

HENRIQUE NOVAES TEMPESTA

**CARACTERIZAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS PROVENIENTES DA QUEIMA
DE BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR**

Araraquara - SP

2022

HENRIQUE NOVAES TEMPESTA

CARACTERIZAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS PROVENIENTES DA QUEIMA DE BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa

Araraquara - SP

2022

HENRIQUE NOVAES TEMPESTA

CARACTERIZAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS PROVENIENTES DA
QUEIMA DE BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado
ao Instituto de Química, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Araraquara, 25 de janeiro de
2022

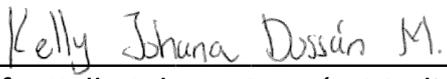
BANCA
EXAMINADORA



Profa. Dra. Maria Angélica Martins
Costa Instituto de Química – UNESP,
Araraquara



Prof. Arnaldo Sarti
Instituto de Química – UNESP, Araraquara



Profa. Kelly Johana Dussán Medina
Instituto de Química – UNESP,
Araraquara

RESUMO

Diante de catástrofes naturais cada vez mais frequentes, e um futuro nada animador em relação aos problemas ambientais que o planeta irá sofrer no futuro próximo, as pessoas, governos e empresas começam a repensar seus papéis na sociedade. Uma das formas de se diminuir o efeito do aquecimento global, é por meio da utilização de biomassas como combustível em processos de combustão, substituindo os derivados de petróleo. No Brasil, a biomassa mais proeminente para esse uso é o bagaço de cana de açúcar, derivado da indústria sucroalcooleira. No entanto deve-se avaliar vários aspectos de um combustível para determinar se seu uso é viável ambientalmente, como determinar as emissões de poluentes decorrente do processo de combustão. Este trabalho teve como objetivo determinar a concentração de CO, CO₂, NO₂, NO_x, SO₂ formados nesse processo e avaliar o controle destes poluentes. A amostragem se deu em um queimador dotado de um lavador Venturi, um equipamento usado industrialmente para diminuir a quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera. Um amostrador de gás foi posicionado na chaminé do queimador, possibilitando realizar os experimentos. Os resultados concentrações foram entre 19 e 20% para o CO₂, 44,40 e 256,98 ppm para o CO, 0,97 e 3,44 para o NO₂, 3,44 até 32,48 ppm para o NO_x e 0 até 3,14 ppm para o SO₂. Esse estudo se mostra relevante de forma a enriquecer a literatura sobre o tema, além de servir como inspiração para novos estudos e incentivar o uso dessa biomassa como fonte de energia. Por fim, os resultados se mostraram próximos a outra pesquisa realizado com bagaço, e menores que a maioria dos projetos semelhantes realizados com outras matérias primas, além disso as emissões ficaram dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Palavras-chave: bagaço; biomassa; lavador Venturi.

ABSTRACT

Faced with increasingly frequent natural disasters, and a future that is not encouraging in relation to the environmental problems that the planet will suffer in the near future, people, governments and companies are beginning to rethink their roles in society. One of the ways to reduce the effect of global warming is through the use of biomass as fuel in combustion processes, replacing petroleum derivatives. In Brazil, the most prominent biomass for this use is sugarcane bagasse, derived from the sugar-alcohol industry. However, several aspects of a fuel must be evaluated to determine whether its use is environmentally viable, such as determining pollutant emissions from the combustion process. This work aimed to determine the concentration of CO, CO₂, NO₂, NO_x, SO₂ formed in this process and to evaluate the control of these pollutants. Sampling took place in a burner equipped with a scrubber Venturi, an equipment used industrially to reduce the amount of pollutants emitted into the atmosphere. A gas sampler was positioned in the chimney of the burner, making it possible to carry out the experiments. The concentration results were between 19 and 20% for CO₂, 44.40 and 256.98 ppm for CO, 0.97 and 3.44 for NO₂, 3.44 to 32.48 ppm for NO_x and 0 to 3.14 ppm for SO₂. This study proves to be relevant in order to enrich the literature on the subject, in addition to serving as inspiration for new studies and encouraging the use of this biomass as an energy source. Finally, the results were close to another research carried out with bagasse, and smaller than most similar projects carried out with other raw materials, in addition, emissions were within the limits established by current legislation.

Keywords: bagasse; biomass; Venturi washer

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Destinação da cana-de-açúcar produzida no Brasil, safra de 2020/2021. | 29 |
| Figura 2. Rotas de transformação da biomassa em energia. | 34 |
| Figura 3. Emissão de CO ₂ , por setor industrial no Brasil, em 1990 e 2016. | 39 |
| Figura 4. Evolução da emissão de CO ₂ , por processo industrial no Brasil, de 1970 a 2016. | 39 |
| Figura 5. Estrutura de um lavador Venturi. | 43 |
| Figura 6. Variação da concentração de CO ₂ em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades. | 48 |
| Figura 7. Variação da concentração de NO _x em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades. | 48 |
| Figura 8. Variação da concentração de material particulado em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades. .. | 49 |
| Figura 9. Equipamento utilizado por ROKIN et al (2018) para realização do estudo | 51 |
| Figura 10. Perfil de emissão de alguns gases, a partir da queima de pinho. .. | 52 |
| Figura 11. Perfil de emissão de alguns gases, a partir da queima de eucalipto. | 53 |
| Figura 12. Bagaço utilizado nos testes. | 57 |
| Figura 13. Queimador utilizado nos experimentos. | 58 |
| Figura 14. Estrutura dos equipamentos que compõem o queimador. | 58 |
| Figura 15. Biomassa disposta no alimentador. | 59 |
| Figura 16. Esquema de um lavador Venturi. | 60 |
| Figura 17. Amostrador de gases CHEMIST 500. | 61 |
| Figura 18. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 65 |
| Figura 19. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 65 |
| Figura 20. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 66 |
| Figura 21. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 68 |
| Figura 23. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 68 |
| Figura 24. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 69 |
| Figura 25. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 69 |
| Figura 26. Perfil da emissão de CO ₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 70 |
| Figura 27. Perfil da emissão de CO ₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 70 |
| Figura 28. Perfil da emissão de CO ₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 71 |
| Figura 29. Perfil da emissão de CO ₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 71 |
| Figura 30. Perfil da emissão de NO _x para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 72 |
| Figura 31. Perfil da emissão de NO _x para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 72 |
| Figura 32. Perfil da emissão de NO _x para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 73 |
| Figura 33. Perfil da emissão de NO _x para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 73 |
| Figura 34. Perfil da emissão de NO ₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 74 |
| Figura 35. Perfil da emissão de NO ₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 74 |
| Figura 36. Perfil da emissão de NO ₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 75 |
| Figura 37. Perfil da emissão de NO ₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 75 |
| Figura 38. Perfil da emissão de SO ₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s. | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 39. Perfil da emissão de SO ₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s. | 76 |
| Figura 40. Perfil da emissão de SO ₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s. | 77 |
| Figura 41. Perfil da emissão de SO ₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s. | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Padrões de qualidade do ar. | 21 |
| Tabela 2. Estrutura do índice de qualidade do ar. | 22 |
| Tabela 3. Qualidade do ar e efeitos a saúde. | 23 |
| Tabela 4. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de biomassa de cana-de-açúcar. | 24 |
| Tabela 5. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de derivada de madeira..... | 24 |
| Tabela 6. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de derivada de madeira..... | 25 |
| Tabela 7. Aumento da capacidade de produzir energia a partir de biomassa, em diversos países, entre 2017 a 2019. | 27 |
| Tabela 8. Composição elementar de diversos tipos de biomassa. | 31 |
| Tabela 9. Composição imediata de diversos tipos de biomassa..... | 32 |
| Tabela 10. Poder calorífico superior de diversos tipos de biomassa. | 32 |
| Tabela 11. Tipos de pirólise e seus produtos principais. | 35 |
| Tabela 12. Parâmetros de diversos tipos de equipamentos para controle da poluição..... | 41 |
| Tabela 13. Fator de emissão de alguns poluentes a partir da queima de biomassa de cana-de-açúcar. | 46 |
| Tabela 14. Concentração máxima de alguns poluentes a partir da queima de bagaço de cana-de-açúcar..... | 47 |
| Tabela 15. Fatores de emissão, mg kg, de gases para diferentes caldeiras com diferentes matérias primas. | 49 |
| Tabela 16. Fatores de emissão, mg kg, de gases para diferentes caldeiras com diferentes combustíveis..... | 50 |
| Tabela 17. Fatores de emissão, g.GJ-1, de gases para os dois tipos de aquecedores..... | 54 |
| Tabela 18. Concentração de gases emitidos a partir da queima de dois tipos de biomassa..... | 54 |
| Tabela 19. Concentração média de gases, em ppm, emitidos a partir da queima de biomassa de Pinus sp, com diferentes teores de umidade. | 55 |

| | |
|---|----|
| Tabela 20. Concentração média de gases, em ppm, emitidos a partir da queima de dois tipos diferentes de biomassa. | 55 |
| Tabela 21. Medidas do lavador Venturi. | 60 |
| Tabela 22. Condições operacionais dos testes..... | 62 |
| Tabela 23. Condições para cada teste. | 63 |
| Tabela 24. Temperatura da queima, em graus Celsius. | 64 |
| Tabela 25. Tempo das amostragem e sua conversão logaritmica..... | 67 |
| Tabela 26. Concentração de poluentes, em ppm, média, ao longo do tempo, para a bateria 1. | 78 |
| Tabela 27. Concentração de poluentes, em ppm, média, ao longo do tempo, para a bateria 2. | 79 |

NOMENCLATURA

Siglas

| | |
|------------------------|--|
| B1 | <i>Overfire boiler</i> |
| B2 | <i>Downdraft boiler</i> |
| B3 | <i>Gasification boiler</i> |
| B4 | <i>Automatic boiler</i> |
| BC | Carvão marrom |
| BCB | Briquetes de carvão marrom |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CEPAGRI Agricultura | Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura |
| DW | Madeira de abeto seca |
| ESG | Environmental, Social and Governance |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| FAOSTAT | Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database |
| HC | Carvão duro |
| MGA | Média geométrica anual |
| MMA | Média mensal anual |
| MP | Material particulado |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| PI | Partículas inaláveis |
| PIF | Partículas inaláveis finas |
| PTS | Partículas totais em suspensão |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PCS | Poder calorífico superior |
| UHC | <i>Unburned hydrocarbons</i> |
| WW | Madeira de abeto úmida |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 2. OBJETIVO | 15 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1 Preocupação atual sobre a poluição | 16 |
| 3.2 Poluição atmosférica | 17 |
| 3.3 Principais poluentes atmosféricos emitidos por fontes estacionárias.. | 18 |
| 3.3.1 Material particulados..... | 18 |
| 3.3.2 Gases | 19 |
| 3.4 Padrões de qualidade do ar | 20 |
| 3.5 Biomassa | 26 |
| 3.6 Biomassa de bagaço de cana-de-açúcar | 28 |
| 3.7 Caracterização da biomassa..... | 30 |
| 3.8 Combustão da biomassa..... | 32 |
| 3.9 Emissão de poluentes a partir da combustão da biomassa | 37 |
| 3.10 Emissões de CO ₂ na indústria..... | 38 |
| 3.11 Emissão de CO ₂ a partir da queima de biomassa..... | 39 |
| 3.12 Equipamentos de controle de poluição do ar | 40 |
| 3.12.1 Lavadores..... | 42 |
| 3.12.2 Lavador Venturi | 43 |
| 3.13 Controle de emissão de CO ₂ | 44 |
| 3.13.1 Controle de emissão de CO ₂ em lavadores | 45 |
| 3.13.2 Controle de emissão de CO ₂ em lavadores Venturi..... | 45 |
| 3.14 Estudos recentes sobre amostragem de gases provenientes da queima de biomassa | 45 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 56 |
| 4.1 Biomassa | 56 |
| 4.2 Queimador | 57 |
| 4.2 Lavador Venturi..... | 59 |
| 4.3 Amostrador de gases | 60 |
| 4.4 Condições de operação | 61 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 62 |

| | | |
|---|--|----|
| 6 | CONCLUSÃO | 82 |
| 7 | SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS ESTUDOS | 83 |
| 8 | REFERÊNCIAS | 84 |

1. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental da população vem crescendo nos últimos anos, com pessoas mudando hábitos pessoais, como não usar sacolas plásticas, para diminuir o impacto das ações humanas no ambiente. Porém essas ações ficam no campo do individualismo, mas isso vem mudando como o movimento ESG, *Environmental, Social and Governance*, em inglês, ou em português, ASG, Ambiental, Social e Governança, sigla relacionada para analisar os pilares sociais, ambientais e de governança de uma empresa (BEZERRA, 2021).

Como os relatórios ESG, principalmente a questão ambiental, de cada empresa vem sendo cada vez mais usados como critério para investimentos, por isso as empresas estão investindo em ações que melhorem suas relações com o ambiente, dessa forma as iniciativas de mitigar os efeitos ambientais da vida humana também estão partindo das empresas (FERNANDES *et al*, 2017).

Seguindo a linha do movimento ESG, as indústrias que utilizam o processo de combustão vêm buscando meios de diminuir o uso de combustíveis fósseis, e para isso buscam outras fontes que causem menos impactos ambientais. Por isso o uso da biomassa vem crescendo já que ela tem o poder de ajudar a redução das emissões de gases de efeito estufa, além de garantir o aumento da oferta de empregos e renda no meio rural (CARVALHO *et al*, 2017 e FERNANDES *et al*, 2017).

Além da mudança do combustível, é cada vez maior a preocupação com os poluentes atmosféricos produzidos pelo processo de combustão, e para o controle das emissões, as indústrias utilizam equipamentos para limpeza dos efluentes gasosos. Um dos mais usados, devido ao seu baixo custo, facilidade de manutenção e instalação e alta eficiência, é o lavador Venturi, que é um equipamento de lavagem de matéria particulado fino (CALIJURI E CUNHA, 2013 e FERNANDES *et al*, 2017).

Dessa forma, esse trabalho teve como intuito determinar as emissões e o controle de alguns poluentes atmosféricos gerados pela queima de biomassa, nesse caso, o bagaço de cana-de-açúcar.

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse estudo foi analisar as emissões de poluentes gasosos, a partir de queima de biomassa de cana-de-açúcar em um queimador.

Quanto aos objetivos específicos desse projeto, buscou-se:

- Obter dados sobre a concentração de emissão de poluentes gasosos emitidos pela combustão dessa biomassa.
- Comparar os dados das emissões gasosas do bagaço com os dados de outros estudos.
- Analisar a eficiência de coleta do lavador Venturi no controle de emissões gasosas, utilizando água como líquido de lavagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Preocupação atual sobre a poluição

O futuro de nossas economias depende do desenvolvimento sustentável. Os países que tomarem a iniciativa agora serão aqueles que terão os benefícios da energia limpa (informação verbal)¹. Essa foi uma das frases usadas pelo presidente dos Estados Unidos na Cúpula do Clima de 2021, mostrando que o país está focado, mais do que nunca, em buscar um desenvolvimento mais sustentável no mundo inteiro, acompanhando o mesmo movimento que já ocorre em vários países europeus (HAVARTIN, 2020).

Recentemente, durante a COP26, a conferência do clima das Nações Unidas, o Brasil assumiu um plano que visa diminuir em 50% as emissões de gases gerados do efeito estufa, até 2030 e a neutralização das emissões de carbono até 2050 (CNN, 2021).

No centro da preocupação sobre a poluição está o dióxido de carbono, o CO₂. O acúmulo desse gás na atmosfera traz diversos efeitos negativos para o ambiente, como aumento da retenção do calor proveniente do Sol, e consequente aumento da temperatura do planeta, diminuição da qualidade do ar que respiramos, porém, novos efeitos nocivos vêm sendo descobertos, um deles é o de redução das chuvas (JULIÃO, 2021).

Como o dióxido de carbono é uma das matérias-primas utilizadas pelas plantas para realizar a fotossíntese, o aumento da sua concentração na atmosfera as afeta diretamente, levando a uma cadeia de eventos, que culminam em uma menor diminuição do fenômeno de transpiração, por parte das plantas, diminuindo a umidade emitida para atmosfera, o que leva a diminuição das chuvas (JULIÃO, 2021).

Um estudo liderado por David Montenegro Lapola, professor do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (Cepagri) da Unicamp, por meio de simulações computacionais, mostrou que se a concentração de CO₂ aumentar 50% na Floresta Amazônica, o volume de chuvas na região diminuiria 12%, enquanto que, se toda a floresta se fosse

transformada em pastagem, as chuvas cairiam 9%, demonstrando que os efeitos do acúmulo de poluentes na atmosfera podem ser mais devastadores do que imaginamos (JULIÃO, 2021).

As consequências do aquecimento global já podem ser percebidas atualmente, por meio de grandes eventos climáticos, como a enchente histórica na Europa, ocorrida em julho de 2021. As fortes chuvas atingiram áreas das regiões oeste e sul de Bélgica, Holanda e Alemanha, matando mais de 160 pessoas e destruindo a infraestrutura existente de contenção de enchentes, mostrando que esses países precisam se preparar cada vez mais para as mudanças climáticas (EXAME, 2021).

O aumento de enchentes é esperado no mundo inteiro, uma vez que o aquecimento global faz a atmosfera reter mais umidade, além disso, o derretimento das calotas polares, leva diminuição da diferença de temperatura entre os polos e trópicos da Terra, diminuindo a velocidade das correntes de ar, combinando esses dois fatores, atmosfera úmida e sem ventos, as chuvas se acumulam em um único lugar, gerando as tempestades, como a vista na Europa (COSTA, 2021).

3.2 Poluição atmosférica

A maior parte das pessoas do mundo vivem em zonas urbanas atualmente, e esse movimento de urbanização vem crescendo cada vez mais, já que as cidades representam uma melhor qualidade de vida para a população. Porém essa aglomeração de pessoas, serviços, processos e máquinas estão pressionando o meio ambiente, já que os resíduos dessas atividades têm contribuído para a deterioração do ambiente em escala regional e global (MACIEL *et al*, 2020).

A poluição atmosférica é um dos maiores problemas dos centros urbanos, no passado essa poluição era constituída, principalmente por composto de enxofre, no entanto, com o avanço da tecnologia e criação de novos processos, a atmosfera passou a ser bombardeada por poluentes de diversos tipos, e isso acaba gerando diversos problemas como, crises na saúde pública, devido aos

problemas respiratórios, formação de neblina tóxica e aumento do aquecimento global (MACIEL *et al*, 2020).

A poluição atmosférica, segundo Braga *et al.* (2006) pode ser definida como a aglomeração de partículas estranhas na atmosfera, essas substâncias são geradas a partir da combustão de biomassa que pode ocorrer por meio de processos naturais, como explosões vulcânicas, ou pela atividade humana, de forma que essa aglomeração aconteça em concentração suficiente para afetar a saúde dos seres vivos.

Outra classificação referente aos poluentes atmosféricos pode ser feita com relação a sua fonte. O primeiro tipo são as fontes estacionárias, que geram poluentes em um determinado local, como uma indústria química instalada em uma determinada região, o segundo tipo são as fontes móveis, que produzem poluentes em mais de um local, como os carros (CIESLINSKI, 2014).

3.3 Principais poluentes atmosféricos emitidos por fontes estacionárias

3.3.1 Material particulados

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2011) classifica os materiais particulados, de acordo com seu diâmetro aerodinâmico, em três categoriais: PTS, partículas totais em suspensão, que possuem diâmetro inferior a 50 μm ; PI, partículas inaláveis, ou MP_{10} , com diâmetro entre 2,5 e 10 μm e PIF, que são as partículas inaláveis finas, ou $\text{MP}_{2,5}$, que possuem diâmetro menor que 2,5 μm .

O material particulado é formado por partículas líquidas, exceto a água, e sólidas que entram em suspensão no ar e possui dimensões microscópicas. O material particulado é formado a partir do processo de combustão, que ocorre nos automóveis, e na indústria. No meio ambiente os materiais particulados levam a danos na flora e na fauna, além de prejudicar a visibilidade (PHILIPPI JÚNIOR, 2010).

O acúmulo desses gases na atmosfera causa, na população, desde efeitos leves, como aumento de doença respiratórias como asma e pneumonia e aumento de internações decorrentes de problemas respiratórios, até

consequências mais graves, como crises de bronquite, dor pré-cordial, aumento no uso de medicamentos e morte (MACIEL *et al*, 2020).

Nos seres humanos, as partículas MP_{10} são depositadas, em sua maioria, no trato respiratório em sua via superior, enquanto as partículas $MP_{2,5}$ se concentram no parênquima pulmonar. De forma geral os materiais particulados costumam se concentrar em maior quantidade na atmosfera no inverno, devido a menor quantidade de chuva e maior queima de combustíveis para aquecimento residencial e industrial (KRUMAL *et al*, 2019).

3.3.2 Gases

Segundo a EPA, os principais poluentes gasosos presentes na atmosfera são: o monóxido de carbono, CO, o dióxido de nitrogênio, NO_2 , e o dióxido de enxofre, SO_2 . Porém, além desses existem dois gases que merecem atenção, o dióxido de carbono, CO_2 e a amônia, NH_3 .

O monóxido de carbono, CO, é formado, principalmente, pela combustão incompleta, que ocorre nos motores dos carros. O efeito na saúde desse gás é dificultar a oxigenação do sangue, uma vez que ele ocupa o lugar do oxigênio na hemoglobina, causando mal-estar e tonturas. No ambiente, o principal problema das altas concentrações de monóxido de carbono é contribuir para o aumento do aquecimento global (PHILIPPI JÚNIOR, 2010).

O dióxido de carbono, segundo a EPA (2021), é formado pela combustão completa dos combustíveis, como a gasolina, gás natural, carvão, etanol, diesel e outros. O processo de combustão é amplamente explorado na indústria como fonte de energia para os processos industriais. Outro setor que utiliza, de forma acentuada a combustão, é o automotivo. Dessa forma, o crescimento da indústria e da produção de carros, vem elevando a produção de CO_2 no mundo.

Ainda segundo a EPA (2021), nos humanos, os efeitos da exposição de dióxido de carbono, se comparam ao dióxido de carbono, no entanto é preciso uma exposição contínua a uma concentração maior de CO_2 para se ter os mesmos efeitos do CO.

Outro gás extremamente poluente é o dióxido de enxofre, o SO_2 , que também é produzido pelo processo de combustão do diesel, e de outros óleos,

além disso a indústria de refinaria de petróleo possui uma grande contribuição na produção desse poluente. Na saúde humana, o dióxido de enxofre causa deterioração do sistema respiratório e cardiovascular, levando o agravamento de problemas respiratórios. No ambiente o SO₂ é o responsável pela formação da chuva ácida, que causa estragos na fauna e na flora (PHILIPPI JÚNIOR, 2010).

Os óxidos de nitrogênio, os NO_x, são uma categoria de gases que também trazem muita preocupação ambiental. Eles são resíduos dos processos de combustão industrial e automotivo. Seus impactos na saúde humana são perigosos, já que aumentam a suscetibilidade a problemas respiratórios, como asma e bronquite, além de aumentar a probabilidade de desenvolver infecções. No aspecto ambiental o impacto é o mesmo do dióxido de enxofre (PHILIPPI JÚNIOR, 2010).

