de calor liberada pela combustão completa de 1 kg após a evaporação da água e todo os excessos de gases que esse processo de evaporação causa. Isto é, no PCI considera-se toda a água resultante no estado gasoso. Portanto, a diferença entre eles é a entalpia de vaporização da água. Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nas máquinas térmicas, a água contida neles se encontra sempre no estado de vapor. Portanto, deve-se considerar sempre o poder calorífico inferior e não o superior (NEIVA, 2018).

Segundo Pereira *et al.* (2000) o poder calorífico da madeira está diretamente relacionado com o seu teor de umidade. A queima da madeira úmida proporciona menos energia devido ao consumo no aquecimento e vaporização da água. Para que ocorra uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com teores de umidade abaixo de 25%. Com isso, quanto mais úmida maior será a quantidade de energia para secar e iniciar a queima. Já de acordo com Precci *et al.* (2001) os valores ideais

do teor de umidade para caracterizar o uso da madeira como energética devem apresentar teores de umidade inferior a 30%.

3.3 Combustíveis das caldeiras

Existem muitos combustíveis possíveis para se utilizar como fonte de energia para o processo de geração de calor. Uma classificação muito utilizada é a de divisão em combustíveis de origem fóssil ou não renovável, como gasolina, óleo diesel e óleo de xisto, e os combustíveis renováveis como: etanol, lenha e *pellets*. Além disso, qualquer combustível pode ainda ser classificado de acordo com seu estado físico: sólido, líquido ou gasoso.

3.2.1 Combustíveis gasosos

São combustíveis que não necessitam de preparação para a combustão por já estarem no estado gasoso, ou seja, são utilizados diretamente no processo assim como são recebidos do fornecedor, sendo o único cuidado necessário é a adequação de pressão do gás à característica do queimador (BEGA, 2003).

Os principais combustíveis gasosos utilizados são o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP). O gás natural é um combustível de origem fóssil, que possui inúmeras aplicações industriais e domésticas. Sua combustão é considerada limpa, pois geralmente apresenta baixos teores de contaminantes como o nitrogênio, dióxido de carbono, água, compostos de enxofre e material particulado. Apresenta poder calorífico inferior de $39.330 \text{ kJ kg}^{-1}$, massa específica para 1 atmosfera de pressão e 20°C de aproximadamente $0,70 \text{ kg m}^{-3}$ e teor de enxofre de 70 mg m^{-3} (ARRUDA, 2009; BRASIL, 2020).

Já o GLP, um combustível de origem fóssil de origem energética não renovável, no Brasil é popularmente conhecido como “gás de cozinha”, apesar de comercializado em forma líquida dentro de botijões. O GLP comercializado é composto por propano e butano. O GLP apresenta poder calorífico inferior de $45.187 \text{ kJ kg}^{-1}$, massa específica para 1 atmosfera e 20°C é de no máximo 500 kg m^{-3} e teor de enxofre de 140 mg kg^{-1} (ARRUDA, 2009; BRASIL, 2020).

3.2.2 Combustíveis Líquidos

Segundo Bega (2003), um combustível líquido para ser queimado deve ser vaporizado ou atomizado facilitando assim a vaporização com a energia da chama ou com os gases da combustão. E assim, autossustentando a combustão.

Os combustíveis líquidos podem ser minerais ou não minerais. Os combustíveis minerais são obtidos pela refinação do petróleo, destilação do xisto betuminoso ou pela hidrogenação do carvão. Dentre estes pode-se citar como exemplos a gasolina, o óleo diesel e o óleo de xisto. Muitos destes combustíveis são formados de cadeias carbônicas orgânicas compostas apenas por carbono e hidrogênio, e em sua grande parte são fontes energéticas não renováveis (ARRUDA, 2009).

Como exemplos de combustíveis líquidos não minerais pode-se citar os álcoois, como o metílico e o etílico, e os óleos vegetais. Desses, os óleos vegetais são os mais utilizados pelas indústrias (ARRUDA, 2009).

Arruda (2009) afirma que os combustíveis líquidos apresentam algumas características próprias que devem ser levadas em consideração como poder calorífico, volatilidade, calor latente, viscosidade e ponto de fulgor. Como os combustíveis citados anteriormente apresentam grande uso, estes possuem os dados de poder calorífico e massa específica conhecidos, assim pode-se citar o óleo diesel que apresenta poder calorífico inferior (PCI) de $42.677 \text{ kJ kg}^{-1}$ e massa específica de $820\text{-}880 \text{ kg m}^{-3}$.

3.2.3 Combustíveis sólidos

Os combustíveis sólidos podem ter origem fóssil, como carvão, coque e betume, ou vegetal, como madeira, em toras, briquetes ou *pellets*, e bagaço de cana de açúcar. Esses combustíveis podem ser classificados como renováveis e não renováveis (MIRANDA, 2009; ARRUDA, 2009)

O bagaço de cana de açúcar é um dos principais combustíveis utilizados para a geração de energia no país, sendo que em 2021 forneceu 10,8% de toda a energia consumida pelas indústrias no Brasil (EPE, 2022). É muito comum que se utilize o bagaço da cana como combustível para a geração de vapor em caldeiras, mesmo que sua umidade possa corresponder a mais de 50% de seu peso, quando utilizado em caldeiras, em sua queima a água evapora e a energia do material sólido é liberado na

combustão, podendo apresentar poder calorífico superior entre $1.820 - 950 \text{ kJ kg}^{-1}$, dependendo de sua umidade na hora da queima (REIS e KLUCK 2015; ARIEDI, Jr. e MIRANDA, 2009).

As características das lenhas podem se diferenciar bastante de espécie para espécie devido a suas características químicas e estruturais. A madeira pode ser utilizada para queima na forma de toras, lascas, de serragem, *pellets* ou briquetes. O *pellet* é uma forma comprimida de tamanho uniforme e umidade controlada, que o torna mais simples em sua utilização e armazenamento quando comparado a outros combustíveis sólidos. Além disso, os *pellets* facilitam a automação de sistemas de alimentação devido à necessidade de tecnologias mais simples (MIRANDA, 2009).

Então, conforme afirma Miranda (2009), por serem combustíveis renováveis a madeira ou lenha e seus derivados são muito mais utilizados devido a fatores como: estabilidade nos preços, redução do impacto ambiental (chuvas ácidas e aquecimento global), eficiência energética e queima de baixas emissões atmosféricas.

3.2.3.1 Cavacos de eucalipto

Os cavacos de eucalipto são um dos resíduos da indústria de beneficiamento de madeira, sendo este composto por lascas de madeira, resultantes da picagem da madeira, e pode apresentar diversos tamanhos, conforme mostrado na Figura 2 (NEIVA, 2018).

Arruda (2009) afirmou que este combustível apresenta poder calorífico inferior igual a $10.460 \text{ kJ kg}^{-1}$ e massa específica de 330 kg m^{-3} e baixo teor de enxofre. Ainda é importante destacar que sua umidade é viável pois depende das condições as quais este é armazenado.

Figura 2 – Cavacos de eucalipto



Fonte: NEIVA (2018).

Experimentos feitos por Junqueira et al. (2017) mostraram que cavacos armazenados em locais abertos possuem umidade que pode variar de 22,23% a 42,64%, com valor médio de 34,87%. Nestas condições os cavacos apresentaram um poder calorífico inferior de 2.703,87 kcal/kg, ou 11.312,05 kJ/kg.

3.2.3.2 Tora de eucalipto

A tora de eucalipto, *Eucalyptus sp*, é uma das formas que se utiliza este material como fonte de carbono para a geração de calor, a madeira deste material tem grande importância nos setores comercial, residencial e industrial. A tora é a parte de uma árvore, seções do seu tronco ou sua principal parte, em formato roliço destinada ao processamento industrial (SIMIONI *et al.*, 2015; BRASIL, 2020). Uma foto de um empilhamento de toras é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Toras de Eucalipto



Fonte: FOELKEL (2016).

A madeira, apesar de ter inúmeras vantagens como baixo custo, menor número de poluentes emitidos a atmosférica quando queimada e, ainda, menor corrosão em fornos e caldeiras, tratar-se ainda de um combustível renovável. Porém, a madeira também apresenta suas desvantagens, como maior emissão de materiais particulados ao ambiente e dificuldade em seu armazenamento, bem como sua logística é mais complexa, devido seu tamanho e peso (GATTO *et al.*, 2003).

Ainda segundo Gatto et al. (2003), a tora de eucalipto pode apresentar diferentes valores de poder calorífico, pois este depende da quantidade de umidade

presente no tronco, fator esse também que afeta a peso específico. O autor afirma que um tronco com teoricamente 0% de umidade, isto é, absolutamente seco, pode apresentar o valor de poder calorífico inferior de $18.828 \text{ kJ kg}^{-1}$, enquanto um que tiver cerca de 12% de umidade em sua estrutura tem cerca poder calorífico superior em cerca de $19.623 \text{ kJ kg}^{-1}$ e massa específica de 570 kg m^{-3} .

Quanto a umidade, a madeira armazenada em local aberto normalmente apresenta umidade entre 20% e 45%. No entanto, o teor de umidade varia dependendo de vários fatores, incluindo a geometria do material e a posição da tora no empilhamento. O teor de umidade da tora de eucalipto estocada em pátios industriais varia, por exemplo, ao longo da altura das pilhas, sendo maior, quanto mais próxima ao solo. A madeira situada na parte superior das pilhas seca mais rapidamente exposta ao vento e ao sol quando comparada à madeira situada nas camadas mais baixas (GATTO *et al.*, 2003).

3.2.3.3 Pellets de madeira

Com o aumento da demanda por combustíveis, aumento nos preços e a preocupação com questões ambientais, surgiram novas tecnologias relacionadas a matrizes energéticas e, nesse contexto, encontram-se os *pellets* produzidos a partir de madeira. Este combustível tem se mostrado muito vantajoso quando comparado a outros isso devido a características suas como umidade controlada (abaixo de 10%), sua densidade (1.000 kg m^{-3} a 1.500 kg m^{-3}), seu formato cilindro e homogêneo que permite uma maior fluidez na queima (GARCIA, CARASCHI, VENTORIM, 2017; BOGDEZEVICIUS *et al.*, 2018).

Os *pellets* são pequenos cilindros de madeira densos e compactos, os quais podem ser produzidos com os resíduos da indústria madeireira, tais como: a serragem, maravalhas, aparas, cavacos e galhos. Essa matéria-prima é processada nas plantas industriais estacionárias e com alta pressão e temperatura, são comprimidos no formato de pequenos cilindros de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro e até 30 mm de comprimento, devendo ser produzidos com umidade menor que 10% (GARCIA *et al.*, 2012). Uma foto de *pellets* de madeira é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Pellets de biomassa



Fonte: GARCIA, CARASCHI, VENTORIM (2017).

Devido a sua umidade controlada os *pellets* têm alto poder calorífico e elevada eficiência na combustão, o que os tornam viáveis para o uso de geração de calor em indústrias. Nos últimos anos os países com necessidade de diminuir suas emissões atmosféricas apostaram no uso da biomassa sólida como combustível. Isto ocorreu com os países europeus, por exemplo, que consumiram só no ano de 2020 de cerca de 50,0 milhões de toneladas de biomassa sólida. A preocupação com as emissões atmosféricas existe a décadas, porém somente a partir de 1997 com o Protocolo de Kyoto, o qual estabeleceu normas referentes a poluição atmosféricas aos países, é que os cuidados se intensificaram. O Protocolo de Kyoto expiraria em 2012, mas teve sua vigência prorrogada até 2020 por meio da Emenda de Doha. Como substituição ao Protocolo de Kyoto selou-se em 2015 o Acordo de Paris, o qual passou a ser vigente a partir de 2020 e tem como principal objetivo mitigação e adaptação do mundo as mudanças climáticas (GARCIA *et al.*, 2012; MOREIRA e ESTEVO, 2018).