A amônia, segundo a EPA (2021), é produzida naturalmente por processos naturais, porém o uso exagerado de fertilizantes e de processos de combustão tem feito a concentração desse gás aumentar na atmosfera. Como consequência desse feito tem-se uma atmosfera mais ácida, o que pode gerar chuvas ácidas, e problemas no trato respiratório, já que as partículas de NH₃ se comportam como material particulado com diâmetro menor que 2,5 µm

3.4 Padrões de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar se referem ao nível mínimo de qualidade do ar necessário para garantir a saúde da população, dessa forma são definidas as concentrações máximas que os poluentes devem estar presentes na atmosfera, de forma a garantir a segurança das pessoas e do meio ambiente que estão envolvidos nessa atmosfera (ROGENE, 2019).

No Brasil, o CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, rege a nível federal as legislações referentes a padrões de qualidade do ar, porém as companhias ambientais estaduais também podem redigir suas próprias resoluções a cerca desse assunto, de forma que a resolução que deve ser aplicada é aquela mais restritiva. No estado de São Paulo, a CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, é a responsável por essas regulamentações.

A regulamentação atual do CONAMA, nº 491/2018, e da CETESB, Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013, sobre os padrões de qualidade do ar seguem as recomendações da OMS, Organização Mundial de Saúde. A Tabela 1 mostra os padrões de qualidade do ar, determinados pela CETESB.

Tabela 1. Padrões de qualidade do ar.

| Poluente | Tempo de Amostragem | PI1* | PI2** | PI3*** | PF**** |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
| Partículas inaláveis (MP ₁₀) | 24 horas MAA ¹ | 120 | 100 | 75 | 50 |
| | | 40 | 35 | 30 | 20 |
| Partículas inaláveis finas (MP _{2,5}) | 24 horas MAA ¹ | 60 | 50 | 37 | 25 |
| | | 20 | 17 | 15 | 10 |
| Dióxido de enxofre (SO ₂) | 24 horas MAA ¹ | 60 | 40 | 30 | 20 |
| | | 40 | 30 | 20 | – |
| Dióxido de nitrogênio (NO ₂) | 1 hora MAA ¹ | 260 | 240 | 220 | 200 |
| | | 60 | 50 | 45 | 40 |
| Monóxido de carbono (CO) | 8 horas | | | | 9 ppm |
| Partículas totais em suspensão (PTS) | 24 horas MGA ¹ | | | | 240 80 |

*Período intermediário 1

**Período intermediário 2

***Período intermediário 3

****Período final

1 Média aritmética anual

FONTE: CETESB, 2013 (adaptado).

Esse decreto estadual ainda define a estrutura do índice de qualidade do ar, conforme as Tabela 2 e 3, que serve como parâmetro para definir os efeitos na população que os poluentes atmosféricos podem causar.

Tabela 2. Estrutura do índice de qualidade do ar.

| Qualidade | Índice | MP ₁₀ (µg/m ³) 24h | MP _{2,5} (µg/m ³) 24h | CO (ppm) 8h | NO ₂ (µg/m ³) 1h | SO ₂ (µg/m ³) 24h |
|--------------------|--------------|---|--|-------------------|---|--|
| N1 – Boa | 0 – 40 | 0 – 50 | 0 – 25 | 0 – 9 | 0 – 200 | 0 – 20 |
| N2 – Moderada | 41 – 80 | >50 – 100 | >25 – 50 | >9 – 11 | >200 – 240 | >20 – 40 |
| N3 – Ruim | 81 – 120 | >100 – 150 | >50 – 75 | >11 – 13 | >240 – 320 | >40 – 365 |
| N4 – Muito Ruim | 121 – 200 | >150 – 250 | >75 – 125 | >13 – 15 | >320 – 1130 | >365 – 800 |
| N5 – Péssima | >200 | >250 | >125 | >15 | >1130 | >800 |

FONTE: CETESB, 2013.

Tabela 3. Qualidade do ar e efeitos a saúde.

| Qualidade | Índice | Significado |
|------------------|---------------|--|
| N1 – Boa | 0 – 40 | |
| N2 – Moderada | 41 – 80 | Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada. |
| N3 – Ruim | 81 – 120 | Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde. |
| N4 – Muito Ruim | 121 – 200 | Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas). |
| N5 – Péssima | >200 | Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis. |

FONTE: CETESB, 2013.

Com relação as emissões de poluentes atmosféricos, a partir de fontes fixas, a legislação vigente é definida pela Resolução CONAMA nº 382/06, que estabeleceu os limites de emissões para essas fontes, descritos na Tabela 4 e 5.

Tabela 4. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de biomassa de cana-de-açúcar.

| Potência térmica nominal (MW) | Matérias particulados (mg/Nm³) | NO_x (mg/Nm³) | CO (mg/Nm³) |
|--------------------------------------|--|---|-------------------------------|
| Até 0,05 | - | - | 6500 |
| Entre > 0,05 e ≤ 0,15 | - | - | 3250 |
| Entre > 0,15 e ≤ 1,0 | - | - | 1700 |
| Entre > 1,0 e ≤ 10 | - | - | 1300 |
| Menor que 10 | 280 | N.A | - |
| Entre 10 e 75 | 230 | 350 | - |
| Maior que 75 | 200 | 350 | - |

Fonte: Resolução CONAMA nº 382/06.

Tabela 5. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de derivada de madeira.

| Potência térmica nominal (MW) | Material particulado (mg/Nm³) | NO_x (mg/Nm³) | CO (mg/Nm³) |
|--------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| Até 0,05 | - | - | 6500 |
| Entre > 0,05 e ≤ 0,15 | - | - | 3250 |
| Entre > 0,15 e ≤ 1,0 | - | - | 1700 |
| Entre > 1,0 e ≤ 10 | - | - | 1300 |
| Menor que 10 | 730 | N.A | - |
| Entre 10 e 30 | 520 | 650 | - |
| Entre 30 e 70 | 260 | 650 | - |
| Acima de 70 | 130 | 650 | - |

Fonte: Resolução CONAMA nº 382/06.

As legislações internacionais sobre as emissões de fontes fixas podem ser observadas na Tabela 6, que reúne informações sobre a legislação dos Estados Unidos, União Europeia e China sobre o limite de emissão de alguns poluentes para unidades geradoras de energia com potência acima de 50 MW e que utilizam carvão como combustível.

Tabela 6. Limites de emissão de poluentes para processos de combustão a partir de derivada de madeira.

| País ou região | Tipo de planta | Matérias | | |
|----------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | particulados (mg/m ³) | NO _x (mg/m ³) | SO ₂ (mg/m ³) |
| China | Nova | 0,03 | 0,01 | 0,01 |
| | Existente | 0,03 | 0,02/0,04 | 0,02/0,04 |
| União Europeia | Nova | 0,05 | 0,05/0,02 | 0,02 |
| | Existente | 0,05 | 0,05/0,02 | 0,04 |
| Estados Unidos | Nova | 0,0225 | 0,017 | 0,016 |
| | Existente | 0,0225 | 0,0117/0,016/0,064 | 0,016/0,064 |

Fonte: Miller, 2017.

Para ambas as legislações, nacional ou internacional, o material particulado é definido como material líquido ou gasoso, que permanece em mistura gasosa na temperatura do meio filtrante, tendo diâmetro menor que 50 µm.

Dessa forma percebe-se que o foco da legislação em outros países recai sobre a geração de energia a partir do uso do carvão, já que esse é o principal combustível utilizado nesses países, por isso há um foco maior no controle na emissão de dióxido de enxofre, que é um subproduto importante da queima do carvão, enquanto no Brasil, onde há a queima da biomassa, o foco é dado para as emissões de monóxido de carbono. Além disso há uma busca por diminuir a emissão desses poluentes, por isso já legislação específica para novas plantas,

porém isso não ocorre na legislação brasileira, mostrando que não há um esforço a curto prazo para controlar e diminuição da emissão de poluentes a partir de fontes fixas alimentadas por biomassa.

3.5 Biomassa

Os padrões de emissão dos gases são importantes para evitar que haja o acúmulo de poluentes na atmosfera, e a tendência mundial é diminuir cada vez esses limites de emissão. Devido a isso é preciso testar novos combustíveis, que são queimados para gerar energia, que diminuam a quantidade de resíduos gerados, nesse contexto aparece a biomassa.

Segundo a EPA (2021), biomassa é definida como sendo um material orgânico, não fossilizado e biodegradável, que tem como fonte, plantas, animais, microrganismos além de subprodutos industriais, como da indústria do mel. A partir dessa definição, os mais diversos tipos de resíduos orgânicos podem ser usados como biomassa, como os efluentes urbanos e industriais, bem como resquícios do processamento de espécies orgânicas, como a casca de arroz e o bagaço de cana-de-açúcar, que podem ser usados como combustível em queimadores.

A biomassa é um combustível renovável, sendo uma fonte única de carbono orgânico que pode vir a ser a substituta mais viável para os combustíveis fósseis, que representam a maior fatia da matriz energética mundial. Os benefícios do uso da biomassa vão além dos ambientais, uma vez que o estímulo do uso desse combustível, aliado a políticas certas, podem trazer diversas vantagens para a sociedade, como: aumentar as oportunidades de sustento para os pequenos agricultores, ajudar o desenvolvimento econômico das regiões produtoras de matéria-prima (MARCONDES, 2015 e APRESENTAÇÃO, 2021).

De modo geral as tecnologias necessárias para produzir a biomassa são de fácil implementação e manuseio simples, fazendo que a produção possa ocorrer em qualquer lugar (APRESENTAÇÃO, 2021).

Esses locais que passam a produzir biomassa também colhem benefícios, como: aumento da renda, criação de empregos e melhor aproveitamento da terra (APRESENTAÇÃO, 2021).

No século XX as principais fontes de energia usadas pela humanidade foram os combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o petróleo. No entanto, com a escassez eminentes desses recursos, uma vez que são não renováveis, e pela crescente preocupação ambiental mundial, o uso da biomassa como fonte de energia passou a crescer, já que é uma alternativa sustentável, com custo econômico aceitável, além de ser renovável (CABRERA et al, 2020).

Esse fato é exemplificado na Tabela 7, que mostra que o aumento na capacidade produzir energia a partir de biomassa, em diversos países

Tabela 7. Aumento da capacidade de produzir energia a partir de biomassa, em diversos países, entre 2017 a 2019.

| País | 2017 | 2018 | 2019 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| China | 2,7 GW | 2,9 GW | 5,3 GW |
| Índia | 0,5 GW | 0,7 GW | 0,4 GW |
| Brasil | 0,4 GW | 0,2 GW | 0,2 GW |
| Reino Unido | 0,3 GW | 1,5 GW | 0,3 GW |
| Japão | 0,4 GW | 0,4 GW | 0,6 GW |
| Resto do mundo | 2,5 GW | 2,4 GW | 1,8 GW |

Fonte: IEA, 2020.

Buscando modificar a matriz energética atual do Brasil, para uma matriz baseada em energias sustentáveis, o Ministério de Minas e Energia, criou em 2012 o Plano Nacional de Energia 2030, que visa aumentar a participação da cana-de-açúcar e seus derivados em até 18,5 % da energia total usada no país, e para isso é preciso viabilizar o uso da biomassa proveniente dessa planta.

O aumento na tendência do uso da biomassa, bem como outros combustíveis renováveis, pode ser explicado por dois aspectos principais. O

primeiro. O primeiro deles é a geração doméstica, ou em pequena escala de energia, como os aquecedores domésticos. E o segundo aspecto é o uso em larga escala de biomassa para geração de eletricidade (MAXWELL et al, 2020).

Nos últimos anos, a bioenergia proveniente da queima de biomassa representou 10% do total da energia produzida no mundo, a frente de qualquer outra fonte de energia renovável, como solar e eólica. Aproximadamente 50% dessa bioenergia por gerada a partir de fogões a lenha em países em desenvolvimento e 12% em sistema de geração de eletricidade em biomassa (ROKNI et al, 2018).

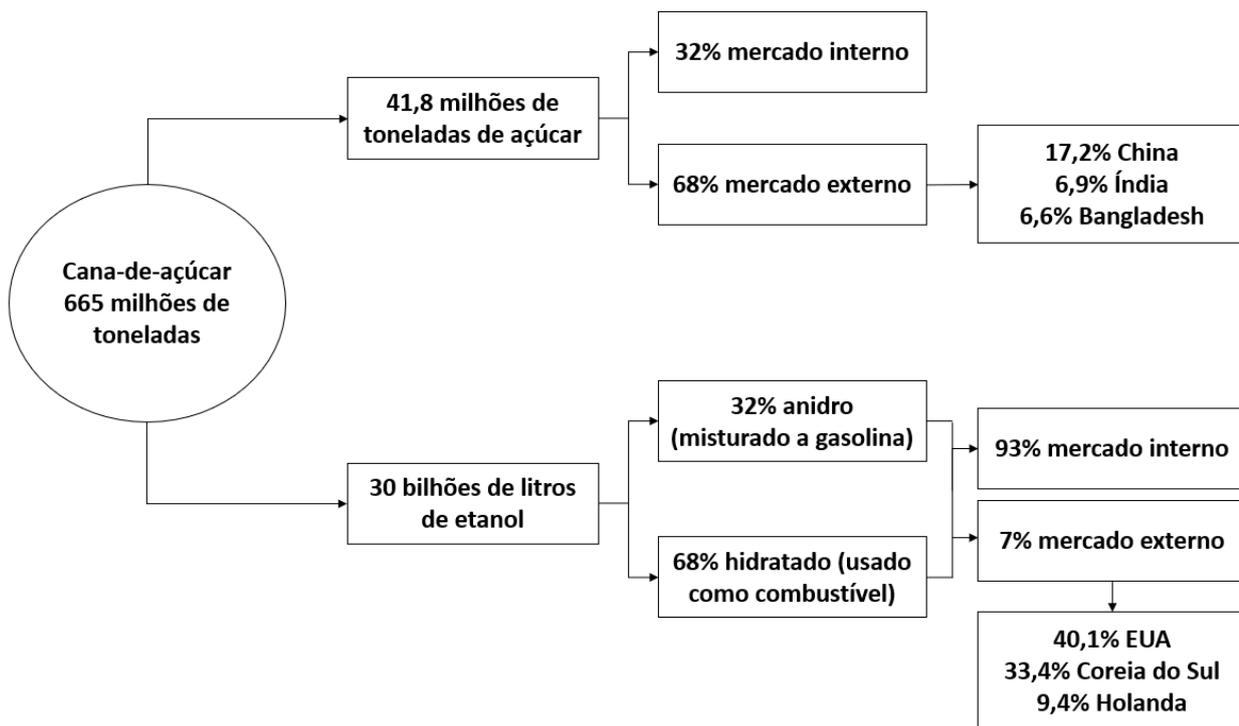
3.6 Biomassa de bagaço de cana-de-açúcar

De acordo com Marafon *et al.* (2016), biomassa pode ser produzida a partir das seguintes fontes: resíduos do processamento da cana-de-açúcar, como o bagaço, vinhaça e torta de filtro; resíduos do processamento de madeiras, cavaco; palha provenientes das plantações de grãos, como soja e milho; cascas de arroz e café; resíduos de coco, feijão, amendoim, mandioca e cacau.

No Brasil, a biomassa proveniente da cana-de-açúcar se destaca em relação as outras, dado ao sucesso do etanol, impulsionando a indústria sucroalcooleira, levando o Brasil a liderança mundial na manufatura dessa planta, em 2014, segundo a Faostat. A produção nacional passa de 600 milhões de toneladas por ano e a cana é então destinada para a produção de etanol ou açúcar, essa divisão é feita por diversos fatores, mas de forma geral a produção de açúcar é destinada ao mercado internacional, por isso um valor alto do dólar impulsiona a fabricação desse produto, e como esse é o cenário atual, houve uma redução de 8,6% na produção de etanol no Brasil, da safra 2018/2019 para a safra 2019/2020 (MAPA, 2020).

A Figura 1 revela o que ocorre com a cana de açúcar produzida no Brasil, a safra analisada foi de 2016/2017, período no qual o baixo valor do dólar levou a maior produção de etanol para o consumo interno.

Figura 1. Destinação da cana-de-açúcar produzida no Brasil, safra de 2020/2021.



Fonte: Adaptado de CONAB, 2020.

Durante a produção do açúcar e do etanol, provenientes da cana-de-açúcar, ocorre a forma de subprodutos, dentre eles está o bagaço, que surge na etapa de moagem, que retira o caldo, que será usado nas próximas etapas do processo, e gera como resíduo o bagaço. Estima-se que para cada 1 tonelada de cana-de-açúcar processada, são gerados 225 kg de bagaço, com umidade de 50% (BRAGATO et al., 2012).

De fato, são produzidos grandes montantes de bagaço pela industrial sucroalcooleira, porém, parte dessa biomassa gerada já é reaproveitada pelas próprias usinas, como combustível nas caldeiras que produzem vapor, vapor esse que move as turbinas que geram energia elétrica. A usina usa essa energia para próprio benefício, já que processar cana-de-açúcar exige 12 kWh para cada tonelada tratada, e o excedente pode ser vendido para a rede distribuidora local (MARCONDES, 2015). A importância da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil, é reforçada pelo fato de que ela é o combustível responsável por mais de 70% da produção de energia em termoelétricas que utilizam biocombustíveis.

3.7 Caracterização da biomassa

A caracterização da biomassa é de extrema importância para poder conhecer a aplicabilidade de determinado tipo de biomassa como combustível, além do seu comportamento e resíduos produzidos no decorrer desse processo. A caracterização da biomassa ocorre pela composição elementar, composição imediata e pelo poder calorífico do material (CORTEZ; LORA; GÓMEZ,2008).

A composição elementar da biomassa trata da porcentagem em massa dos elementos de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cloro (Cl) que ela contém. Saber a composição elementar do combustível em questão é vital para calcular o oxigênio que será preciso para garantir uma combustão completa, além disso, conhecer os elementos presentes na biomassa ajuda a prever os compostos que serão gerados na combustão (CORTEZ; LORA; GÓMEZ,2008).

A composição imediata de uma biomassa é baseada no teor de carbono fixo (CF), cinzas (CZ), materiais voláteis (MV) e umidade (U) (CIESLINSKI, 2014).

O carbono fixo é a massa obtida após a queima da biomassa, não levando em consideração as cinzas e a umidade. Sua composição é basicamente carbono, porém pode receber outros compostos que não liberados no processo de volatilização (MCKENDRY, 2002).

As cinzas são um tipo de resíduo sólido presente em todos os processos de combustão, sua caracterização é necessária para se determinar o melhor tratamento para a biomassa, já que em altas quantidades pode interferir no processo de combustão, e o seu destino final, uma vez que sua composição varia, podendo ter diversos minerais, como potássio, magnésio e cobre (FRANCO JACOME, 2018).

Os materiais voláteis são gases produzidos pela decomposição térmica da biomassa, em atmosfera virgem de oxigênio. Sua taxa está diretamente ligada à sua capacidade de ignição e queima, por isso acabam sendo definidas a estabilidade da chama durante a queima da biomassa. No geral os materiais voláteis são compostos por hidrocarbonetos de pequenas cadeias, monóxido e

dióxido de carbono, metano entre outros. Os materiais voláteis representam a maior parte do calor de combustão proveniente da biomassa, ao contrário do que ocorre com o carvão (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008 e WILLIAMS et al., 2012)

Por fim a umidade é o teor de água presente na matéria prima, e ao contrário dos materiais voláteis, sua presença pode dificultar a queima da biomassa, e seu teor ideal é entre 20 a 30% de forma a minimizar esse efeito e prevenir a emissão de material particulado (CIESLINSKI, 2014).

O poder calorífico da biomassa é definido pela energia liberada por ela, durante o processo de combustão, em relação a massa utilizada para a queima, esse valor é variável, já que depende do teor de umidade da biomassa. O poder calorífico é dividido em dois diferentes tipos, o primeiro é o poder calorífico superior (PCS), que é calculado pela quantidade de calor liberado na combustão, levando em conta a água formada no estado líquido, já o poder calorífico inferior (PCI) considera apenas a água formada que esteja no estado de vapor (GROTTO *et al*, 2021).

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram essas análises para diferentes tipos de biomassa usadas como combustível.

Tabela 8. Composição elementar de diversos tipos de biomassa.

| Biomassa | Composição elementar em porcentagem | | | | | |
|--------------------------|--|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | C | H | O | N | S | Cl |
| Palha de trigo | 49,23 | 5,78 | 43,99 | 0,64 | 0,1 | 0,26 |
| Lascas de pinho | 52,0 | 6,2 | 41,59 | 0,12 | 0,08 | 0,01 |
| Casca de arroz | 42,3 | 6,1 | 50,56 | 1,1 | 0,1 | 0,04 |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 49,9 | 6 | 43,15 | 0,4 | 0,04 | 0,51 |
| Bagaço de azeitona | 54,42 | 6,82 | 37,29 | 1,40 | 0,05 | 0,04 |
| Estrume de vaca | 54,00 | 6,4 | 36,7 | 0,83 | 0,03 | 1,0 |
| Celulose | 44,4 | 6,17 | 49,3 | 0 | 0 | 0 |
| Lignina | 72,0 | 6,6 | 21,34 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Williams *et al.*, 2012 (adaptado).

Tabela 9. Composição imediata de diversos tipos de biomassa.

| Biomassa | Composição imediata em porcentagem | | | |
|--------------------------|---|----------|----------|----------|
| | W | V | F | A |
| Palha de trigo | 7,78 | 68,83 | 17,09 | 6,30 |
| Lascas de pinho | 4,0 | 81,3 | 14,6 | 0,1 |
| Casca de arroz | 9,4 | 74 | 13,2 | 12,8 |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 10,4 | 76,7 | 14,7 | 2,2 |
| Bagaço de azeitona | 6,40 | 65,13 | 19,27 | 9,20 |
| Estrume de vaca | 13,9 | 60,5 | 11,9 | 13,7 |
| Celulose | 4,1 | 94,0 | 0,2 | 1,7 |
| Lignina | 9,0 | 73,5 | 1,5 | 16 |

Fonte: Williams *et al.*, 2012 (adaptado).

Tabela 10. Poder calorífico superior de diversos tipos de biomassa.

| Biomassa | Poder calorífico superior (MJ/kg) |
|--------------------------|--|
| Palha de trigo | 17,42 |
| Lascas de pinho | 20,23 |
| Casca de arroz | 16,3 |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 19,47 |
| Bagaço de azeitona | 19,67 |
| Estrume de vaca | 17,36 |
| Celulose | 18,6 |
| Lignina | 25 |

Fonte: Williams *et al.*, 2012 (adaptado).

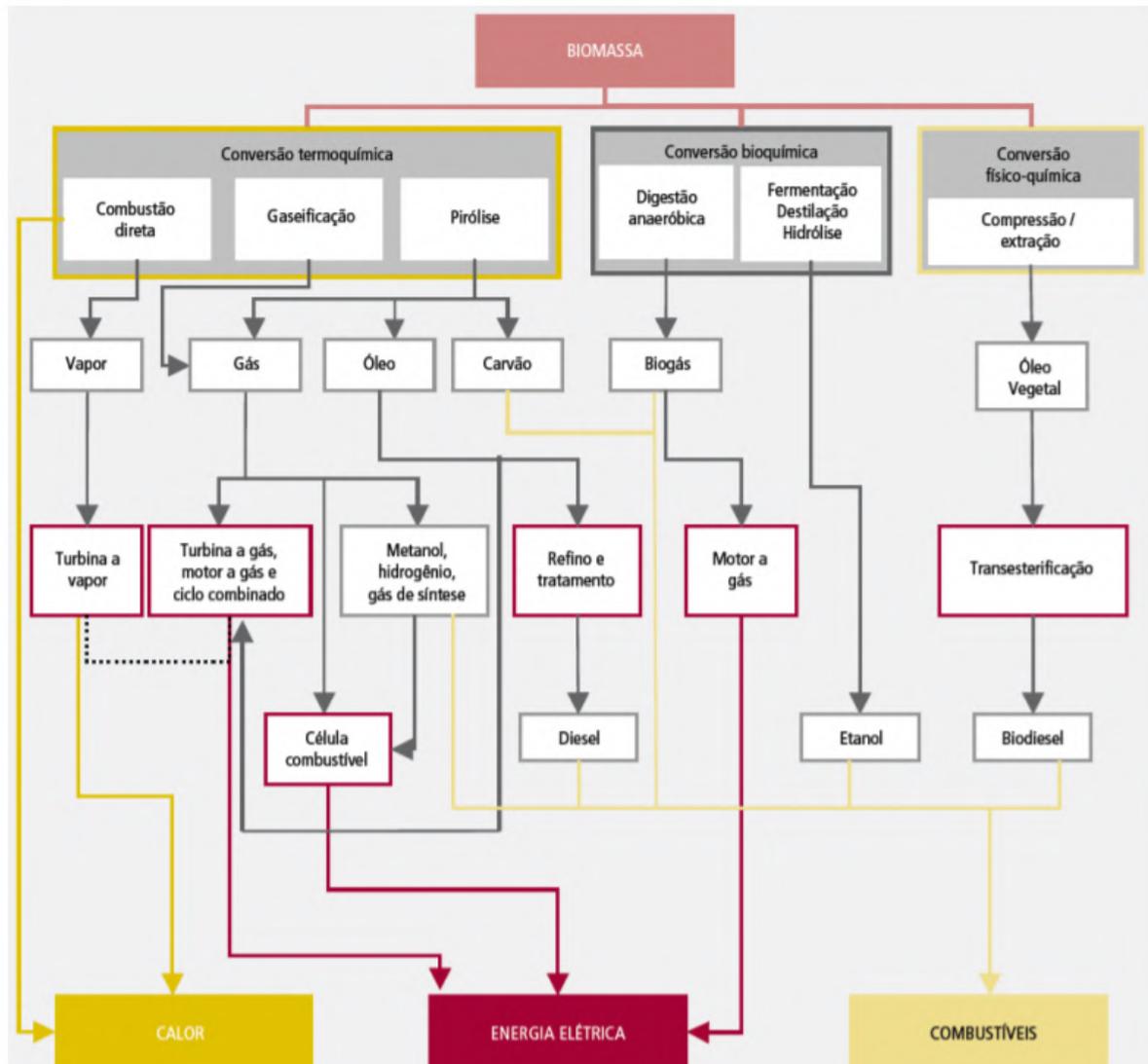
3.8 Combustão da biomassa

O Brasil se destaca do restante no mundo na questão do uso de fontes renováveis para a geração de energia. Em 2016, a matriz elétrica brasileira contava com 82% de sua fonte como sendo renovável contra apenas 24,0% do mundo. E dentro da matriz nacional, se destaca a produção de energia elétrica a partir das usinas elétricas, que correspondem a 65,2% do total, seguida do gás natural, 10,5% e da biomassa, 8,2% (ENERGÉTICA, 2019).

Como visto o Brasil já explora, em partes, o poder de geração de energia a partir da biomassa, no entanto para que isso continue evoluindo, é preciso investir em mais tecnologias, e programas que incentivem o desenvolvimento técnico e econômico do uso desse combustível (CIESLINSKI, 2014).

A Figura 2 mostra os diferentes caminhos que a biomassa pode fazer para se transformar em energia.

Figura 2. Rotas de transformação da biomassa em energia.



Fonte: EPE, Plano Nacional de Energia, 2007.

A conversão termoquímica é o processo de liberação da energia contida na biomassa em calor, através da combustão. Os três tipos de conversão termoquímica, combustão direta, pirólise e gaseificação, se diferenciam pela quantidade de oxigênio presente durante a queima da biomassa (LOPES SILVA, 2014).

O processo de pirólise se dá em temperaturas entre 500°C a 800°C, onde a biomassa é queimada em uma atmosfera pobre em oxigênio, dessa forma ocorre uma combustão incompleta, gerando como produtos, um sólido constituído, basicamente, de carbono, gases e vapores orgânicos condensáveis. O modo como a pirólise é conduzida, ou seja, a temperatura em que ela é feita,

e suas variações durante o processo, determinam quais serão os produtos majoritariamente produzidos, como mostra a Tabela 12.

Tabela 11. Tipos de pirólise e seus produtos principais.

| Tipo de pirólise | Tempo de residência | Taxa de aquecimento | Temperatura máxima (°C) | Principal produto |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Carbonização | Horas a dias | Muito pequena | 400 | Carvão vegetal |
| Convencional | 5 a 30 min | Pequena | 600 | Bio-óleo, carvão e gás |
| Rápida | 0,5 a 5s | Intermediária | 650 | Bio-óleo |
| Flash | Menos de 1s | Alta | Menos de 650 | Bio-óleo e gás |
| Ultra-rápida | Menos de 0,5s | Muito alta | 1000 | Gás combustível |
| Vácuo | 2 a 30s | Intermediária | 400 | Bio-óleo |
| Hidropirólise | Menos de 10s | Alta | Maior que 500 | Bio-óleo e produtos químicos |
| Metanopirólise | Menos de 10s | Alta | Menor que 700 | Produtos químicos |

Fonte: Mohan et al, 2006.

O processo de gaseificação, é método para transformar uma matéria prima, sólida ou líquida, em um gás que pode ser usado como combustível. Esse procedimento consiste em injetar, controladamente, oxigênio puro, ar e vapor de água, separadamente, ou em uma mistura deles, sobre a biomassa, em uma temperatura acima do processo de pirólise e abaixo do processo de combustão, gerando um gás combustível (CARDOSO, 2012).

A combustão direta é o processo de queima da biomassa, se fornecendo uma quantidade o bastante para que ocorra o processo de combustão completa, tendo como produtos finais, um gás aquecido composto por dióxido de carbono, nitrogênio e água. Esse processo pode ser realizado por fogões, fornos e caldeiras, e sua maior vantagem é ser um modo comum para o processamento

de biomassa, porém são desvantagens, o fato de a queima ser ineficiente, e produzir materiais particulados em excesso (CARDOSO, 2012 e DASHEFSKY, 2001).

Van Loo e Koppejan (2008) definem as fases de uma combustão em quatro etapas que são divididas da seguinte forma:

- a) Secagem: A biomassa é aquecida inicialmente, vaporizando a água presente no interior da matéria prima. Durante esse processo a temperatura da chama é reduzida, o que explica o fato de que quanto maior a umidade menor o calor produzido.
- b) Volatilização: Nessa etapa ocorre a degradação térmica da biomassa, sem a presença de um agente oxidante, como o gás oxigênio. Começam a ser formado os primeiros subprodutos, como carvão vegetal, monóxido de carbono e dióxido de carbono.
- c) Combustão dos voláteis: A Gaseificação é um processo semelhante a pirólise, entretanto, há a presença de um agente oxidante, contendo gases como oxigênio, hidrogênio e hidrocarbonetos.
- d) Combustão: Processo final de oxidação do combustível. O gás quente produzido pelo calor produzido pela biomassa é então utilizado como fonte de calor para caldeiras de água e assim produzir energia.

Já Williams *et al.* (2012) divide as etapas da combustão em seis etapas, descritas abaixo.

- (1) Biomassa úmida → aquecimento / secagem → biomassa seca
- (2) Biomassa seca → voláteis (alcatrão e gases) → carvão
- (3) Voláteis + ar → CO + CO₂ + hidrocarbonetos não queimados + fuligem + aerossóis inorgânicos
- (4) Carvão + ar → CO + CO₂
- (5) Voláteis (N, S, K, etc.) → Poluentes com base em N, S, K
- (6) Carvão (N, S, K, etc.) → Poluentes com base em N, S, K

Por fim, ainda existe a divisão da combustão baseada na sua chama, que se baseia em três etapas (CIESLINSKI, 2014).

(I) Fase de ignição: é o início da combustão, quando o calor externo fornecido para a biomassa toma o material, formando uma chama intensa em parte dele.

(II) Fase de chama: é a etapa em que a maior parte do material volátil é queimada, formando chamas em quase toda biomassa.

(III) Fase de incandescência: nessa etapa já não existe mais chama, e ocorre a queima, formando fumaça e brilho.

O processo de combustão se inicia quando a biomassa é aquecida, suas moléculas então passam a ser aquecidas também, ativando os processos de hidrólise, oxidação, desidratação e pirólise em seus componentes. Conforme o calor se intensifica, o alcatrão, o carvão e compostos voláteis são gerados, em contrapartida, compostos resinosos, vapor de água, e resquícios da decomposição da celulose, hemicelulose e lignina, são removidos por meio de uma combustão incompleta na zona de chama. E o processo ocorre até que haja combustível volátil insuficiente para propagar uma chama (SIMONEIT, 2002).

O processo de combustão de combustíveis sólidos é complexo e complicado, emitindo uma mistura de diversos componentes, como CO₂, CO, NO_x, óxidos, compostos orgânicos voláteis dentre outros e materiais particulados, que podem contêm F, Hg e As. Por isso a Europa, que é a vanguarda no combate à poluição, recomenda o uso de biomassa como matéria prima para combustão, uma vez que é renovável e tem um balanço praticamente neutro para emissões de dióxido de carbono (KRUMAL *et al*, 2019).

3.9 Emissão de poluentes a partir da combustão da biomassa

O processo de combustão de combustíveis sólidos é complexo e complicado, emitindo uma mistura de diversos componentes, como CO₂, CO, NO_x, óxidos, compostos orgânicos voláteis dentre outros e materiais particulados, que podem contêm flúor, mercúrio e arsênio. Por isso a Europa, que é a vanguarda no combate à poluição, recomenda o uso de biomassa como matéria prima para combustão, uma vez que é renovável e tem um balanço praticamente neutro para emissões de dióxido de carbono (KRUMAL *et al*, 2019).

Os maiores resíduos da queima de biomassa são: o dióxido de carbono, o monóxido de carbono, gás metano e material particulado, as concentrações emitidas dependem da origem da biomassa e as condições da queima. Quando ocorre uma combustão completa, o que é o ideal, há apenas a liberação de água, dióxido de carbono e calor, porém na realidade é difícil obter uma combustão completa durante todo o processo, levando a formação de outros gases, como o metano, e os materiais particulados (CIESLINSKI, 2014).

Desse modo é necessário acompanhar as emissões provenientes da queima de biomassa, para entender os processos atmosféricos associados, bem como determinar os padrões de qualidade do ar.

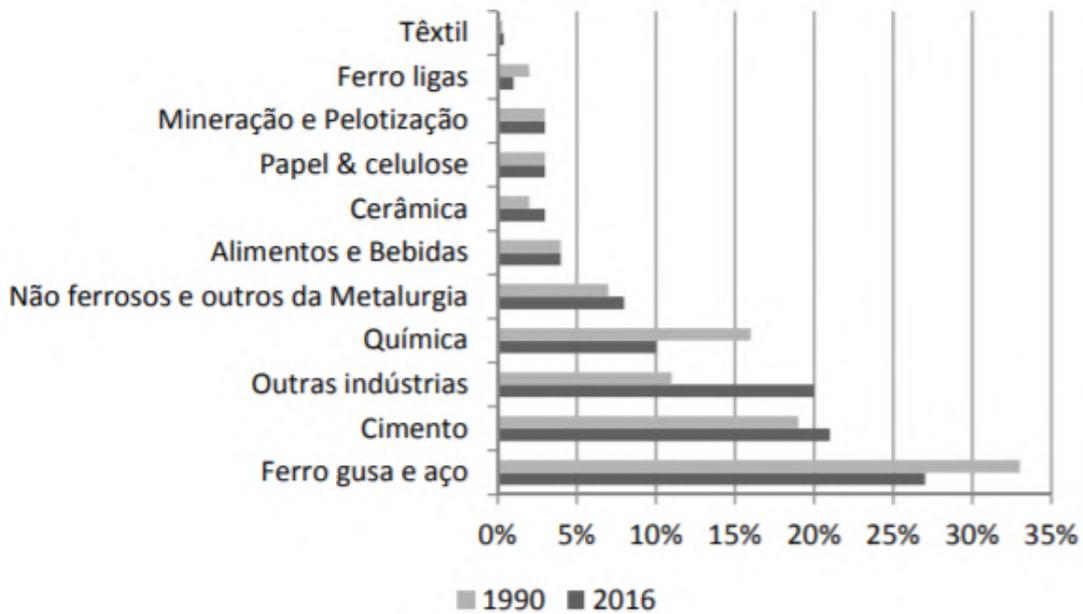
3.10 Emissões de CO₂ na indústria

As indústrias geram grandes quantidades de dióxido de carbono, devido a suas atividades, como: queima de combustível, deposição de resíduos, por meio da incineração, por exemplo, e processos químicos e físicos as quais as matérias primas são submetidas para se alcançar o produto final (SEEG/IEMA, 2018).

No Brasil, os segmentos industriais que mais produzem CO₂, são as indústrias de fundição de ferro gusa e aço e as plantas produtoras de cimento, que em 2016, corresponderam a 27 e 21%, respectivamente, do total de dióxido de carbono produzido pelo setor industrial brasileiro (SEEG/IEMA, 2018).

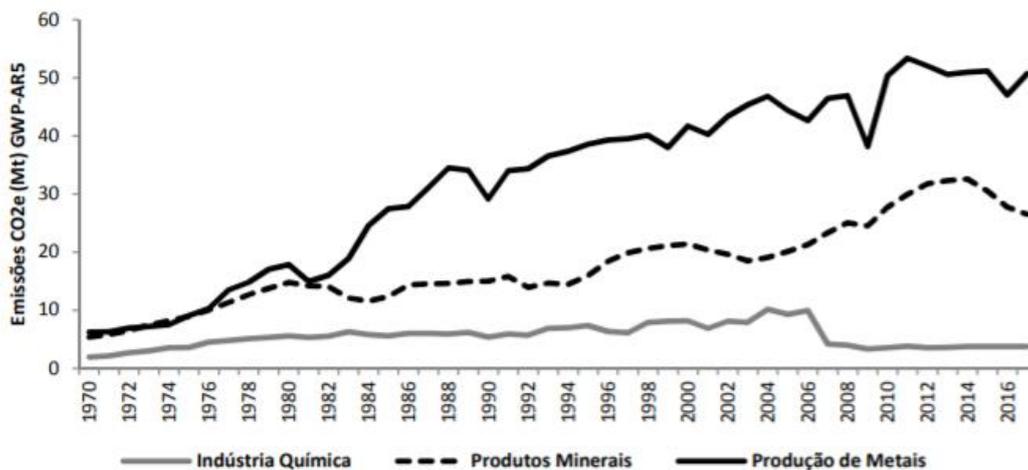
As Figuras 3 e 4, mostram a evolução da emissão de dióxido de carbono, por setor industrial no Brasil.

Figura 3. Emissão de CO₂, por setor industrial no Brasil, em 1990 e 2016.



Fonte: Mathias, 2020.

Figura 4. Evolução da emissão de CO₂, por processo industrial no Brasil, de 1970 a 2016.



Fonte: Mathias, 2020.

3.11 Emissão de CO₂ a partir da queima de biomassa

Conforme já visto, a biomassa já é parte importante da matriz energética brasileira, e mesmo que as emissões de CO₂ realizadas pela combustão desse combustível seja absorvida pela produção de mais biomassa, compreender os níveis de emissão são parte importante para entender o aquecimento global (FERREIRA, 2006).

Para se escolher um tipo de combustível, derivado de plantas, é preciso analisar o seu uso futuro, pois essa matéria-prima pode se apresentar no estado sólido, líquido ou gasoso. Os sólidos são a principal classe desses combustíveis, incluindo produtos como madeira, palha e bagaço (JENKINS *et al*, 2019).

Porém a biomassa mais utilizada no mundo atualmente, para geração de energia é o carvão mineral, proveniente de uma técnica antiga, onde a umidade do carvão é eliminada por aquecimento e pirólise e depois gera calor para geração de energia. No entanto esse processo tem rendimento energético entre 10 a 30%, além de ser realizado, em diversos locais do mundo, sem o devido controle das emissões dos efluentes, gerando um problema ambiental mundial (JENKINS *et al*, 2019).

Como a processo de combustão é o maior gerador de CO₂ para a atmosfera, é preciso buscar alternativas aos combustíveis e processos tradicionais, pois eles tem gerado problemas ambientais, que se não forem interrompidos trarão consequências irreversíveis para o planeta.

O estudo realizado por ROKNI *et al* (2018), analisou a emissão de dióxido de carbono a partir de algumas biomassas, obtendo como resultado uma fração molar de 9% de CO₂ no efluente de saída, para queima de carvão, 2,2% para casca de milho e 5,5% para casca de arroz.

Kazanc *et al* (2011) conduziu um estudo analisando as emissões provenientes da queima de carvão, e de bagaço em ambientes controlados com atmosfera de O₂/N₂ e O₂/CO₂, e como resultado obtiveram uma emissão, em fração molar, de 15 a 18% de CO₂, para a queima de carvão, dependendo do ambiente, enquanto a emissão de CO₂ para a queima de bagaço puro ficou entre 0,6% a 1,4%, devido a menor concentração de carbono na biomassa.

3.12 Equipamentos de controle de poluição do ar

Os processos de queima de combustíveis, independentemente de sua origem, sejam fósseis ou vegetais, produzem poluentes atmosféricos, além disso existem legislações que impõe limites para essas emissões, por isso as empresas precisam controlar suas emissões, e para auxiliá-las existem os equipamentos de controle da poluição do ar (FERREIRA, 2018).

Esses equipamentos, podem ser classificados pelos mecanismos de controle e em função das características físico-química dos poluentes a que se destinam (FERREIRA, 2018).

A Tabela 13 mostra a comparação entre alguns tipos de equipamentos para controle de poluição, bem como seus respectivos parâmetros, que são usados para se decidir qual deles usar.

Tabela 12. Parâmetros de diversos tipos de equipamentos para controle da poluição.

| Equipamento | Diâmetro da partícula (µm) | Eficiência da remoção | Espaço requerido | Temp. máxima de operação (°C) | Queda de pressão (cmH₂O) | Custo anual (\$/ano.m³) |
|--|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Filtro de mangas (algodão) | 0,1-0,-1 | Razoável | | | | |
| | 1,0 | Boa | Amplo | 80 | 10 | 28,00 |
| | 10 | Excelente | | | | |
| Filtro de mangas (nylon) | 0,1-0,-1 | Razoável | | | | |
| | 1,0 | Boa | Amplo | 120 | 12 | 34,00 |
| | 10 | Excelente | | | | |
| Filtro de mangas (fibra de vidro) | 0,1-0,-1 | Razoável | | | | |
| | 1,0 | Boa | Amplo | 290 | 10 | 42,00 |
| | 10 | Boa | | | | |
| Filtro de mangas (teflon) | 0,1-0,-1 | Razoável | | | | |
| | 1,0 | Boa | Amplo | 260 | 1 | 46,00 |
| | 10 | Excelente | | | | |
| Precipitador eletrostático | 0,1-0,-1 | Excelente | | | | |
| | 1,0 | Excelente | Amplo | 400 | 1 | 42,00 |

| | | | | | | |
|---|----------|-----------|-------|-----|----|-----------|
| | 10 | Boa | | | | |
| | 0,1-0,-1 | Ruim | | | | |
| Ciclones | 1,0 | Ruim | Ampla | 400 | 10 | 16,00 |
| | 10 | Boa | | | | |
| | 0,1-0,-1 | Razoável | | | | |
| Lavador de gases (torres de spray) | 1,0 | Boa | Ampla | 540 | 5 | 25 -66,00 |
| | 10 | Boa | | | | |
| | 0,1-0,-1 | Boa | | | | |
| Lavador de gases (Venturi) | 1,0 | Excelente | Ampla | 540 | 88 | 112,00 |
| | 10 | Excelente | | | | |

Fonte: adaptado de Ferreira, 2018.

Dentre os equipamentos acima, aquele que mais se destaca é o lavador Venturi, que apesar de conter o maior custo anual, pois possui avaliação “Boa” ou “Excelente” sobre a eficiência de remoção de partículas de diversas remoções de gases, suporta grandes temperaturas, além de requer um espaço de instalação pequeno.

3.12.1 Lavadores

Os lavadores são definidos como equipamentos com função de controlar a poluição emitida para a atmosfera, eles utilizam um líquido atomizado, normalmente água, para arrastar os gases e os materiais particulados provenientes de um fluxo de gás. Eles são usados para remoção de sólidos e gases da corrente e efluentes gasosos que são gerados, por exemplo, por caldeira (GREGORI, 2020).

Como utilizam um fluido contra um fluxo de ar, os lavadores têm a vantagem, em relação a outros equipamentos de controle de poluição, de reduzir a temperatura do fluxo de gás ao mesmo tempo que remove sólidos, névoas e gases, sendo um dispositivo multidisciplinar (WERMAC, 2021).

Os lavadores que utilizam água ou outro líquido, são chamados de lavadores úmidos. O líquido é encapsulado dentro de um mecanismo, por onde passa o fluxo de gás, dessa forma o líquido absorve os contaminantes (FERREIRA, 2018).

Como a composição de gases que forma os efluentes a serem tratados pelo lavador pode mudar, é possível alterar o líquido responsável pela lavagem, de forma que ele possua mais afinidade com os poluentes que se deseja remover do fluxo de gás (WERMAC, 2021).

Existem lavadores que não utilizam líquidos, e sim materiais secos que absorvem os contaminantes do efluente, dessa forma não produz nuvem de vapor na sua saída, ao contrário dos lavadores úmidos (WERMAC, 2021).

Os lavadores de gases podem ser agrupados nos seguintes grupos: torres de spray, lavadores de orifício, lavadores de leito fibroso, lavadores ciclônicos e lavadores Venturi (FERREIRA, 2018).

3.12.2 Lavador Venturi

Como visto anteriormente os lavadores Venturi tem como vantagens sua alta eficiência de remoção de partículas pequenas de correntes gasosas, além de ser equipamentos simples e pequenos (GREGORI, 2020).