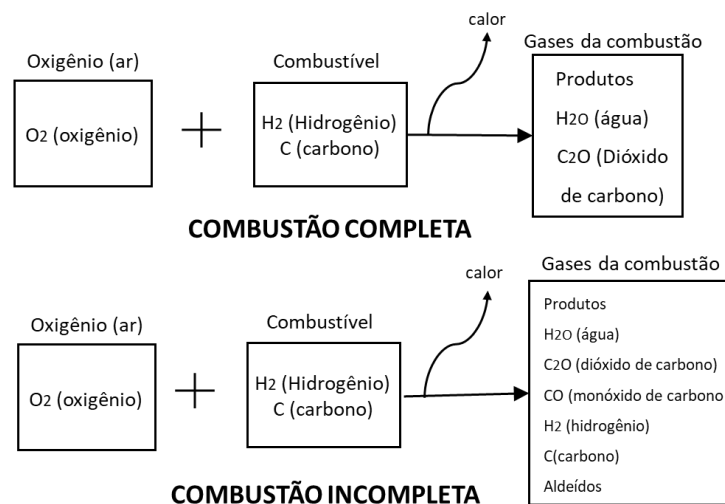
A utilização de *pellets* para geração de energia tem, além dos benefícios ambientais, as vantagens de contribuir com diminuição do espaço necessário para armazenamento, facilitar a operação e a logística e contribuir com a redução da receita necessária para compra de combustíveis, pois tem ótimo rendimento energético. Sendo assim, tem-se um combustível renovável que pode ser fabricado a partir de resíduos de biomassa ou agrícolas, com alto poder calorífico e inúmeras vantagens quando colocado em comparação a outros já largamente utilizados (BOGDEZEVICIUS *et al.*, 2018; QUENÓ, 2015).

3.4 Processo de combustão em caldeiras

Conforme Bega (2003), em todos os tipos de combustível a combustão é feita pelo processo de oxidação do hidrogênio e carbono contidos no combustível com o oxigênio existente no ar atmosférico, que é composto basicamente de 21% de O_2 e 79% de N em volume. O nitrogênio ou qualquer outro elemento presente no ar que não seja um combustível passam pelo processo de oxigenação sem modificações essenciais.

A combustão pode ocorrer de forma completa ou incompleta, sendo que isto afeta diretamente a eficiência energética do processo e altera também os gases resultantes da combustão. Assim sendo, o ideal é que a combustão do processo ocorra o mais próximo de completa quanto o possível, pois quando isso ocorre os produtos saem do processo em sua forma química mais oxidada (BEGA, 2003; ARRUDA, 2009). A combustão incompleta afeta também as emissões atmosféricas da operação, visto que os gases do processo não se encontram todos em sua forma mais oxidada, como ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Reações químicas das combustões completa e incompleta



Fonte: Adaptado de BEGA (2003)

3.5 Emissões atmosféricas

Segundo Carvalho Junior e Lacava (2003) as emissões atmosféricas são descritas como produtos que deixam o local do processo através do ar e que possuem um grande volume por unidade de massa e, uma vez lançados na atmosfera,

misturam-se com o ar e são levados pelas correntes atmosféricas em um movimento basicamente não controlável. Nesse sentido, concorda-se com os autores quando eles afirmam que as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos são os gases resultantes de dispositivos que aproveitam energia térmica liberada pelas reações de combustão.

Conforme a resolução SEMA n° 16/2014 o controle da Qualidade do Ar é um dos instrumentos básicos da gestão ambiental, para proteção da saúde e bem-estar da população. Esse mesmo documento estabelece os padrões de emissão e critérios de atendimento para fontes industriais, comerciais e de serviços, os padrões de condicionamento e metodologias a serem utilizadas para determinação de emissões visando a melhoria na qualidade do ar (PARANÁ, 2014).

Também, segundo a resolução SEMA n° 16/2014, as caldeiras são consideradas fontes estacionárias, que é uma classificação aplicada a qualquer equipamento ou processo natural ou artificial fixo em um local específico e que possa emitir matéria ou energia para a atmosfera. Entende-se, na verdade, que qualquer fonte de emissão atmosférica responsável pelo lançamento na atmosfera de qualquer forma de matéria sólida (material particulado total), líquida ou gasosa (gases de efeito estufa) pode ser uma fonte potencialmente poluidora do ar (PARANÁ, 2014).

As emissões dispõem padrões de difusão a serem seguidos os quais devem ser monitorados conforme o tempo estipulado pela resolução. Esses padrões são definidos também a partir da potência da caldeira que será analisada e seu ano de instalação ou pedido para licença de instalação, sendo esse último que define se a fonte se enquadra em nova ou existente (PARANÁ, 2014).

Os padrões de emissões devem ser expressos em mg Nm^{-3} e são aplicados pela resolução SEMA n° 16/2014 para material particulado total (MPT), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), os quais têm um valor corrigido levando em consideração o percentual médio de oxigênio (O_2) presente na amostragem (PARANÁ, 2014).

3.5.1 Tipos de poluentes e seus impactos ambientais

Conforme a legislação vista, resolução SEMA n° 16/2014, para emissões em chaminés os poluentes que devem ser monitorados são MPT, CO, NO_x e SO_x , os quais são descritos a seguir.

Monóxido de carbono (CO): É um gás incolor, inodoro e tóxico, produzido por meio da queima incompleta do carbono do combustível. Se a oxidação ocorre de forma completa gera-se, em vez do CO, o dióxido de carbono (CO₂), que por sua vez é considerado o principal causador do efeito estufa. O CO₂ não oferece risco a saúde humana quando em baixa concentração, já o CO, ao contrário, pode causar inúmeras consequências ao ser humano, como a diminuição no transporte de oxigênio pelo sangue, a diminuição de reflexos e até a morte (PELANDA, 2016; ARRUDA, 2009).

Óxidos de nitrogênio (NO_x): São o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO é um gás incolor e o NO₂ que tem coloração marrom, pois este é capaz de absorver a luz solar. Virtualmente o NO₂ é originado pela oxidação do NO quando exposto a luz solar. O NO₂ tem um papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos, como o ozônio. Este também é capaz de causar consequências ao ser humano, tais como, irritações no sistema respiratório e diminuição da resistência a infecções respiratórias (PELANDA, 2016).

Óxidos de enxofre (SO_x): São o dióxido e trióxido de enxofre, SO₂ e SO₃, respectivamente. Esse poluente em forma de dióxido de enxofre (SO₂) tem como principais características ter um forte odor e ser incolor. A emissão desses óxidos está ligada a fontes antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis (gasolina, óleo diesel, etc). Os óxidos de enxofre podem ser prejudiciais ao ser humano e a vegetação, como também podem colaborar na formação das chuvas ácidas que são prejudiciais a inúmeros materiais e ao meio ambiente (PELANDA, 2016).