A Figura 5 revela a estrutura desse tipo de equipamento.

Figura 5. Estrutura de um lavador Venturi.



Fonte: Gregori, 2020.

Os gases entram pela seção convergente do lavador, onde são acelerados para entrarem na garganta, onde atingem sua maior velocidade, que fica no intervalo de 30 a 150m/s. Nesse local há a entrada do líquido, que realizará a lavagem do fluxo de gás (GREGORI, 2020).

Ao entrar no equipamento, o líquido assume a forma de jatos. Como existe diferença entre a velocidade do líquido e do gás, surge uma força de arraste sobre as gotas. Ao passar do tempo a energia de pressão do fluxo de gás se transforma em energia cinética, que age no líquido, atomizando as gotas (GREGORI, 2020).

Quando o líquido passa para o estado de atomização, sua área superficial aumenta consideravelmente, além disso a velocidade do gás, e a turbulência do escoamento proporcionam a transferência de massa e calor entre os dois fluidos (GREGORI, 2020).

Por fim, na seção divergente, o líquido sai com os contaminantes coletados, e o gás sai desacelerado e com menor concentração de poluentes. Após a seção divergente, pode ser adicionado um ciclone, que tem como função separar as gotas de líquido que permaneceram no fluxo de gás (GREGORI, 2020).

3.13 Controle de emissão de CO₂

As emissões industriais de dióxido de carbono precisam ser controladas, para atender as legislações vigentes e impedir que um aumento da concentração desse gás na atmosfera. Os dois métodos mais utilizados para controle e captura de CO₂ são a coluna de lavagem e separador de gotas. Na coluna de lavagem o gás entra em contato com o fluxo de água, absorvendo parte do dióxido de carbono. Nos separadores de gotas, o material particulado é coletado por meio de inércia e impacto, no entanto a coleta as gotas de diâmetro menor que 3 µm é baixa (FANG *et al*, 2020).

No entanto, estudos recentes buscam viabilizar o uso de lavadores no geral, e em lavadores Venturi, como forma de diminuir a emissão de dióxido de carbono. Esses estudos buscam encontrar os melhores fluidos e condições de

operação para esse equipamento, de forma a otimizar a absorção de CO₂ (KHANI *et al*, 2021).

3.13.1 Controle de emissão de CO₂ em lavadores

Um estudo realizado em uma coluna lavadora, foi conduzido por Samadi *et al.* (2014) que utilizou como fluido lavador, uma mistura de Fe₃O₄/água, com 0,024% de volume de óxido de ferro (II, III). Foram testadas duas condições, uma com ação de um campo magnético e outra sem a ação desse campo, e como resultado se descobriu que a absorção de CO₂ é 21% maior quando há a presença do campo magnético.

Pineda *et al.* (2014), também visando aumentar a taxa de absorção de dióxido de carbono, realizou um estudo usando nano fluidos de SiO₂/metanol e Al₂O₃/metanol, em uma coluna lavadora vertical. E dessa forma os resultados mostraram que a taxa de absorção aumentou 9,7% e 9,4%, respectivamente.

Outro estudo realizado por Bagheri *et al.* (2019) adicionou paredes de nano tubos de carbono a uma coluna lavadora, utilizando como fluidos, água pura e metildietanolamina. Os autores tiveram um resultado um aumento na absorção de CO₂, de 26,4% e 21%, respectivamente, para cada fluido utilizado.

3.13.2 Controle de emissão de CO₂ em lavadores Venturi

O estudo realizado por Abbaspour *et al.* (2020), foi conduzido em um lavador Venturi, equipado com um campo magnético permanente, foram utilizados como fluidos: ferrofluidos e água. Como resultado final obteve-se um aumento na eficiência de 17,56% utilizando ferrofluidos, e de 8,61% para água.

Por fim, Khani *et al.* (2021) conduziu um estudo, em lavador Venturi, utilizando ferrofluidos e um campo magnético uniforme, gerado por um solenoide. Os testes mostraram que essa composição, melhorou a eficiência, de absorção de dióxido de carbono, do lavador Venturi em 20,6%.

3.14 Estudos recentes sobre amostragem de gases provenientes da queima de biomassa

França et al. (2012) realizou um estudo para determinar a emissão de gases e materiais particulados a partir da queima de biomassa de cana-de-açúcar. O trabalho foi dividido em duas etapas, na primeira, realizada em dezembro de 2009, foram medidas as emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, NO_x e hidrocarbonetos não queimados, foram realizados treze testes nessa etapa, utilizando nove amostras de cana retiradas da região de Piracicaba, durante o período de seca, dessa forma a biomassa estava com uma baixa umidade e pronta para a queima. Na segunda etapa em dezembro de 2010, experimentos semelhantes foram conduzidos, porém dessa vez para se determinar a emissão de materiais particulados com diâmetro menor que 2,5 µm, PM_{2,5}.

A cana-de-açúcar, que em sua maior parte era constituída de palha, foi queimada em uma câmara de combustão com chaminé, de onde diversas amostras de gases emitidos foram retiradas, essas amostras posteriormente foram levadas para o equipamento *Rosemount Analytical*, modelo 880 A, que é um analisador infravermelho não dispersivo.

Os resultados obtidos pelos autores podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 13. Fator de emissão de alguns poluentes a partir da queima de biomassa de cana-de-açúcar.

| Poluente atmosférico | Fator de emissão (g/kg de biomassa seca queimada) |
|-----------------------------|--|
| CO ₂ | 1303 ± 218 |
| CO | 65 ± 14 |
| NO _x | 1,5 ± 0,4 |
| UHC | 16 ± 6 |
| PM _{2,5} | 2,6 ± 1,6 |

Fonte: França et al. (2012).

O estudo realizado por Amaral et al. (2013), buscou determinar as concentrações de gases e material particulado, emitidos pela queima do bagaço de cana-de-açúcar. Os autores realizaram a queima em um forno de laboratório, de onde obtiveram as amostras dos gases emitidos, que foram analisadas pelo equipamento DataRam, Modelo DR4000, e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 14. Concentração máxima de alguns poluentes a partir da queima de bagaço de cana-de-açúcar.

| Poluente atmosférico | Concentração máxima |
|-----------------------------|----------------------------|
| CO ₂ | 23.400 ppm |
| CO | 1.356 ppm |
| NO _x | 17 ppm |
| PM _{2,5} | 794.042 µm/m ³ |

Fonte: Amaral et al. (2013).

O estudo de Cardozo et al. (2013) buscou comparar as emissões da queima de *pallets* de madeira comerciais com as emissões de *pallets* feitos de bagaço de cana-de-açúcar, casca de girassol, e casca de castanha do Pará.

Os *pallets* foram então queimados em um queimador comercial, com uma capacidade de 20 kWth, que estava conectado a uma caldeira residencial, alimentada por óleo.

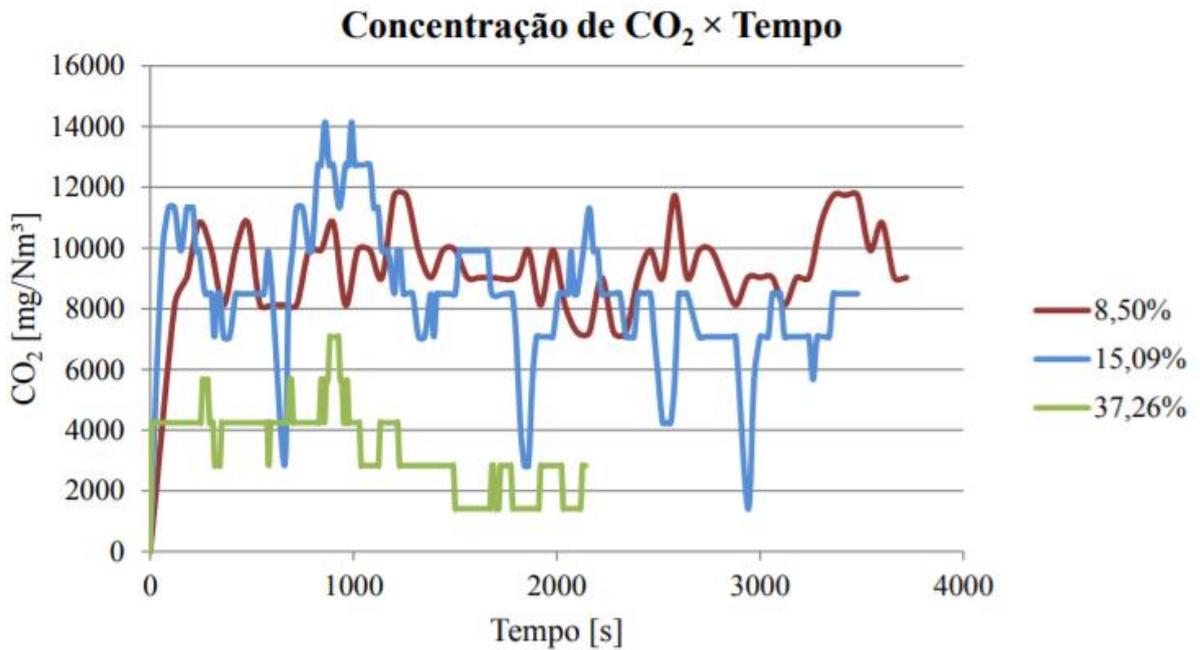
Os resultados mostraram que o bagaço emitiu menos de 100 mg/Nm³ de NO, com 13% de O₂, em testes no queimador com 12 e 13 kW de potência. Sob as mesmas condições, o bagaço emitiu cerca de 50 mg/Nm³ de CO, e cerca de 45 mg/Nm³ de SO₂.

Marcondes (2015) realizou um estudo visando determinar as concentrações de CO, CO₂, NO_x e material particulado com diâmetro menor que 2,5 µm, MP_{2,5} provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar.

As amostras de bagaço foram colocadas em um queimador, e os gases emitidos foram analisados por um amostrador de gases, Unigas 3000+ e um amostrador de material particulado, DataRam 4.

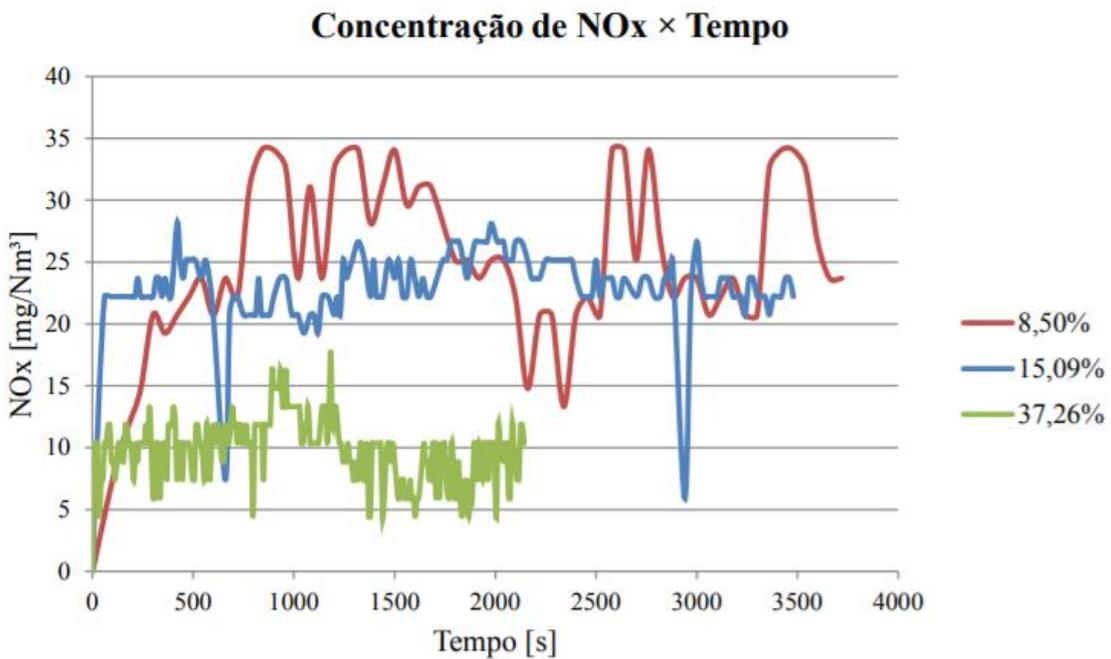
O estudo utilizou bagaço de cana-de-açúcar com três valores de umidade, 8,50%, 15,09% e 37,29%. Os resultados de poluentes emitidos, para os diferentes tipos de amostras são mostrados nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6. Variação da concentração de CO₂ em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades.



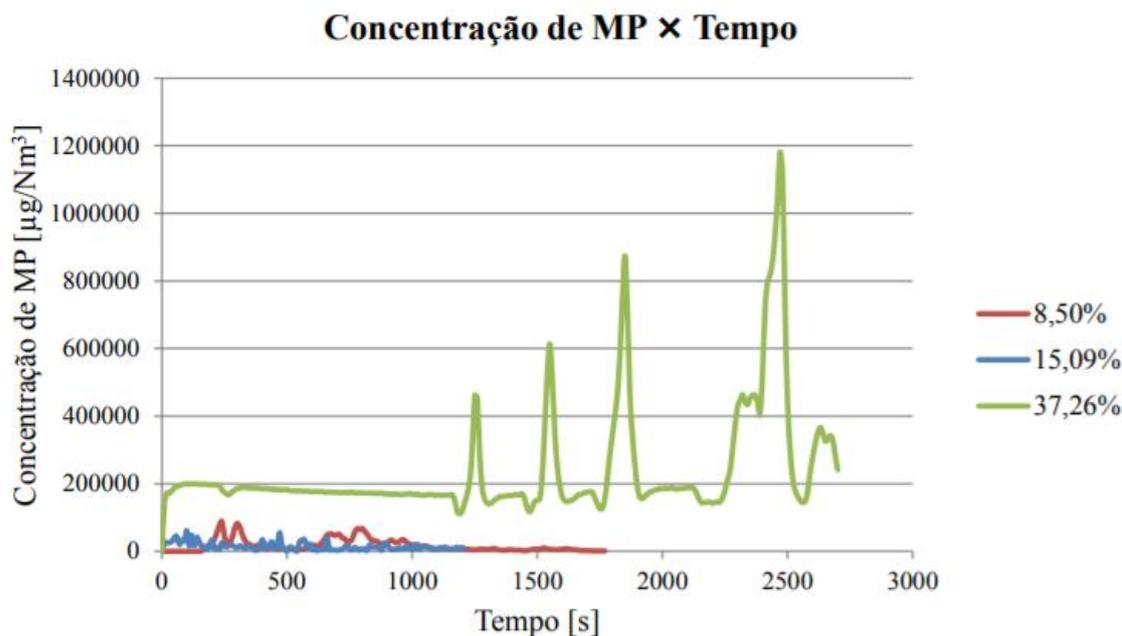
Fonte: Marcondes, 2015.

Figura 7. Variação da concentração de NO_x em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades.



Fonte: Marcondes, 2015.

Figura 8. Variação da concentração de material particulado em função do tempo de combustão, para bagaços de cana-de-açúcar com diferentes umidades.



Fonte: Marcondes, 2015.

Krumal et al (2019) conduziu um estudo para analisar a combustão de caldeiras antigas e caldeiras mais novas, *overfire boiler* (B1), *downdraft boiler* (B2), *gasification boiler* (B3), *automatic boiler* (B4), com diferentes matérias primas, madeira de abeto seca (DW), madeira de abeto úmida (WW), pellets de madeira (WP), carvão marrom (BC), briquetes de carvão marrom (BCB) e carvão duro (HC).

Todos os combustíveis foram queimados nas caldeiras B1 e B2, que são feitas para qualquer tipo de combustível sólido. Na caldeira B3 apenas as matérias primas a partir de madeira foram queimadas, e por fim no equipamento B4, todos os combustíveis foram usados, exceto o BCB, WW e DW.

Os resultados obtidos por esse estudo podem ser vistos nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 15. Fatores de emissão, mg kg, de gases para diferentes caldeiras com diferentes matérias primas.

| | NO₂ | SO₂ | CO | CO₂ |
|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| B1-WW | 405 | - | 74,7.10 ⁻³ | 1,01.10 ⁻³ |
| B2-WW | 582 | - | 96,1. 10 ⁻³ | 30,3.10 ⁻³ |

| | | | | |
|--------------|-----------------------|---|------------------------|-----------------------|
| B3-WW | 557 | - | 73,9. 10 ⁻³ | 22,2 |
| B1-DW | 1,16.10 ⁻³ | - | 112. 10 ⁻³ | 33,9.10 ⁻³ |
| B2-DW | 930 | - | 70,9.10 ⁻³ | 17,2.10 ⁻³ |
| B3-DW | 664 | - | 87,9.10 ⁻³ | 18,7.10 ⁻³ |
| B4-WP | 1,49.10 ⁻³ | - | 3,94. 10 ⁻³ | 73,1 |

Fonte: Kruma et al, 2019.

Tabela 16. Fatores de emissão, mg kg, de gases para diferentes caldeiras com diferentes combustíveis.

| | NO₂ | SO₂ | CO | CO₂ |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| B1-BC | 1,20.10 ⁻³ | 9,97.10 ⁻³ | 419.10 ⁻³ | 1,53.10 ⁻³ |
| B2-BC | 1,72.10 ⁻³ | 12,4.10 ⁻³ | 217.10 ⁻³ | 1,63.10 ⁻³ |
| B4-BC | 4,61.10 ⁻³ | 9,70.10 ⁻³ | 7,48.10 ⁻³ | 135 |
| B1-BCB | 1,06.10 ⁻³ | 3,70.10 ⁻³ | 239.10 ⁻³ | 48,8.10 ⁻³ |
| B2-BCB | 1,49.10 ⁻³ | 2,73.10 ⁻³ | 80,9.10 ⁻³ | 10,8.10 ⁻³ |
| B1-HC | 2,36.10 ⁻³ | 10,2.10 ⁻³ | 260.10 ⁻³ | 149.10 ⁻³ |
| B2-HC | 1,49.10 ⁻³ | 7,99.10 ⁻³ | 68,1.10 ⁻³ | 5,00.10 ⁻³ |
| B4-HC | 4,71.10 ⁻³ | 16,0.10 ⁻³ | 4,02.10 ⁻³ | 110 |

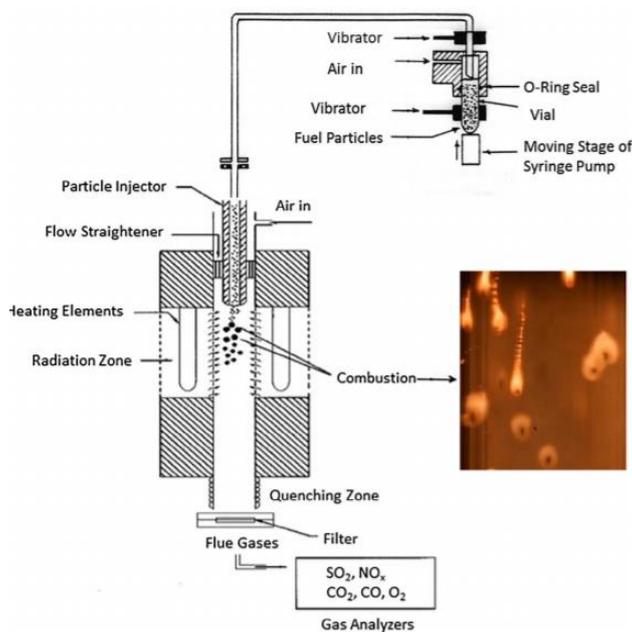
Fonte: Kruma et al, 2019.

Dessa forma os autores concluíram que as caldeiras mais modernas, B3 e B4, emitem menos poluentes para atmosfera, e que dessa forma deve ser encorajado a troca de caldeiras antigas para mais novas, além disso o uso de biomassa, nesse caso a biomassa de madeira, também ajuda a reduzir os efeitos ambientais da combustão que ocorre nesses equipamentos.

O uso de biomassa para gerar energia é muito interessante, porém algumas vezes pode esbarrar no aspecto econômico, pensando nisso ROKNI *et al* (2018) em seu estudo para analisou a emissão de gases a partir da queima de biomassa misturada com carvão, pois ao misturar o combustível fóssil ao renovável o custo total tende a diminuir, mas se deve levar aspectos como disponibilidade e custo do carvão para realizar essa mistura de matérias primas.

Os combustíveis sólidos foram queimados em um fluxo laminar aquecido eletricamente, forno de tubo de gota de alumina (DTF), no equipamento representado na Figura 9.

Figura 9. Equipamento utilizado por ROKIN *et al* (2018) para realização do estudo



Fonte: Rokin et al, 2018.

Como combustíveis foram escolhidos dois tipos de carvão, um carvão sub-betuminoso com baixo teor de enxofre e alto teor alcalino (PRB, Wyodak, Wyoming) e um carvão betuminoso de alto teor de enxofre e baixo teor alcalino (Illinois # 6) e biomassa de milho e arroz, tanto cru como torradas.

Os resultados mostraram que a emissão de dióxido de carbono é maior para amostras que continham biomassa torrada em relação a biomassa cru. As emissões de dióxido de carbono da queima dos dois tipos de carvão, foram diminuídas em todas as misturas com biomassa, sendo mais a redução mais expressiva para as misturas de biomassa e carvão betuminoso. As emissões de NO_x também foram reduzidas utilizando a mistura dos carvões com biomassa.

Dessa forma pode-se concluir que se misturar carvão com biomassa pode ser uma alternativa viável para indústria do ponto de vista ambiental, já que as emissões de gases nocivos a partir da queima da mistura desses combustíveis é menor do que se houvesse apenas a queima de carvão puro. Porém como a indústria também visa o lucro, é preciso uma análise econômica para ver determinar se essa mistura é viável economicamente.

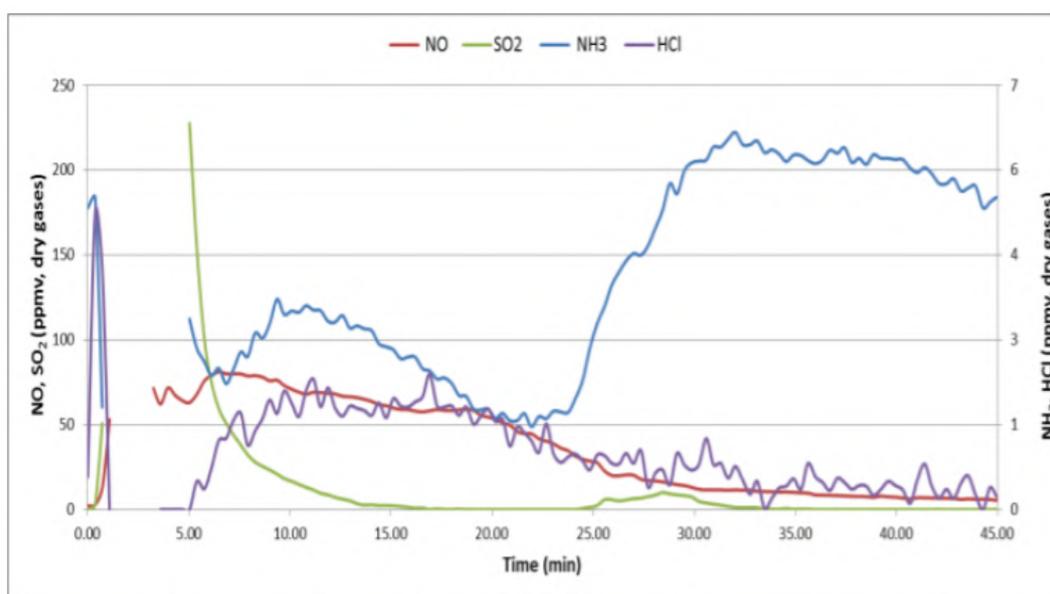
Em Portugal, Duarte *et al* (2014) realizou um estudo sobre as emissões de gases e partículas de um forno português, alimentado por dois tipos de

madeira, pinho e eucalipto. A escolha das matérias primas mostra a tendencia dos europeus de usarem outros tipos de biomassas além do bagaço.