Material Particulado Total (MPT): Define-se MPT como todo e qualquer material sólido ou líquido que se mantém em mistura gasosa na temperatura do meio filtrante, estabelecida pelo método adotado. Esses materiais podem afetar a saúde humana se atingirem diretamente o sistema respiratório, e quanto menor for seu tamanho maior podem ser os danos causados. Além disso, podem diminuir a visibilidade na atmosfera, como uma sujeira no ar, além de causarem corrosão e serem capazes de potencializar os efeitos fisiológicos dos demais gases presentes nas emissões (PARANÁ, 2014; PELANDA, 2016).

3.5.2 Padrões de emissões para o estado do Paraná

Conforme visto, a resolução válida no estado do Paraná e que impõe os limites quanto às emissões atmosféricas é a SEMA n° 16/2014. Essa resolução se sobrepõe

a normativa federal CONAMA N° 382/2006, que trata do mesmo assunto, já que aquela possui parâmetros mais rigorosos.

A produção de energia e a correta destinação de resíduos industriais continua sendo um grande desafio para a sociedade. Os quadros 1, 2 e 3 apresentam os padrões para emissões atmosféricas de fontes geradoras de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível, com exceção de fornos de pão, pizza a lenha e churrasqueiras. Nota-se ainda que estes são definidos de acordo com a potência da fonte emissora, seu combustível enquadramento de fonte (nova ou existente), e combustão interna ou externa. Os parâmetros são MPT, CO, NO_x, SO_x, frequência de amostragem e oxigênio de referência para realização dos cálculos. O oxigênio de referência é de 11% para combustão externa, e de 17% para não externa (PARANÁ, 2014).

Quadro 1 – Padrões para emissões de fontes novas de combustão externa utilizando derivados de madeira como combustível

Padrões para fontes novas de combustão externa:

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO ⁴⁾ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,05	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	5.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP- total, O ₂	Anual
Entre 0,05 e 0,15		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 0,15 e 1,0		560 ¹⁾	1.300 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 1,0 e 10		560 ¹⁾	1.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 30		400	2.000 ³⁾ 1.000 ³⁾	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 30 e 50		200	2.000 ³⁾ 1.000 ³⁾	500	NA		Semestral
Entre 50 e 70		200	1.000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100		100	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100	100	500	500	NA	NA	Contínuo	

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador;

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia;

3) válido a partir de 26/12/2016;

4) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga;

5) válido até 25/12/2016.

Fonte: PARANÁ (2014)

Quadro 2 – Padrões para emissões de fontes existentes de combustão externa utilizando derivados de madeira como combustível

Padrões para fontes existentes de combustão externa:

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO ³⁾ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	6.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador e definido no Programa de Automonitoramento.

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia.

3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga

NA: Não aplicável

Fonte: PARANÁ (2014)

Quadro 3 – Padrões para emissões de fontes existentes de combustão não externa utilizando derivados de madeira como combustível.

Padrões para fontes novas e existentes de combustão não externa:

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO ³⁾ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	6.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	3.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 100		200	3.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	2.000	500	NA		Contínuo

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia

3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga

NA: Não aplicável

Fonte: PARANÁ (2014)

3.5.3 Métodos para análise e quantificação de emissões de poluentes

As coletas são realizadas seguindo a Resolução SEMA nº 16/2014, a qual determina que as medidas utilizadas para determinação dos pontos de amostragem de dutos e chaminés devem seguir as normas ABNT NBR 10701/1989 e CETESB L 9.221. A execução das medições das emissões atmosféricas deve seguir a norma VDI 4200/2000. Seguindo as normas citadas, deve-se realizar 10 medidas de gases em cada duto ou chaminé, em intervalos constantes de tempo pré-definidos e por meio de uma sonda inserida em uma altura estabelecida. A partir dos valores obtidos nessas coletas é calculada a média de cada um dos gases de combustão, que ainda deve ser corrigida com o nível de oxigênio. Os cálculos são realizados utilizando-se da Equação 1.

$$CR = \frac{21-OR}{21-OM} \cdot CM \quad (1)$$

Sendo:

CR: concentração corrigida (mg Nm^{-3});

OR: concentração do oxigênio de referência, em % de volume;

OM: média dos valores de concentração do oxigênio medido, em % de volume;

CM: concentração medida (mg Nm^{-3}).

Vale destacar que a unidade de medida mg Nm^{-3} refere-se à concentração gravimétrica nas condições de 1013 mbar e 0°C em base seca, esses valores de pressão e temperaturas são conhecidos também como condições normais de temperatura e pressão, CNTP (PARANÁ, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de tora e cavacos de eucalipto foram obtidas de uma agroindústria localizada na região oeste do estado do Paraná. Já a amostra de *pellets* de pinus foi doada pela empresa Carnot Bioenergia – Indústria e comércio de *pellets*, localizada na cidade de Matelândia/PR.

Para a tora providenciou-se dois tipos de amostras, a fim de comparação, uma armazenada em condições externas similares a da maioria das indústrias, deixadas a céu aberto durante 60 dias, sujeitas às intempéries e, portanto, com alta umidade. Outra, acondicionada em ambiente protegido de chuvas pelo mesmo período e, portanto, com umidade característica de produtos armazenados nestas condições, o que para toras não é comum nas indústrias. Para os cavacos, providenciou-se como único tipo de amostra o armazenado em condições externas, representando a situação mais comum de armazenamento de grandes lotes nas indústrias. Já os *pellets* obtidos foram mantidos na condição de fornecimento pela empresa, com baixa umidade.

O poder calorífico de cada combustível foi medido utilizando um calorímetro marca IKA, modelo C200, similar ao apresentado na Figura 6. Na análise 0,5 g de amostra sem tratamento prévio é utilizada para obtenção de seu poder calorífico superior (PCS). Para cada amostra essa análise foi realizada em triplicata.

Figura 6 – Calorímetro IKA C200.



Fonte: IKA (2022)

O custo energético de possíveis combustíveis a ser usados em caldeiras foi calculado com a Equação 2, utilizando o custo do combustível e o seu poder calorífico.

$$CE = \frac{C}{PCS} \quad (2)$$

Sendo:

CE = custo energético do combustível, em R\$ kJ⁻¹;

C = custo de aquisição do combustível, em R\$ kg⁻¹;

PCS = poder calorífico superior do combustível, em kJ kg⁻¹;

O custo de aquisição de cada combustível foi obtido por meio de orçamentos e consultas diretamente com empresas fornecedoras.