Os dois tipos de madeira foram queimados em um forno doméstico, de pequenas dimensões, com uma chaminé. A queima se deu em um ambiente fechado, onde o calor proveniente do forno se espalhou pelo ar. Para análise dos gases, se utilizou um ADC 700 com modulo Servomex.

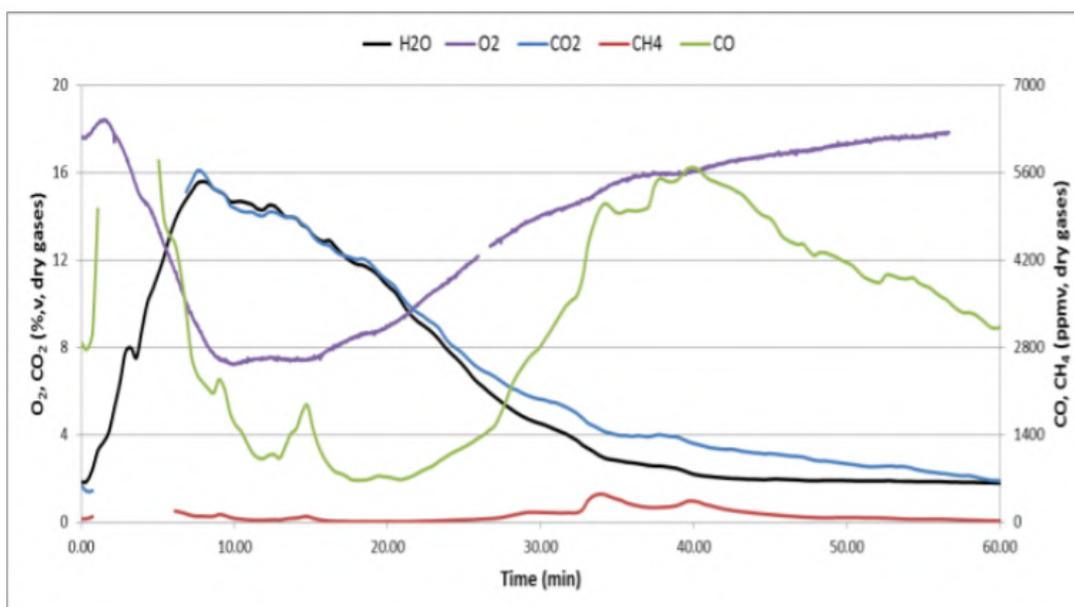
Os resultados obtidos pelos autores podem ser observados nas Figuras 10 e 11.

Figura 10. Perfil de emissão de alguns gases, a partir da queima de pinho.



Fonte: Dantas *et al*, 2014.

Figura 11. Perfil de emissão de alguns gases, a partir da queima de eucalipto.



Fonte: Dantas *et al*, 2014.

E para os materiais particulados, PM₁₀, os fatores de emissão foram 229 e 345 mg.MJ⁻¹ para o eucalipto e pinho, respectivamente.

Os autores concluem que de forma geral, a queima da madeira de eucalipto emite concentrações maiores de poluentes, porém produz menores quantidades de material particulado.

No mesmo sentido Ozsen *et al* (2014) conduziu ensaio parecido, determinando a emissão, em local fechado, de gases queimados em aquecedores caseiros, sendo quatro de alimentação manual de lenha, com potência entre 6 a 11 kW, e dois de alimentação automática de pallets, com 8,8 a 25 kW de potência.

O estudo teve como objetivo comparar os fatores de emissão de poluentes para os dois tipos de aquecedores, manual e automático. Para isso foram utilizados cinco tipos de lenha: faia, falsa acácia, carpa, carvalho e abeto, quanto para o aquecedor de pallets foram escolhidos dois tipos: de baixa qualidade e de alta qualidade.

Os resultados obtidos para os fatores de emissão, obtidos após a combustão das matérias primas, podem ser vistos na Tabela 18.

Tabela 17. Fatores de emissão, g.GJ-1, de gases para os dois tipos de aquecedores.

| | Aquecedor manual | Aquecedor automático |
|-----------------|------------------|----------------------|
| NO _x | 122 | 66 |
| CO | 5858 | 219 |
| PM | 254 | 85 |

Fonte: Ozsen et al, 2019.

Os autores terminam discutindo que os diferentes tipos de madeira apresentam resultados semelhantes de emissões, enquanto o contrário ocorre com os *pallets*, onde o de melhor qualidade emite menos poluentes. Além disso o uso de um aquecedor de alimentam automática traz benefícios, já que suas emissões são consideravelmente menores do que o outro modelo.

Zajac et al (2017) realizou um trabalho onde queimou pallets de madeira e de *Virginia mallow*, uma planta americana, para determinar as concentrações de gases emitidos nesse processo. Para isso os autores utilizaram um queimador com alimentação automática de combustível, e com uma potência de 32 kW. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 19.

Tabela 18. Concentração de gases emitidos a partir da queima de dois tipos de biomassa

| Gás | Unidade | Pallets de <i>Virginia mallow</i> | Pallets de madeira |
|-----------------|---------|-----------------------------------|--------------------|
| O ₂ | % | 9,66 | 6,71 |
| CO ₂ | % | 10,7 | 13,73 |
| CO | % | 0,21 | 0,00 |
| NO | ppm | 324,81 | 256,24 |
| NO _x | ppm | 328,18 | 256,39 |
| SO ₂ | ppm | 0,33 | 0,00 |

Fonte: Zajac et al, 2017.

Em estudo realizado no Brasil, Campos et al (2017), avaliou a emissão de CO₂ e CO, a partir da combustão da biomassa de *Pinus sp*, que é composta por 30% de serragem; 10% de casca; e 60% fibra de madeira, com diferentes umidades relativas.

Os autores utilizaram uma caldeira aquatubular com 8,68 mW de carga térmica para realizar a queima do combustível. Os dados obtidos estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 19. Concentração média de gases, em ppm, emitidos a partir da queima de biomassa de *Pinus sp*, com diferentes teores de umidade.

| Gás | 52% de umidade | 25% de umidade |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| CO ₂ | 14,63 | 9,29 |
| CO | 785,54 | 388,32 |

Fonte: Campos et al, 2017.

Skopec *et al* (2014) conduziu um estudo para determinar a emissão dos gases, CO, NO_x e SO₂, a partir da queima de biomassa proveniente de *pallets* de madeira e palha.

O grupo utilizou uma caldeira comercial, para queimar os combustíveis, que possuía uma potência de 25 kW. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 20. Concentração média de gases, em ppm, emitidos a partir da queima de dois tipos diferentes de biomassa.

| Gás | <i>Pallets</i> de madeira | <i>Pallets</i> de palha |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| SO ₂ | 0,32 | 0,43 |
| CO | 165 | 3381 |
| NO _x | 77 | 240 |

Fonte: Skopec et al, 2014.

Baseado nos estudos apresentados, e os resultados obtidos pelos autores, nota-se que a umidade da biomassa, bem como sua origem, afeta diretamente as emissões gasosas. Além disso, outras variáveis como as condições ambientais, e o equipamento em que ocorre a combustão, também alteram a composição dos gases emitidos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Biomassa

A biomassa, utilizada com combustível nos testes de emissão de gases, foi o bagaço de cana-de-açúcar. Essa matéria prima foi cedida pela usina sucroalcooleira Santa Cruz, localizada na cidade de Américo Brasiliense, estado de São Paulo e que pertence ao grupo São Martinho.

Para garantir que a biomassa se apresentasse de forma homogênea e com baixo teor de humidade durante as queimadas, o bagaço foi previamente seco em ambiente aberto e com constante luz solar, além disso houveram medições gravimétricas até que o bagaço estivesse com massa constante. A Figura 12 mostra o bagaço utilizado nesses testes.

Figura 12. Bagaço utilizado nos testes.



Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2 Queimador

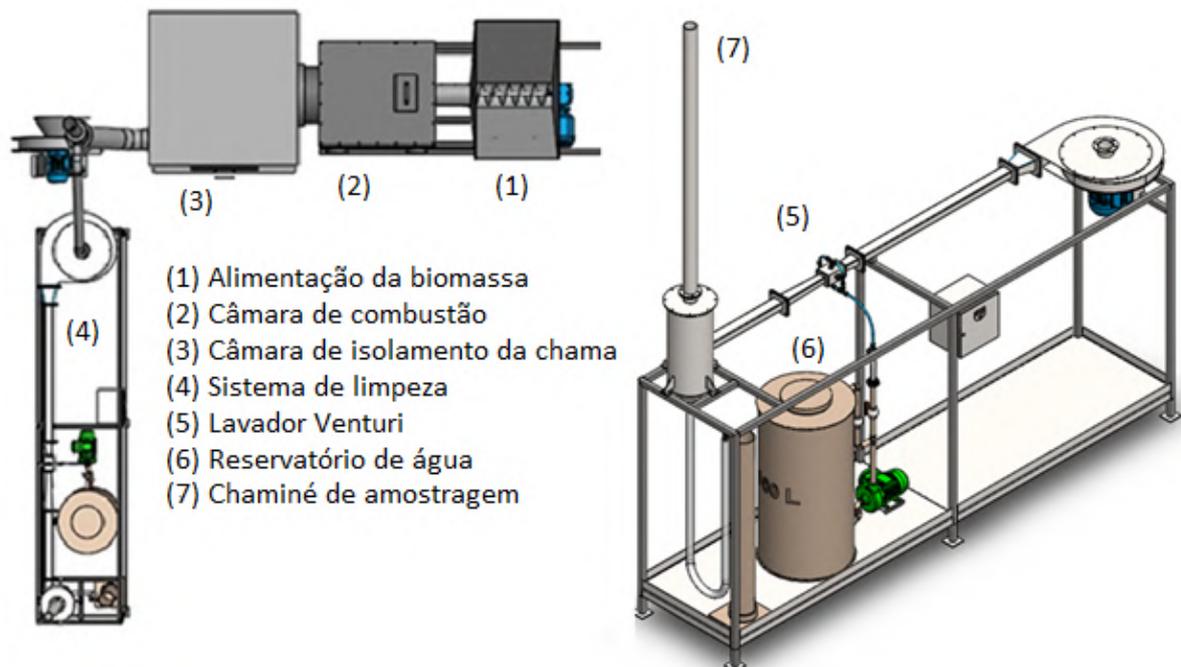
O processo de combustão do bagaço ocorreu em um queimador experimental, obtido pelo projeto Fapesp n.º 2016/23209-0. O equipamento, que pode ser visto na Figura 13, é composto por um alimentador rotativo, câmara de combustão, câmara de gases de exaustão, lavador Venturi, ciclone, sopradores e dutos de exaustão. O esquema do sistema é exemplificado na Figura 14.

Figura 13. Queimador utilizado nos experimentos.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 14. Estrutura dos equipamentos que compõem o queimador.



- (1) Alimentação da biomassa
- (2) Câmara de combustão
- (3) Câmara de isolamento da chama
- (4) Sistema de limpeza
- (5) Lavador Venturi
- (6) Reservatório de água
- (7) Chaminé de amostragem

Fonte: Projeto FAPESP 2016/23209-0.

A biomassa, previamente tratada, foi disposta no alimentador conforme a Figura 15.

Figura 15. Biomassa disposta no alimentador.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Após passar pelo alimentador, o bagaço segue para a câmara de combustão, onde ocorre efetivamente o processo de queima, após o início da combustão, o combustível libera gases e material particulado, que seguem para o receptor de gases, enquanto as cinzas residuais permanecem nessa câmara.

O queimador possui diversos mecanismos que garantem um processo seguro, como revestimento interno de lã de rocha e controle automático de temperatura, para que não se atinja valores de gases superiores a 380°C, acima disso o sistema se autodesliga.

4.2 Lavador Venturi

O equipamento responsável pelo controle das emissões de gases, dentro do sistema do queimador é o lavador Venturi, que se encontra entre o sistema de queima e o ciclone.

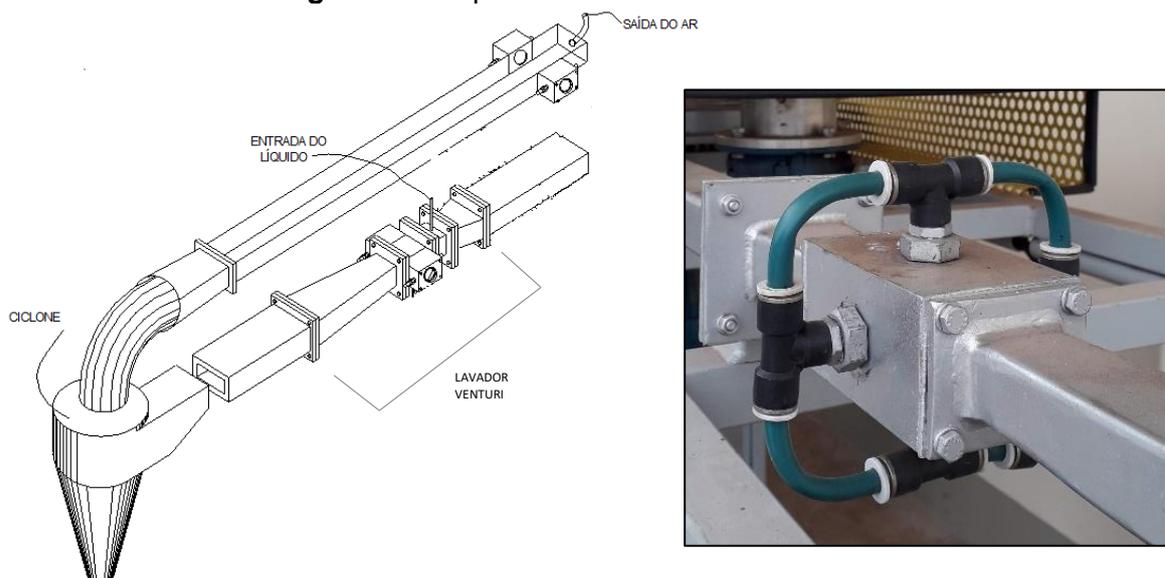
Suas dimensões são mostradas na Tabela 22, enquanto a Figura 16 subsequente exemplifica o perfil desse equipamento.

Tabela 21. Medidas do lavador Venturi.

| Seção do lavador | Dimensões (cm) | Dimensão | Informações adicionais |
|-------------------------|----------------|-------------|---|
| | 11,7 | Comprimento | |
| Garganta | 2,4 | Largura | 8,4 cm ² de área |
| | 3,5 | Altura | |
| Seção divergente | 28,0 | Comprimento | 4 bicos injetores de água, com diâmetro de 2,05 mm. |
| | 2,3 | Largura | |
| | 10 | Altura | |

Fonte: adaptado de Da Silva, 2020.

Figura 16. Esquema de um lavador Venturi.



Fonte: Projeto FAPESP 2018/00697-5.

O fluxo de gás, que contém material particulado, obtido após a queima do bagaço, é redirecionado para o lavador Venturi por um soprador que bombeia esse fluido, a velocidades acima de 70 m/s. Para garantir que o fluxo gasoso passe pelo lavador existem exaustores que realizam esse direcionamento.

4.3 Amostrador de gases

O amostrador de gases utilizado foi o CHEMIST 500(Projeto FAPESP 2018/00697-5.), Figura 17, um equipamento portátil, que trabalha com quatro células eletroquímicas para medir os gases: O₂, CO, NO, NO₂, SO₂, C_xH_y ou CO₂. A sonda de amostragem é fornecida a partir de uma mangueira de 3 metros.

Figura 17. Amostrador de gases CHEMIST 500.



Fonte: Manual do CHEMIST 500.

A sonda do equipamento foi colocada na última chaminé do queimador, no ponto central de saída.

4.4 Condições de operação

Foram realizadas, duas fases de testes, compostas por oito ensaios, cujas as condições operacionais, para cada dase, podem ser vistas na Tabela 23, sendo a velocidade do gás na garganta, V_g, vazão de água, QL, e o tempo de amostragem.

Tabela 22. Condições operacionais dos testes.

| | | Velocidade do gás na garganta (m/s) | Frequência alimentador (Hz) | Vazão de água (l/h) | Tempo de amostragem (min) |
|----------------|---------|--|--|--------------------------------|--|
| | Teste 1 | 217 | 30 | 400 | 5 |
| | Teste 2 | 217 | 30 | 300 | 5 |
| | Teste 3 | 174 | 30 | 300 | 5 |
| Bateria | Teste 4 | 174 | 30 | 400 | 5 |
| 1 | Teste 5 | 137 | 30 | 400 | 5 |
| | Teste 6 | 137 | 30 | 300 | 5 |
| | Teste 7 | 88 | 30 | 300 | 5 |
| | Teste 8 | 88 | 30 | 400 | 5 |
| | Teste 1 | 217 | 40 | 400 | 5 |
| | Teste 2 | 217 | 40 | 300 | 5 |
| | Teste 3 | 174 | 40 | 300 | 5 |
| Bateria | Teste 4 | 174 | 40 | 400 | 5 |
| 2 | Teste 5 | 137 | 40 | 400 | 5 |
| | Teste 6 | 137 | 40 | 300 | 5 |
| | Teste 7 | 88 | 40 | 300 | 5 |
| | Teste 8 | 88 | 40 | 400 | 5 |

Fonte: Autoria própria, 2021.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições em que cada teste foi realizado podem ser visadas na Tabela 24.

Tabela 23. Condições para cada teste.

| Bateria | Teste | Data | Número de medições | Intervalo de tempo entre as medições (s) |
|----------------|--------------|-------------|---------------------------|---|
| 1 | 1 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 2 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 3 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 4 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 5 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 6 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 7 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| | 8 | 17/09/2020 | 60 | 5 |
| 2 | 1 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 2 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 3 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 4 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 5 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 6 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 7 | 09/09/2021 | 60 | 5 |
| | 8 | 09/09/2021 | 60 | 5 |

Fonte: Autoria própria.

A temperatura da câmara de combustão, em todos os testes, foi medida seis vezes, no minuto zero, um, dois, três, quatro e cinco, chamados de T0, T1, T2, T3, T4, T5, respectivamente, e pôr fim a temperatura média, Tm. Esses dados podem ser observados na Tabela 25.

Tabela 24. Temperatura da queima, em graus Celsius.

| | | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | Tm |
|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Bateria 1 | Teste 1 | 278 | 279,8 | 282,8 | 287 | 269 | 261,4 | 276,33 |
| | Teste 2 | 273,3 | 279,8 | 282,8 | 287 | 264 | 261,4 | 274,72 |
| | Teste 3 | 273,8 | 285 | 284,7 | 280,9 | 281,7 | 269,9 | 279,33 |
| | Teste 4 | 269 | 261 | 266,5 | 272 | 283 | 273 | 270,75 |
| | Teste 5 | 269 | 261 | 266,5 | 272 | 287 | 283 | 273,08 |
| | Teste 6 | 295 | 299 | 300 | 302,5 | 299,2 | 297 | 298,78 |
| | Teste 7 | 302 | 307,9 | 299,3 | 292,9 | 299,9 | 300 | 300,33 |
| | Teste 8 | 315,9 | 319 | 327,8 | 339 | 340 | 341,5 | 330,53 |
| Bateria 2 | Teste 1 | 137,1 | 135,7 | 130,1 | 128,1 | 128,3 | 128,6 | 131,32 |
| | Teste 2 | 124,5 | 124,5 | 127,3 | 127,7 | 130,4 | 132 | 127,73 |
| | Teste 3 | 135 | 132 | 130,9 | 130,6 | 132,8 | 134,1 | 132,57 |
| | Teste 4 | 130,5 | 129,4 | 132,7 | 132,3 | 132,6 | 129,6 | 131,18 |
| | Teste 5 | 132,8 | 136 | 134,4 | 130 | 133,3 | 132,5 | 133,17 |
| | Teste 6 | 136,6 | 133,9 | 134,9 | 136,4 | 136,9 | 135,6 | 135,72 |
| | Teste 7 | 144,6 | 146 | 145,7 | 148,6 | 148,1 | 148,7 | 146,95 |
| | Teste 8 | 141,8 | 140,4 | 141,8 | 145,1 | 146,4 | 147 | 143,75 |

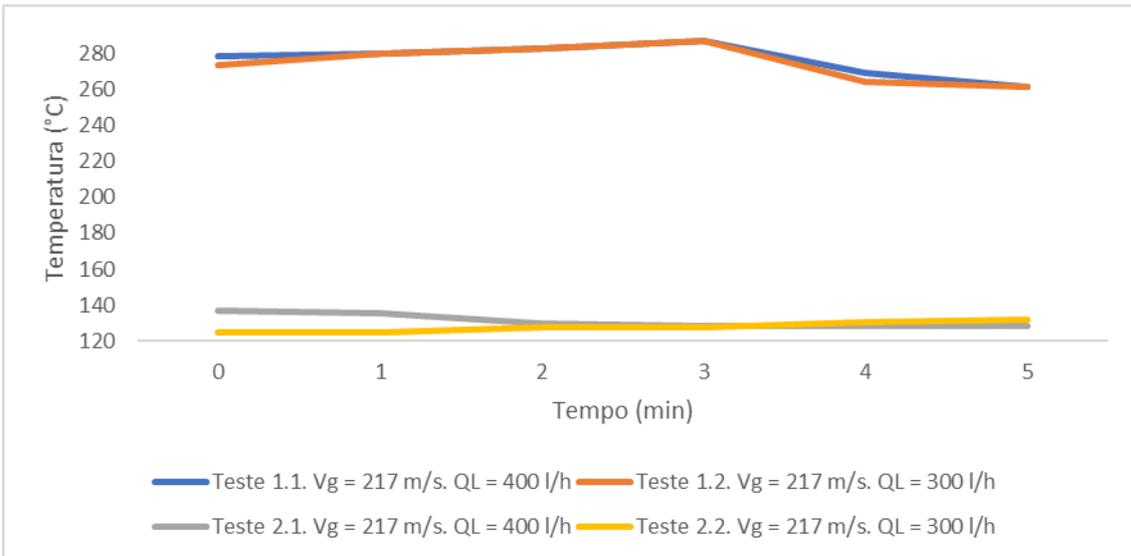
Fonte: Autoria própria.