A avaliação do potencial de poluição dos combustíveis cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus foi realizada com a utilização de um analisador de gases marca Ecil e modelo Chemisti 500, similar aos mostrado na Figura 7. Os gases quantificados por este equipamento são O₂, CO₂, CO e SO₂. Este equipamento foi utilizado na análise dos gases emitidos à atmosfera pela chaminé de uma caldeira pertencente a uma agroindústria localizada na região oeste do Paraná. Devido a indústria utilizar somente cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus como combustíveis, apenas para esses dois foi possível a obtenção dos dados de emissão gasosa para comparação.

Figura 7 – Analisador de gases Ecil Chemisti 500.



Fonte: ECIL (2022)

Por um acordo prévio, os equipamentos para realização das análises bem como os dados destas foram gentilmente fornecidos pela empresa Prover Consultoria

Ambiental e Segurança do Trabalho, a qual atua na área de consultoria ambiental e realiza medições de emissões atmosféricas, com sede na cidade de Toledo/PR e representantes comerciais em diversos estados do Brasil. As coletas foram realizadas seguindo a legislação vigente, a Resolução SEMA nº 16/2014, a qual dita os parâmetros das emissões atmosféricas e as normas que devem ser aplicadas para a realização deste tipo de análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção os resultados obtidos no trabalho são apresentados e discutidos, conforme cada etapa realizada.

5.1 Avaliação do custo energético dos combustíveis de caldeira

Os três combustíveis escolhidos, como já citado, foram tora de eucalipto, cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus. Tanto toras como cavacos são compostos de biomassa lignocelulósica vegetal amplamente utilizados em caldeiras ou secadores de grãos na região oeste do Paraná. *Pellets* de pinus, por sua vez, é um produto relativamente novo que está sendo oferecido como substituto aos combustíveis existentes como um combustível de maior poder calorífico e indicado como solução para redução da poluição atmosférica resultante da queima.

Como já abordado anteriormente, a tora de eucalipto possui diversas vantagens como sua menor capacidade de emissão de poluentes na atmosfera, baixo potencial de corrosão aos equipamentos de queima e alta disponibilidade no país. Porém, devido ao seu tamanho, peso e formato, há dificuldades no armazenamento e na logística interna e de transporte (GATTO et al., 2013).

Nesse sentido, as amostras de tora submetidas as diferentes condições de armazenamento, juntamente com os cavacos de eucalipto e os pellets de pinus, foram devidamente amostrados, e os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de PCS para os combustíveis sólidos analisados

Material	Poder Calorífico Superior (kJ·kg⁻¹)
Cavacos de eucalipto em condições externas	12.400 ± 1.200
Tora de eucalipto seca	18.600 ± 1.900
Tora de eucalipto em condições externas	15.900 ± 1.600
<i>Pellets</i> de pinus	19.600 ± 2.000

Fonte: A autora (2022).

Nas indústrias comumente não se analisa a umidade dos combustíveis sólidos que vão ser queimados na caldeira. Na Tabela 1, combustíveis em condições externas

representam esses combustíveis que normalmente tem umidade muito mais alta do que os armazenados protegidos das chuvas. Essa umidade depende das condições de armazenamento, como modo de empilhamento, e das condições climáticas antes do consumo do combustível. Toras ou cavacos com alta umidade devido a exposição aberta em períodos chuvosos normalmente ficam com textura e coloração característica. Na prática os operadores de caldeira dão preferência sempre a combustíveis mais secos para a queima, fazendo sempre uma seleção quando possível. Conforme dados da literatura, tem-se que a umidade de cavacos armazenados em locais abertos pode variar de 22,23% a 42,64% (JUNQUEIRA et al., 2017) e toras de eucalipto armazenadas em locais abertos normalmente apresenta umidade entre 20% e 45% (GATTO et al., 2003). Gatto et al. (2003) relata um experimento com tora de eucalipto seca a 12%, mas sabe-se que esse valor pode variar dependendo de diversos fatores. Já para pellets, como um produto comercial em que a baixa umidade é apresentada como vantagem, entre outros fatores, é comum encontrar valores abaixo de 10%. Para bagaço de cana armazenado a céu aberto espera-se umidade de até 60%.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 1, o combustível com maior poder calorífico entre os analisados foram os *pellets* de Pinus. Considerando o erro de $\pm 2.000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, para os *pellets* tem-se que o poder calorífico pode estar entre 17.600 e 21.600 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto o da tora de eucalipto seca estaria entre 16.700 e 20.500 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, considerando o seu erro de $\pm 1.900 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Isto é, dependendo das condições dos combustíveis pode-se ter toras com poder calorífico próximo ou até mesmo acima do poder calorífico de *pellets*. No entanto, com base na média dos valores e nos erros entende-se que na maioria das vezes os *pellets* terão melhor desempenho na queima. Essa variação de poder calorífico, comum a todos os combustíveis avaliados, pode ser devida a fatores como a própria composição do combustível, sua umidade na queima ou ainda as resinas naturais presente na sua estrutura. Desses dois fatores, a umidade com certeza pode apresentar maior variação, interferindo de forma mais incisiva nos combustíveis de biomassa.

Pode-se avaliar a influência da umidade considerando, por exemplo, os dados obtidos para o poder calorífico de toras em diferentes condições de armazenamento. A tora de eucalipto seca tem em média um poder calorífico $2.700 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ maior que a tora armazenada em condições de ambiente externo. Esta última com alta umidade, normal de materiais deixados a céu aberto, sujeita a intempéries. Da mesma forma,

os cavacos de eucalipto armazenados em condições externas também apresentaram um baixo poder calorífico quando comparado com a tora de eucalipto seca ou com os *pellets*, esses últimos normalmente mantidos em ambiente seco de armazenamento.

Para comparação com os combustíveis avaliados, a Tabela 2 apresenta o poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis mais utilizados em caldeiras, obtidos a partir da análise bibliográfica realizada.

Tabela 2 - Valor do PCS para diferentes combustíveis

Combustível	Poder Calorífico	
	Superior (PCS) (kJ·kg ⁻¹)	Referência
Gás Natural	39.330	Arruda, 2009
GLP	45.187	Arruda, 2009
Óleo Diesel	42.677	Arruda, 2009
Bagaço de Cana de Açúcar (50% de umidade)	9.524,97	Morais e Silva, 2008
Cavacos de eucalipto em condições externas	10.460	Arruda, 2009
Cavacos de eucalipto em condições externas (34,87% de umidade)	11.312,05	Junqueira et al. (2017)
Cavacos de eucalipto em condições externas	12.400 ± 1.200	A autora, 2022
Tora de Eucalipto seca	18.600 ± 1.900	A autora, 2022
Tora de Eucalipto (12% de umidade)	19.627	GATTO et al., 2003
Tora de Eucalipto em condições externas	15.900 ± 1.600	A autora, 2022
<i>Pellets</i> de biomassa	20.150	Spanhol, 2015
<i>Pellets</i> de pinus	19.600 ± 2.000	A autora, 2022

Fonte: A autora (2022)

Considerando os dados da Tabela 2, quando se analisa os valores de poder calorífico das análises realizadas neste trabalho se observa que valores obtidos não apresentam diferenças significativas em relação aos obtidos de pesquisas publicadas. De forma geral, combustíveis de biomassa armazenados em condições externas

apresentam sempre uma redução do poder calorífico. Quanto a isso pode-se observar influência grande nas toras e muito mais no bagaço de cana de açúcar, que é uma biomassa que normalmente apresenta elevada umidade, pois é deixada a céu aberto nas usinas de álcool e açúcar. E, quanto ao bagaço, sua condição na queima é ainda pior que os demais combustíveis principalmente devido a sua capacidade enorme de retenção de umidade, que pode chegar em alguns casos a mais de 50% de seu peso. Porém, mesmo com um baixo poder calorífico este combustível é viável para estas indústrias, pois é um resíduo abundante e oferece um baixo custo para armazenar, manipular e queimar para geração de energia térmica. Desta forma, este baixo custo operacional e a possibilidade de dar destinação a este resíduo acaba compensando seu uso mesmo com baixo poder calorífico.

Em relação ao custo energético dos combustíveis de biomassa analisados, a Tabela 3 apresenta uma estimativa do mesmo em $\text{R}\$. \text{GJ}^{-1}$, tomando como base o preço médio de mercado de cada um deles no mês de maio de 2022, custo de obtenção para a indústria.

Tabela 3 – Custo energético para diferentes combustíveis

Combustível	Poder Calorífico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Custo do Combustível ($\text{R}\\$. \text{kg}^{-1}$)	Custo energético ($\text{R}\\$. \text{GJ}^{-1}$)	Referência
Gás Natural	39.330	1,09	27,71	Arruda, 2009
GLP	45.187	7,70	170,37	Arruda, 2009
Óleo Diesel	42.677	5,27	123,48	Arruda, 2009
Bagaço de cana de Açúcar (50% de umidade)	9.524,97	0,40	42,00	Morais e Silva, 2008
Cavacos de Eucalipto	10.460	0,20	18,83	Arruda, 2009
Cavacos de eucalipto em condições externas	12.400	0,20	15,32	A autora, 2022
Tora de Eucalipto (12% de umidade)	19.627	0,15	7,64	Gatto et al., 2003
Tora de Eucalipto seca	18.600	0,15	8,06	A autora, 2022

Tora de Eucalipto em condições externas	15.900	0,15	9,43	A autora, 2022
<i>Pellets</i> de biomassa	16.500	0,63	38,18	Spanhol, 2015
<i>Pellets</i> de pinus	19.600	0,63	32,14	A autora, 2022

Fonte: A autora (2022).

A partir dos dados apresentados na Tabela 3 pode-se concluir que dentre os combustíveis de biomassa analisados no trabalho a tora de eucalipto seca é aquele que possui menor custo por energia térmica liberada na queima. A tora seca chega a ser quase 4 vezes mais barata energeticamente se comparada aos *pellets*, por exemplo.

Os combustíveis de alto poder calorífico, como o gás natural, o GLP e o óleo diesel, possuem um potencial de liberação de calor na queima de duas vezes ou até mais que os *pellets* avaliados no trabalho. No entanto, esses possuem um alto custo econômico, principalmente o GLP e o óleo diesel, além de serem de uma matriz energética não renovável e com um potencial de poluição maior quando comparado com combustíveis de biomassa.

Dessa forma, avaliando os dados fornecidos nas Tabelas 1 e 3 conclui-se que os *pellets* são o combustível com maior poder calorífico dentre os avaliados no trabalho, porém também com maior custo energético. O combustível de biomassa mais viável em termos de custo energético é a tora de eucalipto seca. Pela Tabela 3 a mesma conclusão se chega em relação ao custo energético da tora de eucalipto seca.

Entretanto, quando se analisa puramente esses valores, não se trata de outros aspectos importantes que devem ser considerados em relação ao uso desses combustíveis, como a questão do espaço necessário para armazenamento e custos de transporte entre seu local de beneficiamento até o consumo final.

Em relação ao transporte cada indústria pode ter a sua realidade de distância entre o fornecedor, além da questão da quantidade que pode ser transportada por caminhão, impactando os custos de frete de forma diferente para cada indústria e combustível. No entanto, tanto para quantidade transportada e espaço para armazenamento uma análise superficial pode ser feita considerando a densidade desses combustíveis. Para toras de eucalipto e pellets as densidades aparentes são

570 kg m⁻³ e 1.000 a 1.500 kg m⁻³, respectivamente, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

Dessa forma, com base na densidade pode-se afirmar que praticamente o dobro em massa de *pellets* pode ser transportado em um caminhão com o mesmo volume para transporte. Além disso, os pellets possuem um formato e fluidez diferente das toras, o que facilita seu transporte e armazenamento em espaços pequenos. Além disso, se tratando da operação de caldeiras, os pellets também oferecem a vantagem da maior facilidade manuseio para alimentação de fornalhas e um melhor controle da pressão o vapor, o que resulta em um vapor de maior qualidade. No entanto, se tratando de custos com transporte e armazenamento, um estudo mais acurado deveria ser feito, o que não foi o escopo deste trabalho.

5.2 Avaliação do potencial de poluição dos combustíveis de caldeira

Conforme metodologia do trabalho, a avaliação do potencial de poluição dos combustíveis de caldeira foi realizada em uma caldeira de uma planta industrial em uma empresa do setor agroindustrial da região oeste do Paraná. Os combustíveis analisados foram os cavacos de eucalipto e *pellets* de pinus. Os dados de emissão de poluentes com a queima dos combustíveis foram medidos com um analisador de gases Ecil Chemisti 500, que fornece como resultado a média aritmética de 10 análises realizadas minuto a minuto.