De forma a se obter uma melhor visualização das variações de temperatura ao longo do processo, foram confeccionados **figuras**, que reúnem os testes realizados com a mesma velocidade de gás, em ambas as baterias.

Os testes foram nomeados, como, por exemplo, “Teste 1.1”, de forma que o primeiro algarismo corresponde a bateria e o segundo corresponde ao número do teste dentro da bateria.

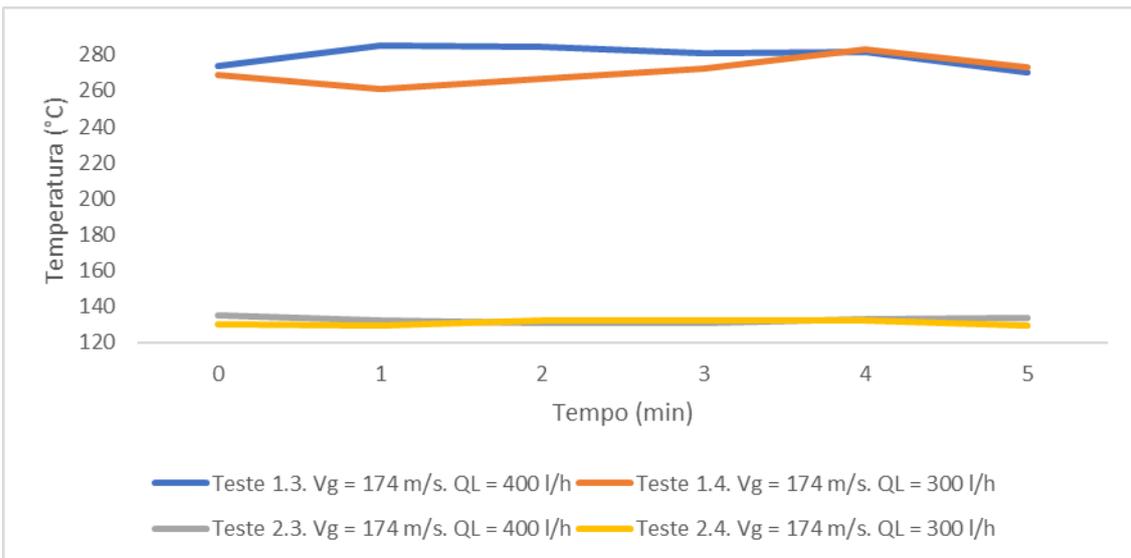
As Figuras 18, 19, 20 e 21, mostra os perfis de temperatura nos testes.

Figura 18. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



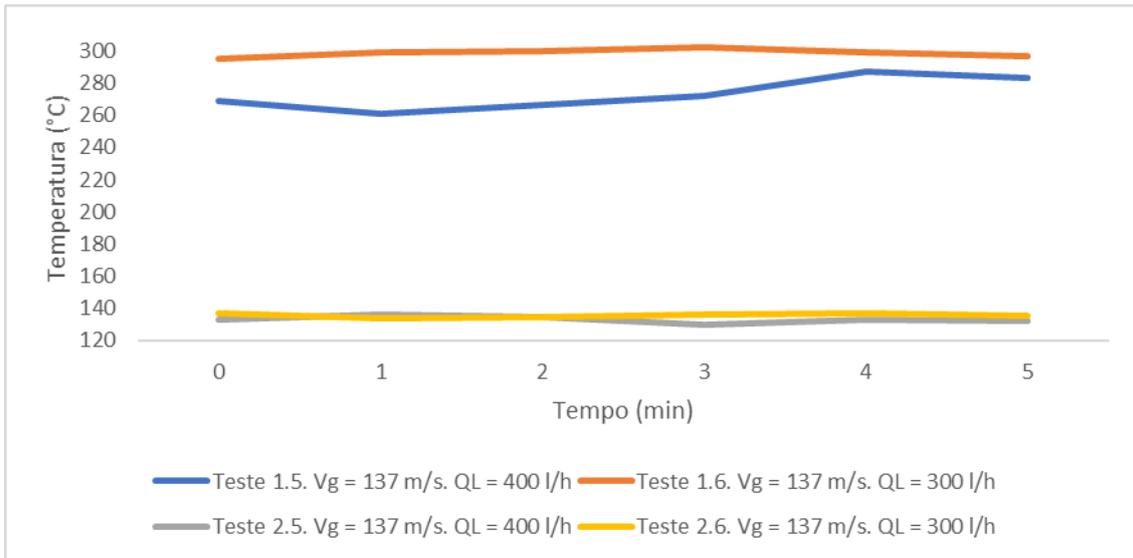
Fonte: Autoria própria.

Figura 19. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



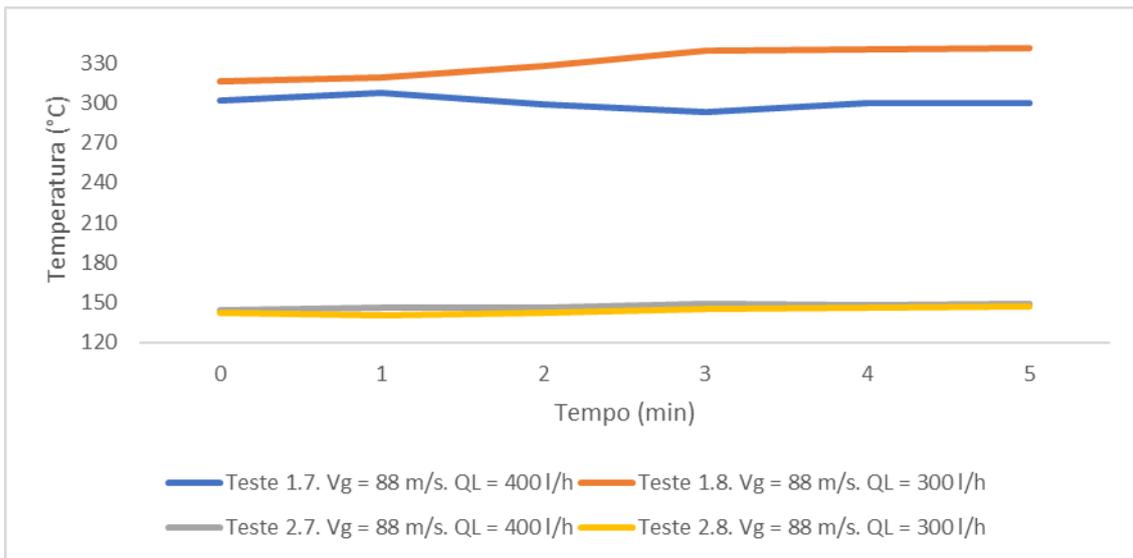
Fonte: Autoria própria.

Figura 20. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21. Perfil de temperatura para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



Fonte: Autoria própria.

De forma geral, ao se comparar a temperatura da primeira bateria de testes com a segunda, observa-se que a primeira sequência de experimentos o gás queimou em uma temperatura maior.

Na segunda bateria, o alimentador trabalhou em uma frequência maior, devido as condições climáticas, já que houve um vento forte do segundo dia de testes, impedindo que se aumentasse a temperatura da queima.

Na bateria dois, as temperaturas permaneceram muito próximas entre um teste e o outro, isso também ocorreu na bateria um, nos testes das figuras 19 e 20 acima, entretanto os experimentos seguintes, mostraram uma elevação da temperatura para os testes em que a vazão do lavador Venturi foi maior.

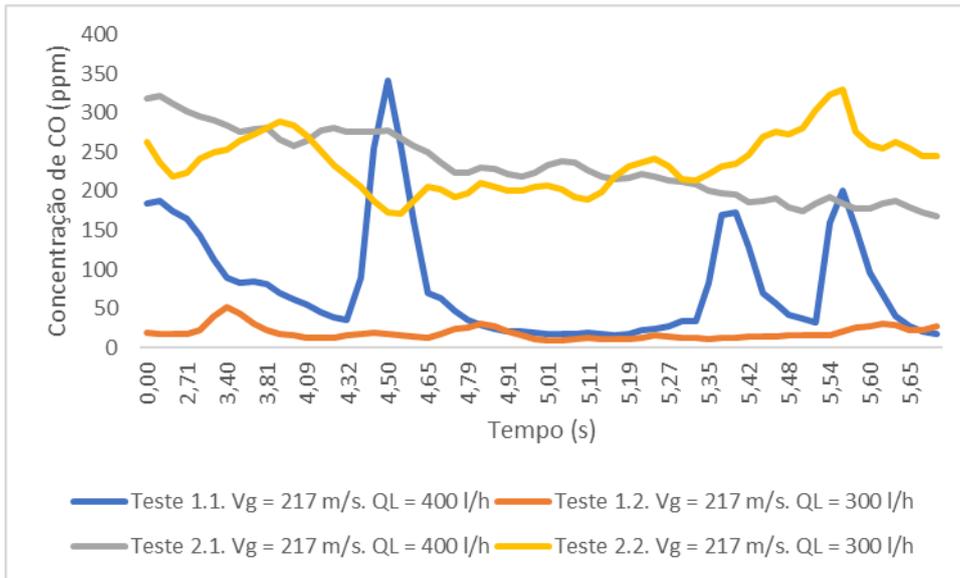
Com relação aos gases emitidos pela queima do bagaço, as Figuras 22, 23, 24 e 25, mostram a concentração de CO ao longo do tempo de medição, nos testes, que foram agrupados da mesma forma seguida pelos gráficos de temperatura, além disso os tempos em segundos, do eixo x, foram passados para escala logarítmica, conforme a Tabela 26.

Tabela 25. Tempo das amostragem e sua conversão logarítmica.

| Tempo (s) | ln | Tempo (s) | ln | Tempo (s) | ln |
|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| 0 | 0,00 | 100 | 4,61 | 200 | 5,30 |
| 5 | 1,61 | 105 | 4,65 | 205 | 5,32 |
| 10 | 2,30 | 110 | 4,70 | 210 | 5,35 |
| 15 | 2,71 | 115 | 4,74 | 215 | 5,37 |
| 20 | 3,00 | 120 | 4,79 | 220 | 5,39 |
| 25 | 3,22 | 125 | 4,83 | 225 | 5,42 |
| 30 | 3,40 | 130 | 4,87 | 230 | 5,44 |
| 35 | 3,56 | 135 | 4,91 | 235 | 5,46 |
| 40 | 3,69 | 140 | 4,94 | 240 | 5,48 |
| 45 | 3,81 | 145 | 4,98 | 245 | 5,50 |
| 50 | 3,91 | 150 | 5,01 | 250 | 5,52 |
| 55 | 4,01 | 155 | 5,04 | 255 | 5,54 |
| 60 | 4,09 | 160 | 5,08 | 260 | 5,56 |
| 65 | 4,17 | 165 | 5,11 | 265 | 5,58 |
| 70 | 4,25 | 170 | 5,14 | 270 | 5,60 |
| 75 | 4,32 | 175 | 5,16 | 275 | 5,62 |
| 80 | 4,38 | 180 | 5,19 | 280 | 5,63 |
| 85 | 4,44 | 185 | 5,22 | 285 | 5,65 |
| 90 | 4,50 | 190 | 5,25 | 290 | 5,67 |
| 95 | 4,55 | 195 | 5,27 | 295 | 5,69 |

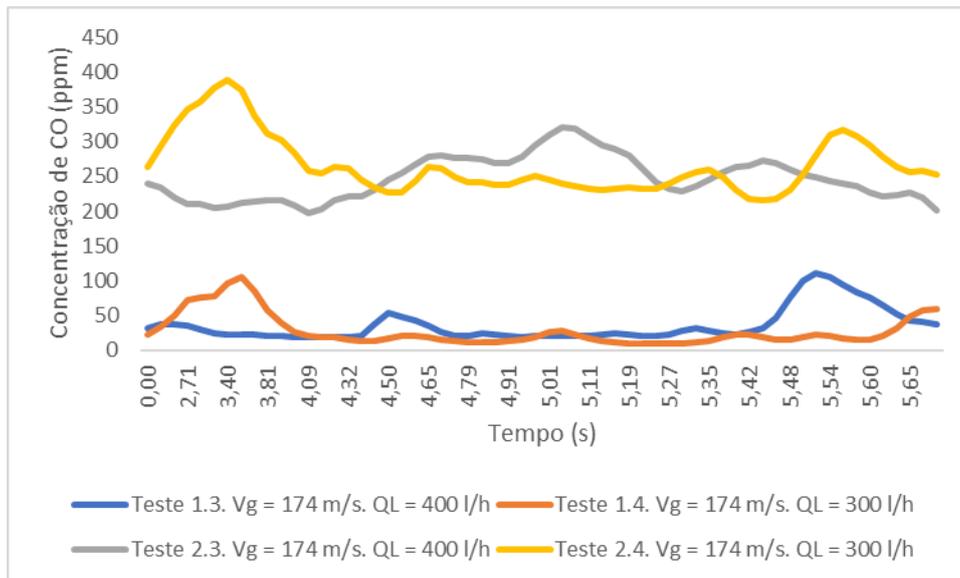
Fonte: Autoria própria.

Figura 22. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



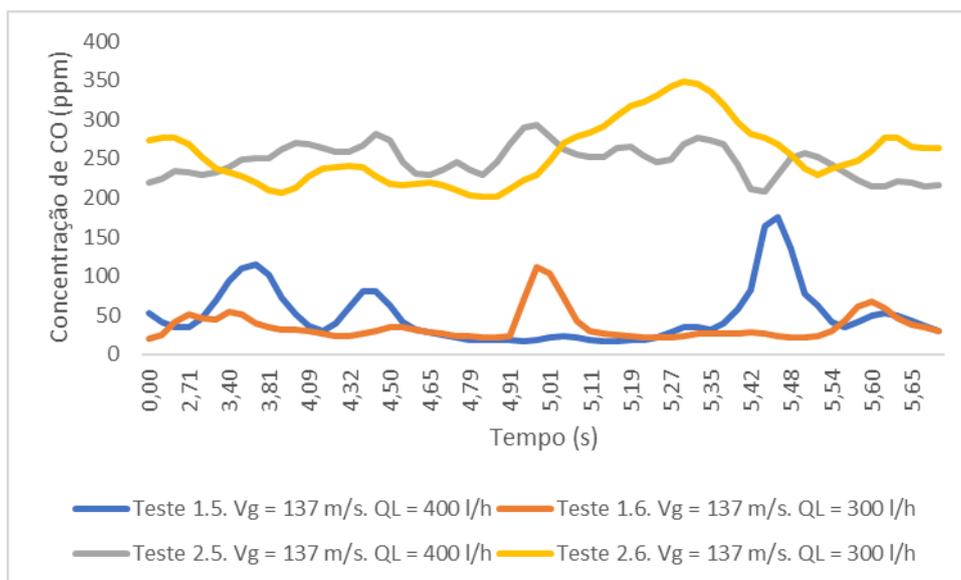
Fonte: Autoria própria.

Figura 23. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



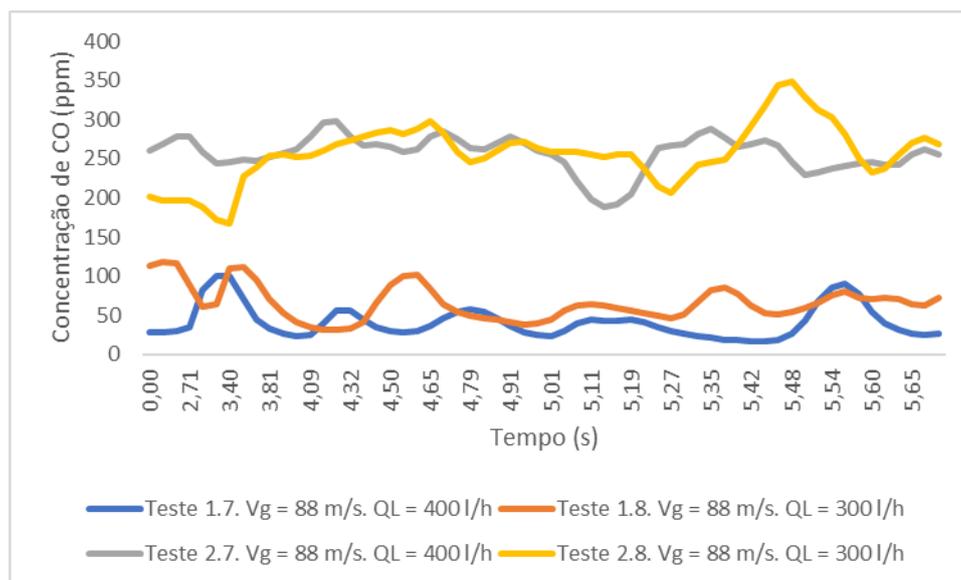
Fonte: Autoria própria.

Figura 24. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25. Perfil da emissão de CO para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



Fonte: Autoria própria.

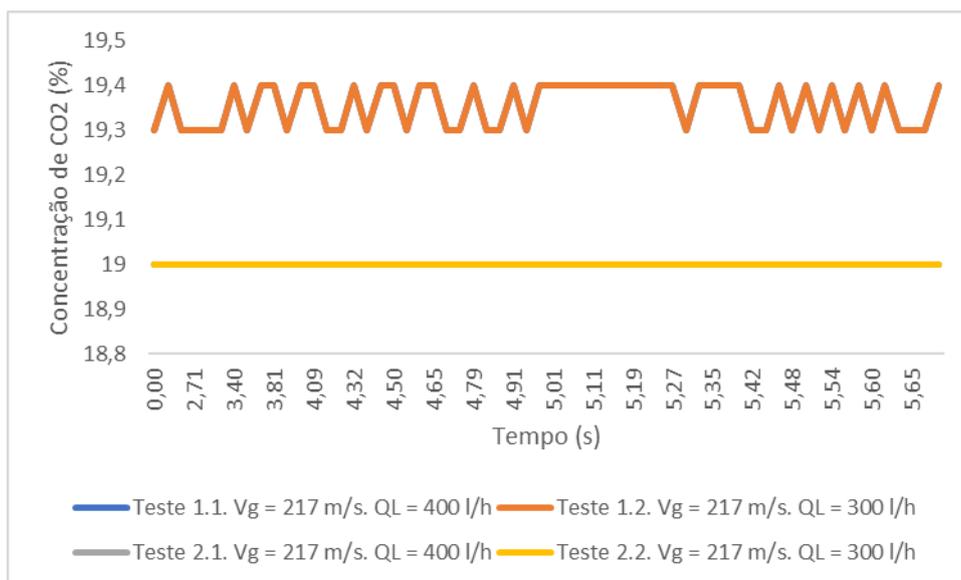
De acordo com os gráficos acima, os testes da bateria 2 produziram as maiores concentrações de monóxido de carbono no gás de saída do queimador. Esse fato demonstra que a baixa temperatura de queima nesses experimentos, pode ter levado a uma combustão incompleta.

Comparando os testes com vazão de líquido de 300 l/h com os testes com vazão de líquido de 400 l/h, nota-se os testes com menor vazão de líquido emitiram uma menor concentração de CO.

Além disso, a vazão do gás de 88m/s, permite uma maior penetração do jato liquido, aumentando a eficiência da lavagem e diminuindo a emissão de monóxido de carbono.

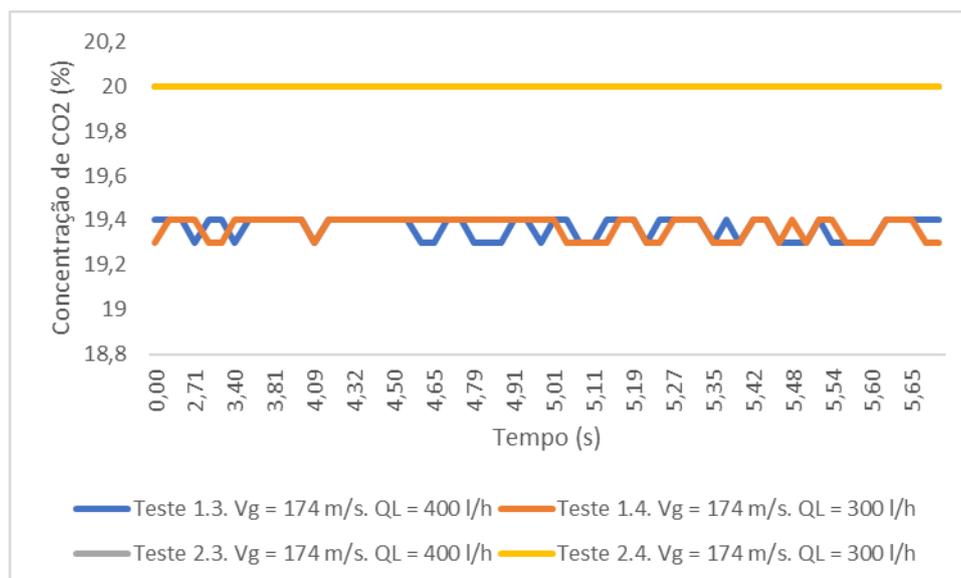
As emissões, para o CO₂, foram medidas e dispostas nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

Figura 26. Perfil da emissão de CO₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



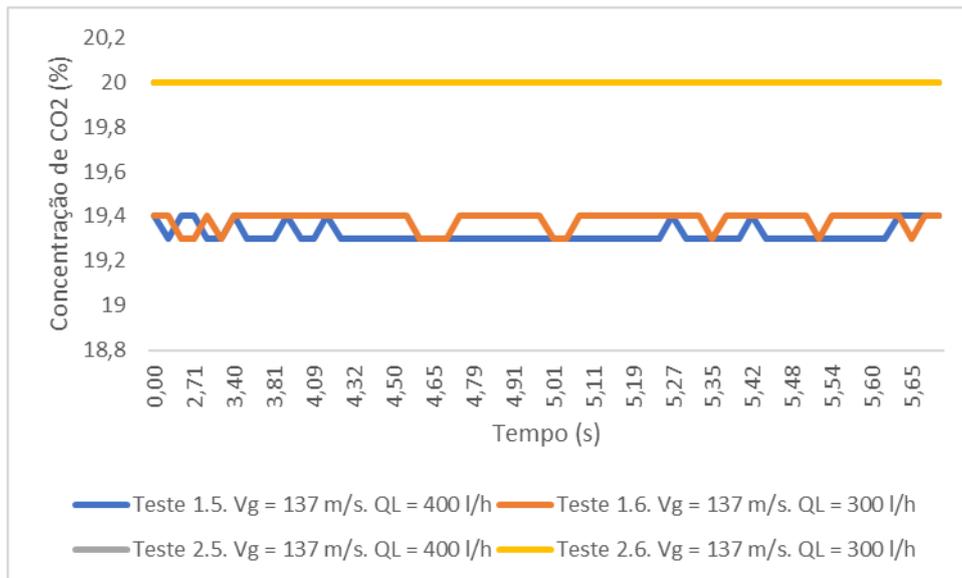
Fonte: Autoria própria.