A caldeira utilizada para queima é classificada pela resolução SEMA n° 16/2014 como fonte nova e estacionária, tendo capacidade de produção de 25 t h⁻¹ de vapor de água, e capacidade calorífica de 22,1 MW. Segundo dados técnicos fornecidos pelo fabricante da mesma, seu volume de vapor é de 10.800 L e de água 32.000 L. Desta forma, esta caldeira se enquadra nos parâmetros presentes no Quadro 1, dos padrões de emissão, como equipamento de classe potência térmica nominal de 30 a 50 MW. Para essa classe os limites legais são 200 mg Nm⁻³ de material particulado total (MP total), 1.000 mg Nm⁻³ de CO, 500 mg Nm⁻³ de NO_x, considerando oxigênio de referência igual a 11%.

As análises de gases atmosféricos foram realizadas seguindo as normas exigidas pelo órgão regulador responsável, por um técnico devidamente treinado pela empresa parceira deste trabalho, e com o analisador de gases portátil devidamente calibrado. Os resultados das duas análises são apresentados na Tabela 4, e os

extratos em suas vias originais estão presentes no Apêndice A. A primeira análise foi realizada com a caldeira operando com cavacos, pela manhã, e a segunda análise, com pellets, foi realizada na tarde do mesmo dia. Antes de cada análise esperou-se que a caldeira se estabilizasse com cada combustível, de forma que a troca de combustível não afetasse os resultados. Os valores de COref foram obtidos segundo a Equação 1, apresentada na seção de revisão bibliográfica deste trabalho.

Tabela 4 – Extrato após análise de gases para a combustão de cavaco de eucalipto e pellets de pinus

Componente	Medida Cavacos	Medida Pellets	Parâmetro legislação
O ₂ (%)	14,5	13,5	11%
CO ₂ (%)	5,8	6,7	-
CO (mg/m ³)	3.786	888	1.000
SO ₂ (mg/m ³)	0	14	-
T gás (°C)	141,4	144,6	-
T ar (°C)	30,7	33,6	-
Ref. O ₂ (%)	11,0	11,0	11%
CO ref (mg/m ³)	5.858	1.188	1.000
SO ₂ ref (mg/m ³)	0	40	-

Fonte: A autora (2022).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4, na operação com cavacos o valor para CO (3.786 mg m⁻³) encontra-se muito acima do limite legal (1.000 mg m⁻³), mesmo ainda quando não corrigido pelo cálculo apresentado na Equação 1, o qual utiliza o % de oxigênio como fator de correção. Após o cálculo de correção o limite é ultrapassado em mais de cinco vezes (5.858 mg m⁻³). Vale destacar que o oxigênio também se encontra acima do valor de referência, sendo este de 14,5 % quando a referência é de 11%, o que leva a correção do valor ser ainda mais elevada.

Para a operação com pellets o valor da concentração de CO sem correção (888 mg m⁻³) é abaixo do limite legal (1.000 mg m⁻³). Após a correção com o valor de oxigênio de referência, a concentração de CO passa a ser 1.188 mg m⁻³, pouco acima do limite legal. Apesar disto, esses dados mostram que os pellets são um combustível com menor poder poluidor quando comparados com os cavacos de eucalipto. Isto ocorre devido a maior área superficial para queima dos pellets, além da maior

facilidade de oxigenação do material, favorecendo a combustão mais completa do combustível e menor formação de CO.

Esta diferença de desempenho desses combustíveis pode estar associada a fatores como a umidade, como no caso dos cavacos, já que esta dificulta o processo de combustão, fazendo com o que mesmo tenha mais dificuldade de ocorrer de forma completa. Sabe-se que a falta de oxigênio na reação de combustão, ou pelo menos a dificuldade em colocar o oxigênio em contato com os comburentes, é que leva a combustão incompleta e maior geração de CO em vez de CO₂. Esta dificuldade é muito menor na queima dos *pellets*, que normalmente possuem umidade controlada abaixo de 10%, além de formato pré-definido e pequeno, o que facilita a combustão por ter uma área de contato maior que as toras e cavacos. Além disso, com os pellets é possível uma estabilidade muito grande na taxa de alimentação da fornalha, utilizando-se automação ou não, o que resulta em uma maior facilidade em controlar a pressão e a vazão de vapor a ser fornecida pela caldeira às áreas consumidoras.

6 CONCLUSÕES

Ao final do trabalho concluiu-se que o objetivo geral proposto foi alcançado. Com a realização dos testes comprovou-se que os *pellets* apresentam um maior poder calorífico quando comparado com os demais combustíveis analisados, sendo este também com menor capacidade de poluição ao meio ambiente, porém não é o de menor custo por unidade de energia térmica.

Quando se trata de menor custo energético, o combustível que se destaca são as toras de eucalipto secas, chegando a ser quase 4 vezes mais barata energeticamente se comparada aos *pellets*, por exemplo. Porém, as toras têm maior densidade quando comparado aos *pellets*, e formato variado, o que pode reduzir a quantidade transportada por carga e exigir um espaço para armazenamento muito maior. A dificuldade em manter as toras cobertas durante o seu armazenamento expõe o combustível às intempéries do tempo, o que acarreta o risco de uma maior umidade na queima.

Diante disso, excetuando-se a questão do custo energético, os *pellets* de pinus são um combustível que apresenta um maior número de vantagens quando se comparado aos demais analisados por este trabalho. Dentre essas vantagens pode-se citar a maior facilidade para manuseio e transporte, maior capacidade de estocagem em espaços pequenos, maior facilidade de controle da pressão do vapor em caldeiras e menor potencial poluidor. De forma que este é tido como o melhor para aplicação em indústrias que buscam maiores facilidades na operação das caldeiras e vapor com melhor qualidade.