Figura 27. Perfil da emissão de CO₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



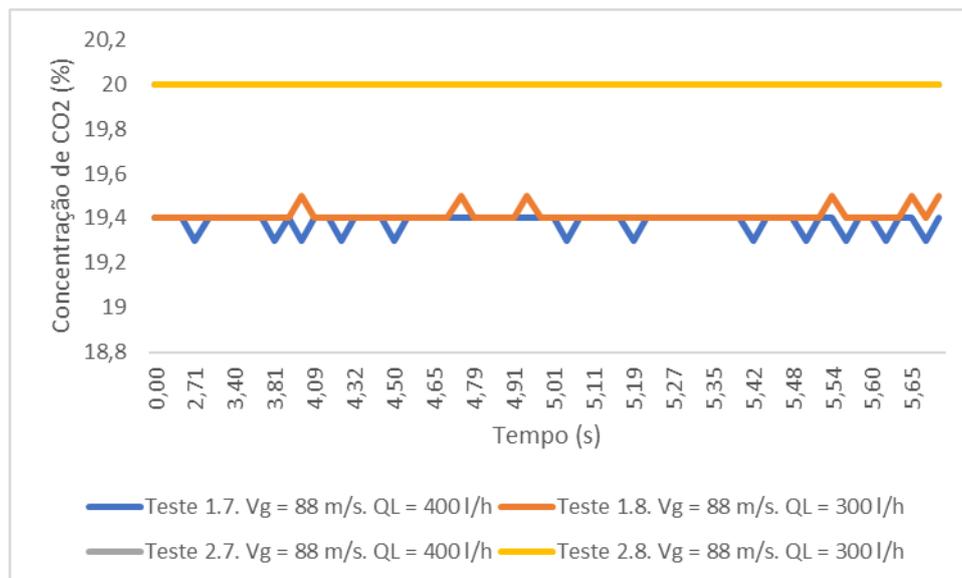
Fonte: Autoria própria.

Figura 28. Perfil da emissão de CO₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29. Perfil da emissão de CO₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



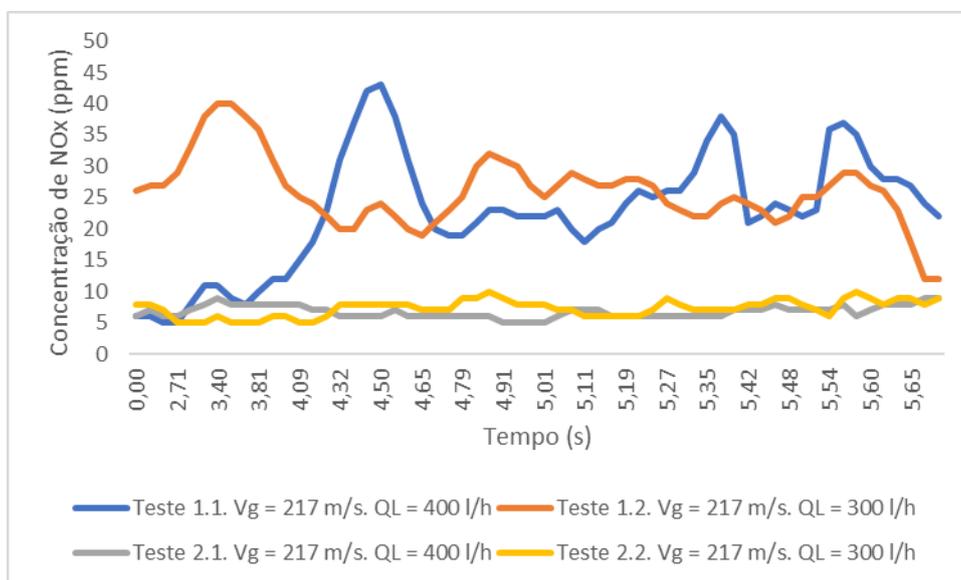
Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostram que as emissões de dióxido de carbono pouco variaram, independente das condições do experimento, se mantendo em valores entre 19 e 20%.

Outro ponto a se destacar é de que na segunda bateria de testes, as concentrações de CO₂ emitidas foram iguais, para os dois testes dos quatro gráficos, dessa forma a linha cinza coincide com a linha amarela em todas as figuras.

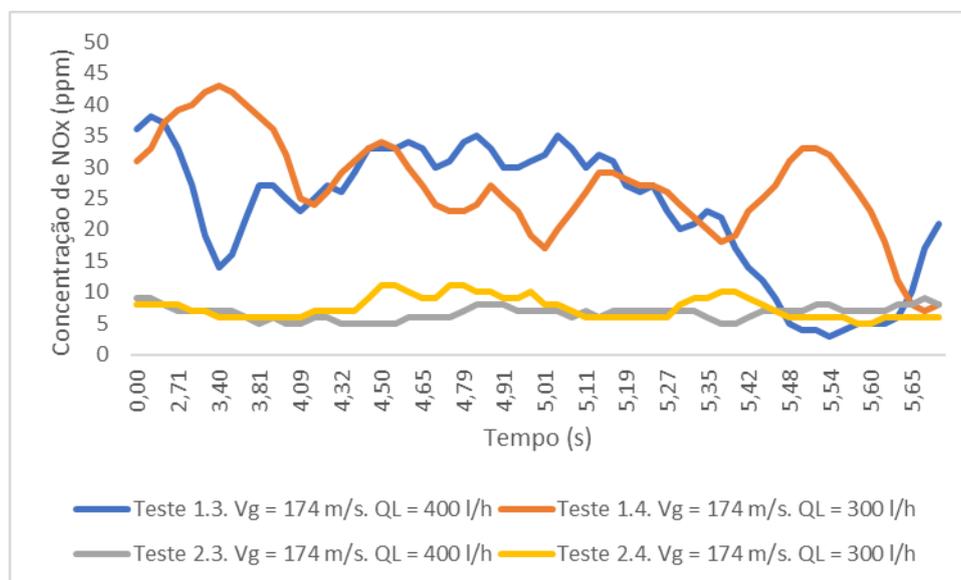
Seguindo para o NO_x, as Figuras 30, 31, 32 e 33 revelam a concentração desses gases, na corrente de saída do **queimador com o lavador Venturi em operação.**

Figura 30. Perfil da emissão de NO_x para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



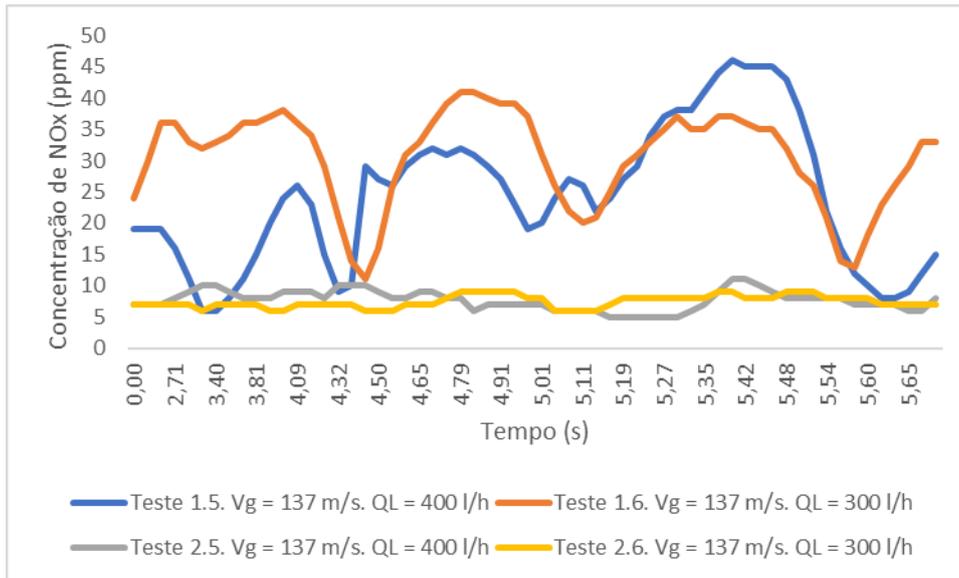
Fonte: Autoria própria.

Figura 31. Perfil da emissão de NO_x para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



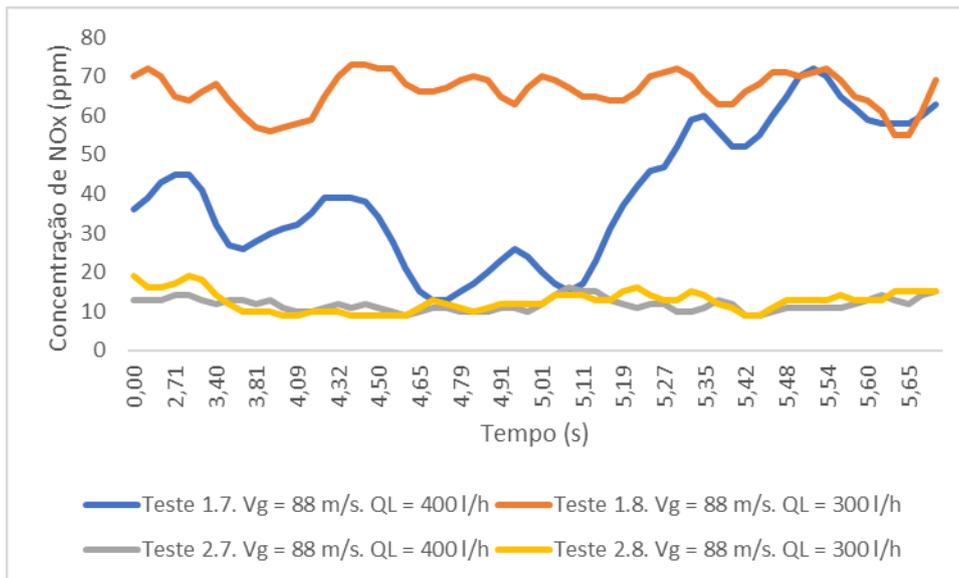
Fonte: Autoria própria.

Figura 32. Perfil da emissão de NO_x para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33. Perfil da emissão de NO_x para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



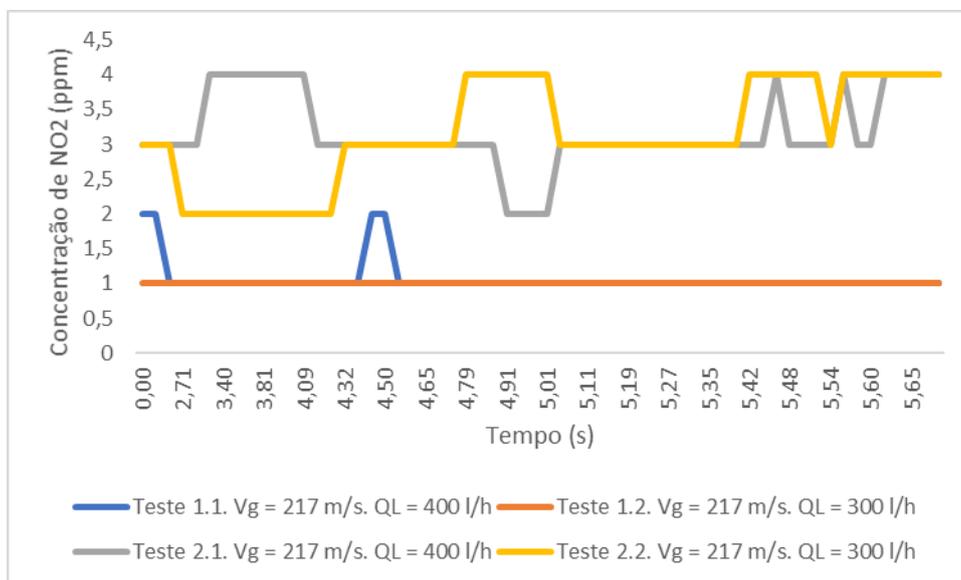
Fonte: Autoria própria.

Os testes da primeira bateria foram os que mais produziram o NO_x, o que pode ser um indicativo de que, o processo de combustão foi mais eficiente, e maiores temperaturas favorecendo a formação desse tipo de gás.

Ao contrário do CO, os testes com vazões de líquido no lavador Venturi de 400 L/h, emitiram menores quantidades de poluentes, nesse caso, o NO_x.

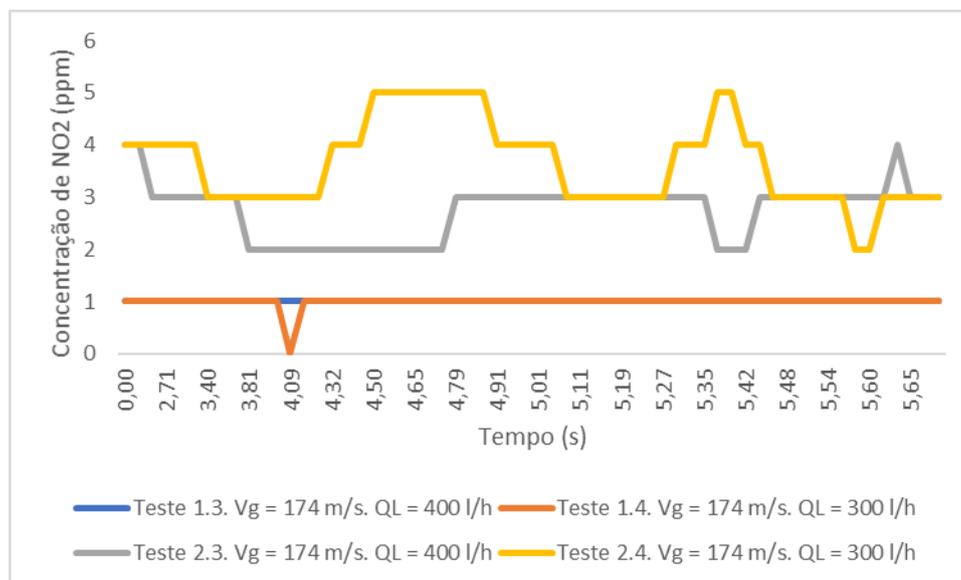
As emissões do NO₂, foram dispostas nas Figuras 34, 35, 36 e 37.

Figura 34. Perfil da emissão de NO₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



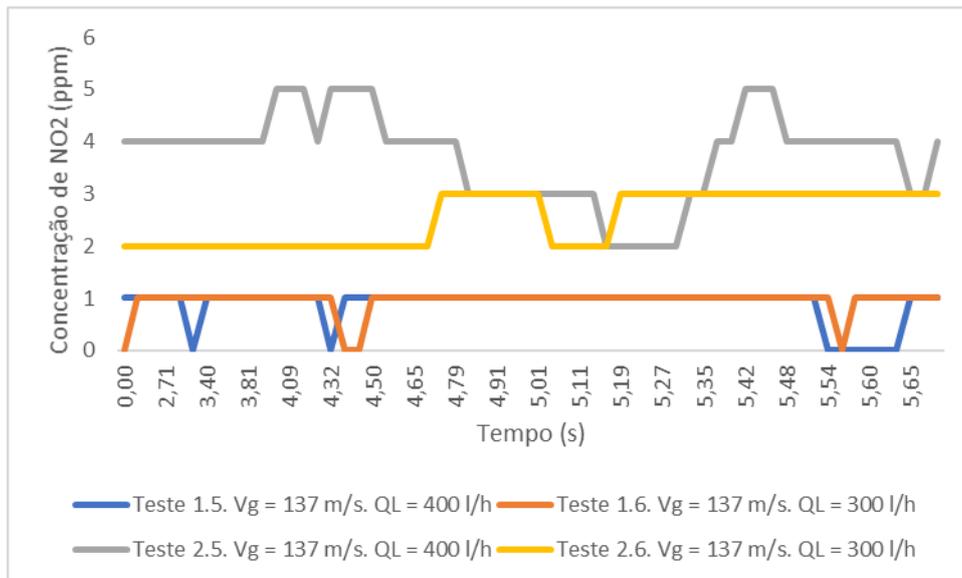
Fonte: Autoria própria.

Figura 35. Perfil da emissão de NO₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



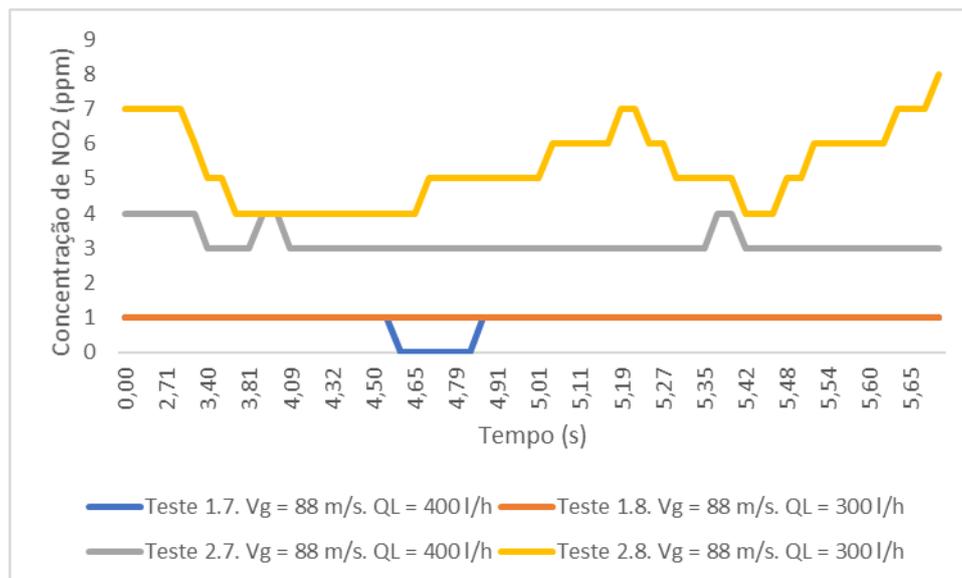
Fonte: Autoria própria.

Figura 36. Perfil da emissão de NO₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 37. Perfil da emissão de NO₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



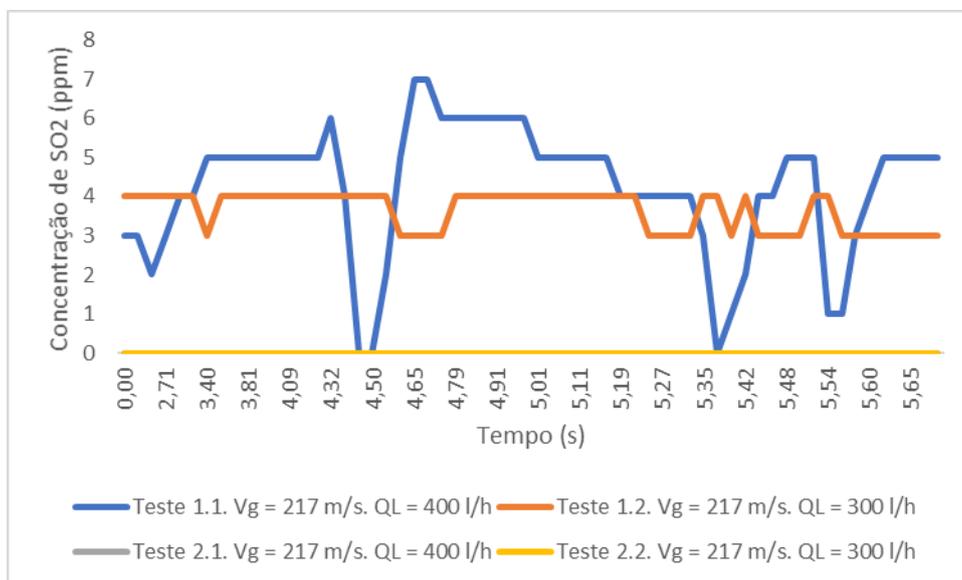
Fonte: Autoria própria.

Diferentemente do NO_x, as maiores emissões de NO₂, foram registradas na segunda bateria de testes, mostrando que nesses casos houve uma menor formação de NO.

Seguindo a tendência do NO_x, as maiores emissões de NO₂, ocorreram quando a vazão de água no lavador Venturi era a menor.

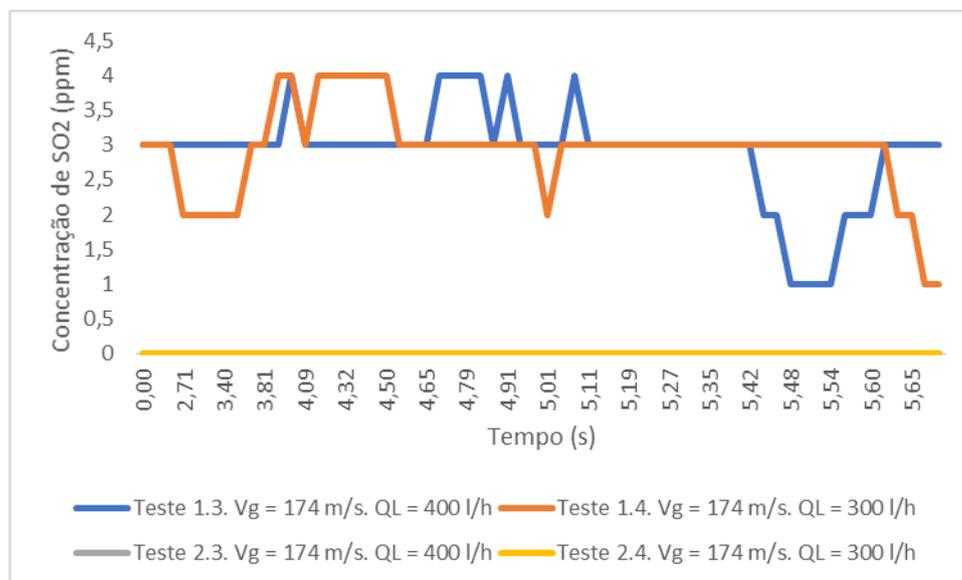
Por fim, as concentrações de SO₂ emitidas podem ser visualizadas nas Figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 38. Perfil da emissão de SO₂ para os testes com velocidade do gás de 217 m/s.



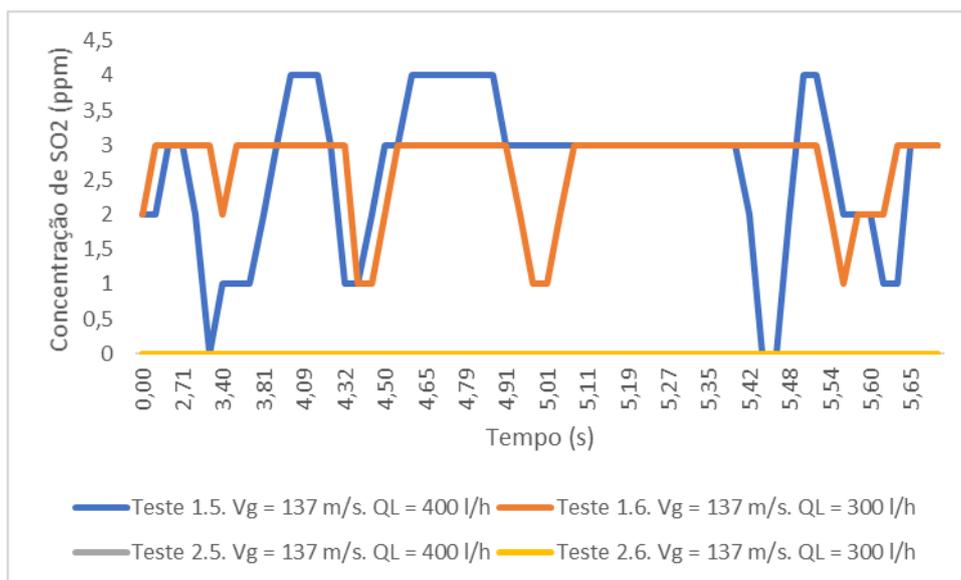
Fonte: Autoria própria.

Figura 39. Perfil da emissão de SO₂ para os testes com velocidade do gás de 174 m/s.



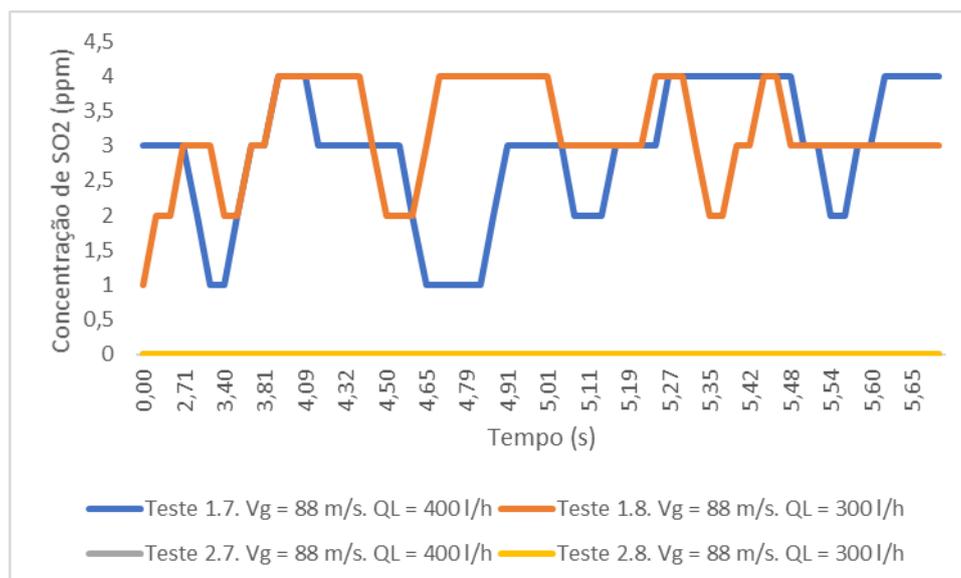
Fonte: Autoria própria.

Figura 40. Perfil da emissão de SO₂ para os testes com velocidade do gás de 137 m/s.



Fonte: Autoria própria.

Figura 41. Perfil da emissão de SO₂ para os testes com velocidade do gás de 88 m/s.



Fonte: Autoria própria.

No caso do dióxido de enxofre, a mudança na vazão de líquido no lavador do Venturi não produziu diferenças significativas na emissão desse poluente.

As médias de concentração, emitida cada poluente, foram resumidas, na Tabela 27 e 28.

Tabela 26. Concentração de poluentes, em ppm, média, ao longo do tempo, para a bateria 1.

| | CO | NO ₂ | NO _x | SO ₂ |
|---------------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Teste 1 | | | | |
| Vg = 217 m/s QL = 400 l/h | 81,26 | 1,07 | 22,72 | 4,23 |
| Teste 2 | | | | |
| Vg = 217 m/s QL = 300 l/h | 18,72 | 1,00 | 25,98 | 3,64 |
| Teste 3 | | | | |
| Vg = 174 m/s QL = 400 l/h | 35,72 | 1,00 | 23,23 | 2,90 |
| Teste 4 | | | | |
| Vg = 174 m/s QL = 300 l/h | 27,69 | 0,98 | 27,05 | 2,93 |
| Teste 5 | | | | |
| Vg = 134 m/s QL = 400 l/h | 49,16 | 0,87 | 24,31 | 2,66 |
| Teste 6 | | | | |
| Vg = 134 m/s QL = 300 l/h | 35,90 | 0,93 | 30,39 | 2,69 |
| Teste 7 | | | | |
| Vg = 88 m/s QL = 400 l/h | 41,05 | 0,90 | 39,92 | 2,92 |
| Teste 8 | | | | |
| Vg = 88 m/s. QL = 300 l/h | 65,70 | 1,00 | 66,23 | 3,16 |
| Total | 44,40 | 0,97 | 32,48 | 3,14 |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27. Concentração de poluentes, em ppm, média, ao longo do tempo, para a bateria 2.

| | CO | NO ₂ | NO _x | SO ₂ |
|---------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Teste 1 | | | | |
| Vg = 217 m/s QL = 400 l/h | 232,77 | 3,18 | 3,18 | 0,00 |
| Teste 2 | | | | |
| Vg = 217 m/s QL = 300 l/h | 236,08 | 3,15 | 3,15 | 0,00 |
| Teste 3 | | | | |
| Vg = 174 m/s QL = 400 l/h | 247,26 | 2,75 | 2,75 | 0,00 |
| Teste 4 | | | | |
| Vg = 174 m/s QL = 300 l/h | 265,90 | 3,66 | 3,66 | 0,00 |
| Teste 5 | | | | |
| Vg = 134 m/s QL = 400 l/h | 247,18 | 3,74 | 3,74 | 0,00 |
| Teste 6 | | | | |
| Vg = 134 m/s QL = 300 l/h | 256,44 | 2,54 | 2,54 | 0,00 |
| Teste 7 | | | | |
| Vg = 88 m/s QL = 400 l/h | 256,98 | 3,16 | 3,16 | 0,00 |
| Teste 8 | | | | |
| Vg = 88 m/s. QL = 300 l/h | 257,25 | 5,33 | 5,33 | 0,00 |
| Total | 249,98 | 3,44 | 3,44 | 0,00 |

Fonte: Autoria própria.

Analisando as Tabelas 27 e 28, nota-se que para a maior parte dos testes, o monóxido de carbono teve as menores emissões ocorrerem quando a vazão de água no lavador Venturi era de 300 l/h, e vazão de gás de 217 m/s, e o contrário ocorreu para os gases NO_x, NO₂ e SO₂, que tiveram suas menores emissões quando essa vazão era de 400 l/h, e vazão de gás de 88 m/s,

Comparando os resultados obtidos com outros estudos, com relação ao monóxido de carbono, que nesse estudo teve uma concentração média, de 44,40, para os primeiros testes, e de 249,98 ppm, para o segundo conjunto, esses números se aproximaram dos resultados do autor MARCONDES (2015), que, obteve uma concentração média de 200 ppm para esse gás durante seu experimento.

Em relação a queima de *Pinus sp*, com 25% de umidade, realizada por Campos *et al* (2017), que obteve uma concentração de mais de 388 ppm, para o CO, a queima de bagaço se mostrou positiva, uma vez que produz uma menor emissão desse poluente, mesmo em condições adversas, como as que ocorreram na segunda bateria de testes.

E por fim, o autor Skopec *et al* (2014), obteve valores de emissão de monóxido de carbono, para *pallets* de madeira e de palha, sendo que o primeiro, emitiu 165 ppm, dentro dos valores obtidos pelo bagaço, enquanto o segundo obteve uma emissão de 3381 ppm, muita acima da matéria prima proveniente da cana-de-açúcar.

As emissões de dióxido de carbono, ficaram entre 19 e 20%, acima da registrada por Zajac *et al* (2017), que obteve 13,73 e 10,7%, respectivamente, para os *pallets* de madeira e de Virginia *mallow*.

Com relação ao NO_x, MARCONDES (2015) obteve uma concentração, média, de 30 ppm, próxima a obtida por este estudo, para a primeira bateria de testes, que foi de 32,48 ppm.

Zajac *et al* (2017), registrou emissões de 256,39 e 328,18 ppm, respectivamente, para os *pallets* de madeira e de Virginia *mallow*, valores muito acima dos obtidos para o bagaço, mostrando que a matéria prima brasileira produz menos compostos nitrogenados do que os *pallets*.

A concentração máxima de SO₂ emitida, pela queima do bagaço, foi de 7 ppm, se equiparando a concentração de 8 ppm, obtida por MARCONDES (2015). No entanto, ambos os autores Skopec *et al* (2014) e Zajac *et al* (2017), obtiveram uma concentração menor que 1 ppm, quando queimaram *pallets*, de diversos tipos de madeira.

Com relação a legislação, devido a potência do queimador, de 0,36 MW, a legislação vigente para o estado de São Paulo exige, apenas, que o CO emitido pelo queimador tenha uma concentração máxima de 1700 ppm, porém as emissões realizadas por esse estudo se mantiveram abaixo desse limite, como mostra as Tabela 27 e 28.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizado se mostra de grande importância, por analisar as emissões gasosas provenientes de queima da biomassa mais importante do Brasil, de forma a acrescentar a literatura sobre o tema, com novos resultados e discussão, que possa servir como base para novos estudos e para fomentar o uso desse combustível em detrimento dos matérias-primas fósseis.

De acordo com os resultados obtidos e discutidos no item anterior, conclui-se que:

- Foram obtidos maiores concentração de emissão para o monóxido de carbono, em testes com uma temperatura de queima próxima de 130 °C, indicando que nessa faixa de temperatura ocorre a combustão incompleta do bagaço. **Seria o início do processo de queima do combustível.**
- As concentrações de NO_x e SO₂ resultantes da combustão da biomassa, se mantiveram em níveis próximos a outros experimentos realizados bagaço e outras biomassas.
- Os índices de emissão de dióxido de carbono do bagaço ficaram acima dos registrados para a queima de *pallets* de madeira.
- Os poluentes emitidos no processo de combustão da biomassa ficaram dentro do limite estabelecido pela lei no estado de São Paulo pelo CONAMA.
- O bagaço teve as concentrações de gases emitidas pela sua queima, quando há um lavador Venturi no queimador, foram próximas ou abaixo de outras matérias primas.
- Com uma vazão menor, o lavador Venturi é mais eficiente para diminuir a emissão de CO, e com uma vazão maior, ele diminui as emissões de NO_x, NO₂ e SO₂. Dessa forma a vazão de água escolhida, deve-se levar em conta essa relação.

7 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS ESTUDOS

Como parte da finalização desse trabalho, o autor sugere novas condições para futuros trabalhos usando o queimador.

- Comparar as emissões com o Lavador Venturi ligado e desligado, de forma a analisar a eficiência do equipamento
- Alterar o líquido de lavagem, como usar água com pH básico, de forma a absorver mais CO₂ do efluente
- Calcular a composição do bagaço antes de realizar a queima, já que a composição altera as emissões

8 REFERÊNCIAS

BRAGA, A. et al. **Atmospheric pollution**. J Bras Pneumol, v. 32, n. Supl 1, p. S5-S11, 2006.

CIESLINSKI, J. E. F. **Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014.

PHILIPPI JÚNIOR, A. **Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. In: **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. 2010. p. xviii, 842-xviii, 842.

MARCONDES, F. F. **Amostragem de poluentes gasosos e particulados finos emitidos pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar**. 2015.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. S.; **Uso da biomassa para a geração de energia**. 1 ed., Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, 2016.

BRAGATO, M. et al. **Combustion of coal, bagasse and blends there of - Part I: Emissions from batch combustion of fixed beds of fuels**. Fuel, São Paulo, n. 96, p.43-50, jan. 2012.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p.37-46, maio 2002.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN, M. **Pollutants from the combustion of solid biomass fuels**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 38, n. 2, p. 113-137, 2012.

DIAS, G. F. **Ecopercepção: um resumo didático dos desafios socioambientais**. São Paulo: Gaia, 2004.

DASHEFSKY, H. Steven. **Dicionário de educação ambiental: Um guia de A Z**. São Paulo: Gaia, 2001. 313 p.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and cofired**. Earthscan, 2008.

SIMONEIT, B. R. T. **Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion**. Appl. Geochem., v. 17, p.129-162, 2002

FERNANDES, A. P. S. **Emissão de PM_{2,5} e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FRANÇA, D. A. et al. **Pre-Harvest Sugarcane Burning: Determination of Emission Factors through Laboratory Measurements**. Atmosphere. 2012, 3, 164-180.

AMARAL, S. S. et al. **Emissões da queima do bagaço da cana-de-açúcar**. In: Congresso Internacional de Bioenergia, 8, 2013, São Paulo, 2013.

CARDOZO, E. et al. **Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications**. Fuel, Estocolmo, n. 115, p.778-787, ago. 2013.

KRUMAL, K., MIKUŠKA, P., HORÁK, J., HOPAN, F., & KRPEC, K. (2019). **Comparison of emissions of gaseous and particulate pollutants from the combustion of biomass and coal in modern and old-type boilers used for residential heating in the Czech Republic, Central Europe**. Chemosphere, 229, 51-59.

- MAXWELL, D., GUDKA, B. A., JONES, J. M., & WILLIAMS, A. (2020). **Emissions from the combustion of torrefied and raw biomass fuels in a domestic heating stove.** Fuel Processing Technology, 199, 106266.
- ROKNI, E., REN, X., PANAH, A., & LEVENDIS, Y. A. (2018). **Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels.** Fuel, 211, 363-374.
- CETESB; **Poluentes.** Disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em 12 abr. 2021.
- EPA. **Criteria Air Pollutants.** Disponível em <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>>. Acesso em 12 abr. 2021.
- MILLER, B. G. **Clean coal engineering technology.** Elsevier, 2017.
- FERREIRA, O. C. **Teor de Carbono em Combustíveis da Biomassa.** CNPQ, 2005.
- EPA. **Biomass.** Disponível em <<https://www3.epa.gov/carbon-footprint-calculator/tool/definitions/biomass.html>>. Acesso em 12 abr. 2021.
- DA SILVA, M. R. V., RAMOS, R. F., GILSON, I. K., MORELATO, R. R., RADUNZ, A. L., & DA COSTA CABRERA, L. (2020). **ENERGIA EÓLICA, SOLAR E DE BIOMASSA: USO, PERSPECTIVA E DESAFIOS.** Biodiversidade, 19(4).
- GROTTO, C. G. L., COSTA, A. M. F., COLARES, C. J. G., & PEREIRA, D. H. (2021). **Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas.** ForScience, 9(1), e00928-e00928.
- ENERGÉTICA, E. D. P. (2019). **Matriz Energética e Elétrica.**
- MOHAN D., PITTMAN C. U. JR., AND STEELE P. H. (2006) **“Pyrolysis of Wood/Biomass for Biooil: A Critical Review”** Energy & Fuels, 20, 848-889.
- FERREIRA, J. V. A. (2018). **Lavadores de gases nas indústrias: uma breve revisão sobre os impactos da sua utilização no controle da poluição atmosférica, atendimento a legislação ambiental e saúde humana.**

WERMAC. **The Major Types of Industrial Scrubbers**. Disponível em <http://www.wermac.org/equipment/scrubbers_part1.html>. Acesso em 16 abr. 2021.

GREGORI, R. (2020). **Avaliação da perda de carga em um lavador Venturi de seção circular**.

DUARTE, M., VICENTE, E., CALVO, A., NUNES, T., TARELHO, L., & ALVES, C (2014). **Gaseous and particulate emissions from the combustion of wood in a Portuguese stove**.

HAVARTIN, S. **O pacto ecológico europeu ou “green deal” é resposta mais concreta aos desafios climáticos e ambientais da atualidade: a vanguarda europeia sobre questões ambientais é realista e mostra a direção para o mundo**. **Mercantil ambiental**, 05 de jun. de 2020. Disponível em: <<https://noticias.ambientalmercantil.com/05/06/2020/o-pacto-ecologico-europeu-ou-green-deal-e-resposta-mais-concreta-aos-desafios-climaticos-e-ambientais-da-atualidade-a-vanguarda-europeia-sobre-questoes-ambientais-e-realista-e-monstra-a-direcao-p/>>. Acesso em 23 abr. 2021.

JULIÃO, A. **Aumento de CO2 na Amazônia pode ter impacto até maior que o do desmatamento na diminuição das chuvas**. Agência FAPESP, 23 de abr. de 2021. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/aumento-de-co2-na-amazonia-pode-ter-impacto-ate-maior-que-o-do-desmatamento-na-diminuicao-das-chuvas/35694/>> Acesso em 23 abr. 2021.

MATHIAS, F. R. D. C. (2019). **Gestão da energia, água e emissões em segmentos energo-intensivos da indústria brasileira**.

SEEG/IEMA. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos**. São Paulo: Sistema de Estimativa de Emissões de Gases (SEEG) / Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), 2018. p.2, 4, 17, 65-77. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2018/01/Emissoes-dos-Setores-de-Energia-e-Processos-Industrias-Documento-de-Analise-2018.pdf>> Acesso em 23 abr. 2021.

FANG, M., YI, N., DI, W., WANG, T., & WANG, Q. (2020). **Emission and control of flue gas pollutants in CO₂ chemical absorption system—a review.** International Journal of Greenhouse Gas Control, 93, 102904.

KHANI, M., HAGHSHENASFARD, M., ETESAMI, N., & TALAEI, M. R. (2021). **CO₂ Absorption Using Ferrofluids in a Venturi Scrubber with Uniform Magnetic Field of a Solenoid.** Journal of Molecular Liquids, 116078.

SAMADI, Z., HAGHSHENASFARD, M., & MOHEB, A. (2014). **CO₂ absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field.** Chemical Engineering & Technology, 37(3), 462-470.

PINEDA, I. T., CHOI, C. K., & KANG, Y. T. (2014). **CO₂ gas absorption by CH₃OH based nanofluids in an annular contactor at low rotational speeds.** International Journal of Greenhouse Gas Control, 23, 105-112.

ABBASPOUR, N., HAGHSHENASFARD, M., TALAEI, M. R., & AMINI, H. (2020). **Experimental investigation of using nanofluids in the gas absorption in a venturi scrubber equipped with a magnetic field.** Journal of Molecular Liquids, 303, 112689.

KHANI, M., HAGHSHENASFARD, M., ETESAMI, N., & TALAEI, M. R. (2021). **CO₂ Absorption Using Ferrofluids in a Venturi Scrubber with Uniform Magnetic Field of a Solenoid.** Journal of Molecular Liquids, 116078.

MACIEL, C. S. M., GURGEL, J. A. F., DE BRITTO CAVALCANTI, L. M., & DE SOUSA, M. N. A. (2019). **Poluição atmosférica: consequências para a saúde da população brasileira.** J Med Health Prom, 4(2), 1153-1159.

EPA. **Criteria Air Pollutants.** Disponível em < <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>>. Acesso em 12 abr. 2021.

EPA. **Overview of Greenhouse Gases.** Disponível em < <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#carbon-dioxide>>. Acesso em 27 abr. 2021.

EPA. **Ammonia.** Disponível em < <https://www.epa.gov/caddis-vol2/ammonia>>. Acesso em 27 abr. 2021.

UNICA. **BIOELETRICIDADE EM NÚMEROS – agosto/2020**. Disponível em: <<https://unica.com.br/wp-content/uploads/2020/08/BoletimUNICABioeletricidadeAGOSTO2020-1.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2021.

EXAME. **As enchentes na Europa e as consequências das mudanças climáticas**. Disponível em <<https://exame.com/mundo/as-enchentes-na-europa-e-as-consequencias-das-mudancas-climaticas/>>. Acesso em 22 jul. 2021.

COSTA, L. **Tempestades intensas podem se tornar até 14 vezes mais frequentes na Europa**. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/tempestades-intensas-podem-se-tornar-ate-14-vezes-mais-frequentes-na-europa/>>. Acesso em 22 jul. 2021.

FRANCO JACOME, D. L. (2018). **Avaliação das características físico-químicas das cinzas de bagaço e palha de cana-de-açúcar**.

LOPES SILVA, D. A. et al. **Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 532–547, 2014.

DA SILVA; M. B. (2020). **Avaliação de um lavador Venturi na coleta de material particulado fino emitido pela queima de biomassa**.

SABRINA, Bezerra. **ESG – O que essa sigla significa e por que ela é tão importante para as empresas?** . Startse 25 de mai. de 2021. Disponível em: <https://app.startse.com/artigos/esg-o-que-essa-sigla-significa-e-por-que-ela-e-tao-importante-para-as-empresas?utm_term=esg&utm_campaign=Search+%7C+app.startse.com+-+Maximizar+Cliques+-+Campanha+de+Conteudo+-+Artigo&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=5481106700&hsa_cam=12950075678&hsa_grp=122539647060&hsa_ad=518791641273&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-296622992559&hsa_kw=esg&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjwna2FBhDPARIsACAEc_Wqz34PSnnkn41pOnPNq7HrQ1xs3q1YitipELihL3ezHT7JVfajrxAaAuaeEALw_wcB> Acesso em 25 mai. 2021.

FERNANDES, J. L., & LINHARES, H. D. C. (2017). **ANÁLISE DO DESEMPENHO FINANCEIRO DE INVESTIMENTOS ESG NOS PAÍSES EMERGENTES E DESENVOLVIDOS (Financial Performance of ESG Investments in Developed and Emerging Markets)**. Available at SSRN 3091209.

CARVALHO, C. V. B. D., & SANTOS, Í. A. D. (2017). **O uso da biomassa como fonte energética.**

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F.; **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão. Campus, 2012.**

APRESENTAÇÃO, M. D. J. F. D. (2021). **Energia de biomassa como uma perspectiva para o problema energético e ambiental de São Tomé e Príncipe.**

KAZANC, F., KHATAMI, R., MANOEL CRNKOVIC, P., & LEVENDIS, Y. A. (2011). **Emissions of Nox and SO2 from Coals of Various Ranks, Bagasse, and Coal-Bagasse Blends Burning in O2/N2and O2/CO2 Environments.** Energy & Fuels, 25(7), 2850–2861.

ZAJAC, G., SZYSZLAK-BARGLOWICZ, J., SLOWIK, T., WASILEWSKI, J., & KURANC, A. (2017). **Emission characteristics of biomass combustion in a domestic heating boiler fed with wood and Virginia Mallow pellets.** Fresenius Environ. Bull, 26(7), 4663-4670.

CAMPOS, R. F. F. DE, ROSA, L. D., & BORGA, T. (2017). **Análise do processo de co-combustão da biomassa, através da influência da umidade do cavaco na emissão de contaminantes atmosféricos, eficiência energética e geração de cinzas (Analysis of the biomass co-combustion process, through the influence of ...).** Revista Brasileira de Geografia Física, 1471–1480.

SKOPEC, P., HRDLIČKA, J., & KAVÁLEK, M. (2014). **Specific emissions from biomass combustion.**

CNN. **Entenda os compromissos assumidos pelo Brasil na COP26.** Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/entenda-os-compromissos-assumidos-pelo-brasil-na-cop26/> >. Acesso em 04 dez. 2021.

JENKINS, Bryan M.; BAXTER, Larry L.; KOPPEJAN, Jaap. **Biomass combustion. Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power.** p. 49-83, 2019.