REFERÊNCIAS

- AITA, J. C. L.; PEIXOTO, N. H. Tecnologias de processos industriais II,
- ALTAFINI, C. R. Curso de engenharia mecânica: **Caldeiras**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002.
- ECIL. Analisadores de Gases Portáteis. Disponível em: <<https://ecil.com.br/instrumentacao/analisadores-de-gases-portateis/>> Acessado em: 08 mai 2022.
- ARRUDA, M. Z. de. **Análise de combustíveis de caldeiras**. Passo Fundo, 2009, 74 f, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo.
- BEGA, E. A. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**, 3 ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2003.
- BOGDEZEVICIUS, C. R. *et al.* **Análise de Percepção Quanto ao uso e Atributos dos Pellets de Biomassa Como Fonte Geradora de Energia**, Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 7, n. 4, p. 88-112, out/dez. 2018.
- BRASIL. Resolução 497, de 13 de agosto de 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-497-de-19-de-agosto-de-2020-273217612>>. Acesso em: 11 abr 2022.
- BRASIL. Resolução CONAMA 382, de 26 de dezembro de 2006. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/resolucao-conama-382-2006-eficiencia-energetica-com-responsabilidade-ambiental>>. Acesso em: 11 abr 2022.
- CARVALHO JUNIOR, J. A. de; Lacava. P. T. **Emissões Em Processos de Combustão**, São Paulo, SP, Editora Unesp, 2003.
- CASTRO. M. de C. *et al.* **Monitoramento de Emissões Atmosféricas de Caldeiras de Projetos Distintos**. *In:* SIMPÓSIO ITALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XIV, 2018, Foz do Iguaçu, PR.
- FOELKEL, C., **Eucalyptus Online Book e Newsletter**, n° 51, 2016. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/artigos/news51_Secagem_Madeira_Biomassa.pdf> Acessado em: 11 de abril de 2022.
- GARCIA, D. P. **“Pellets” de Madeira – Revisão Bibliográfica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial e Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Itapeva, 2008.
- GARCIA, D. P. **Caracterização Química, Física e Térmica de Pellets de Madeira Produzidos no Brasil**, Guaratinguetá, 2010, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Área de Materiais Compósitos Lignocelulósicos) – Universidade Estadual Paulista.

GARCIA, Dorival; CARASCHI, José; VENTORIM, Gustavo. **Caracterização Energética de Pellets de Madeira**; In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, VII, 2012, São Paulo.

GARCIA, Dorival; CARASCHI, José; VENTORIM, **O Setor de Pellets de Madeira no Brasil**, Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 8, p. 21-28, abril, 2017.

GARCIA, Dorival; CARASCHI, José; VENTORIM, Gustavo, **Emissões de Gases do Efeito Estufa da Queima de Pellets de Madeira**, FLORESTA, Curitiba, PR, v. 47, n. 3, p. 297 - 306, jul. / set. 2017.

GATTO, D. A. et al., **Características da Lenha Produzida na Região da Quarta Colônia de imigração Italiana do Rio Grande do Sul**. Ciência Florestal, v. 13, n. 2, p. 7-16, 2003.

IKA. **C200**. Disponível em: < <https://www.ika.com/pt/Produtos-Lab-Eq/Calorimetros-csp-330/C-200-cpdt-8802500/>> Acessado em: 08 mai 2022.

JUNQUEIRA, T. A; CALDATO, M. J.; CRUZ, T. M.; DUARTE, P. J.; SOUZA, W. R. Q.; BORGES, C.; HEIN, P.; TONOLI, G. H. D. **Avaliação de perda de energia em função da umidade em cavados de Pinus sp**. In: III CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, 2017.

MIRANDA, M. J. M. **Teste de Caldeiras e Combustíveis Sólidos**, Projeto Final do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Porto. Porto, 2009.

MORAIS, A. S.; SILVA, M. B. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. In: ENEGEP. Rio de Janeiro, 2008.

MOREIRA, H. M.; ESTEVO J. dos S. **A política dos EUA para as mudanças climáticas: análise da saída do Acordo de Paris**, In: Conjuntura Internacional, XXXII, Belo Horizonte, ISSN 1809-6182, v.14 n.3, p.32 - 45, jun. 2018

NEIVA, P. S., **Capacidade Térmica e Poder Calorífico de Biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade de Uberaba. Uberaba, 2018.

PARANÁ. Resolução SEMA 16, de 23 de março de 2014. Estabelece critérios para o Controle da Qualidade do Ar.

PELANDA. K. A. **Emissões Atmosféricas Provenientes do Consumo de Madeira Como Biocombustível no Paraná**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

PEREIRA, José Carlos Duarte; STURION, José Alfredo; HIGA, Antonio Royei; HIGA, Rosana Clara Victória; SHIMIZU, Jarbas Yukio. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Embrapa Florestas. Colombo, 2000. 113p.

PRECCI, R. L.; SOBRINHO, J. V.; SILVA, J. S.; SILVA, J. N. **Fontes de energia para secagem de café**. Boletim Técnico n. 03. Viçosa – MG, 2001.

SIMIONI, F. J., et al., **Produção de Lenha de Eucalipto para Energia**, O desafio do Pequeno Produtor Fumicultor de Santa Cruz/Rs, *In*: CONGRESSO DA SOBER,LII, João Pessoa, PB, 2015.

SPANHOL, A. et al., **Qualidade dos *Pellets* de Biomassa Florestal Produzidos em Santa Catarina para a Geração de Energia**, FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 833 - 844, out./dez. 2015.

TEIXEIRA, F. N. **Combustão: Princípios e Sustentabilidade**, Curitiba, PR, Editora Appris, 2017.

APÊNDICE A - EXTRATOS RETIRADOS DO EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE GASES

ECL 5045		ECL 5045		
Serial: 3515		Serial: 3515		
Memória: 227		Memória: 230		
Análises: média		Análises: média		
Data: 23/01/19		Data: 23/01/19		
Hora: 09:39		Hora: 14:07		
Combustível: Madeira 20%		Combustível: Madeira 20%		
Altitude: 700 m		Altitude: 700 m		
U.R. ar: 75 %		U.R. ar: 75 %		
O ₂	-	14.5 %	O ₂	13.5 %
CO ₂		5.8 %	CO ₂	6.7 %
CO		3786 mg/m ³	CO	- 888 mg/m ³
SO ₂		0 mg/m ³	SO ₂	14 mg/m ³
T gas		141.4 °C	T gas	144.6 °C
T ar		30.7 °C	T ar	33.6 °C
Ref. O ₂		11.0 %	Ref. O ₂	11.0 %
CO ref		5858 mg/m ³	CO ref	1188 mg/m ³
Ref. O ₂		0.0 %	Ref. O ₂	0.0 %
SO ₂ ref		0 mg/m ³	SO ₂ ref	40 mg/m ³
Notas:		Notas:		
.....			