



RUTH MIKAELE DE LIMA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM
UMA FORNALHA DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ**

LAVRAS - MG

2022

RUTH MIKAELE DE LIMA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM UMA
FORNALHA DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof (a). Dr.(a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

Orientador (a)

LAVRAS-MG

2022

RUTH MIKAELE DE LIMA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM UMA
FORNALHA DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ**

**EVALUATION OF EMISSION OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS IN A COFFEE
ROAST FURNACE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 16 de setembro de 2022.

Prof (a). Dr.(a). Cristiane Alves Pereira UFLA

Prof (a). Dr.(a). Iara Hernandez Rodriguez UFLA

Prof (a). Dr.(a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

Orientador (a)

LAVRAS-MG

2022

RESUMO

Na indústria, o calor é a energia que move os processos, gerando várias transformações. Para a produção de café torrado, o calor gerado por fornalhas é usado nas etapas de secagem e torra do café, possibilitando transformações químicas, físicas e sensoriais. Cada vez mais as empresas buscam substituir combustíveis fósseis, usados na geração de calor, por alternativas renováveis, sendo uma delas o eucalipto, devido a absorção de CO₂ durante seu desenvolvimento e baixo custo de aquisição. Entretanto, ainda há impactos associados ao seu uso devido à emissão de poluentes durante a queima. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a relação das emissões de CO, NO_x e Material Particulado emitidos pelo sistema de geração de calor em uma fornalha usada para fornecer calor a torradores de café, propondo melhorias para redução das emissões destes poluentes, e avaliação dos impactos ambientais gerados. Com base nos resultados da análise dos efluentes gasosos do processo realizada em 2021, que apresentou emissão de poluentes dentro do especificado pela legislação, avaliou-se as emissões da segunda análise realizada no ano de 2022 (2022/02) e sua relação com os seguintes parâmetros: Alimentação ar, temperatura da fornalha, qualidade do combustível e vazão do sistema de coleta de Material Particulado. A hipótese levantada considera que o aumento da vazão de emissão do efluente sugere excesso de ar na câmara de combustão, o qual reduz a temperatura da fornalha, gerando menos NO_x, mais monóxido de carbono e Material Particulado, evidenciados pelos resultados da análise dos gases de exaustão de 2022/02. Como melhoria sugere-se o monitoramento das emissões dos poluentes (CO, NO_x e CO₂) nas chaminés, e de O₂ na saída dos gases da fornalha. Este controle possibilita ajustes operacionais e, à avaliação detalhada da relação entre os parâmetros de processo e suas reais influências na emissão de poluentes. Para avaliação do impacto ambiental do processo estudado, calculou-se o indicador de categoria Mudanças Climáticas (GWP) que apresentou valores de impacto entre 45.000 e 55.000 CO₂eq., em que o principal contribuinte é a emissão de CO₂, característica do processo de queima de eucalipto. A substituição deste combustível deve levar em consideração todo ciclo de vida dos combustíveis alternativos, como por exemplo o gás natural, que emite menos CO₂ durante a queima (0,32 mols CO₂/MJ gerado) se comparado ao eucalipto (1,7 mols CO₂/MJ gerado), porém, durante o processo de obtenção do gás natural há emissão de Gases de Efeito Estufa enquanto, o eucalipto em seu cultivo, consome CO₂ pela fotossíntese. Durante a realização deste trabalho, a ausência do monitoramento contínuo do processo e suas emissões, dificultou testar ajustes nos parâmetros que estão relacionados a geração de calor e, estimar o real impacto ambiental gerado pelo processo, tendo em vista que, os valores considerados são obtidos de forma esporádica. São necessários mais estudos após a implementação das melhorias propostas, visando estabelecer padrões que não comprometam o processo e gere menos impacto ambiental.

Palavras chaves: Emissão de poluentes. Impacto ambiental. Eficiência de combustão. Torradores de café.

ABSTRACT

In industry, heat is the energy used in processes generating various transformations. To produce roasted coffee, the heat generated by furnaces is used in the drying and roasting stages of the coffee, allowing chemical, physical and sensorial transformations. More and more companies seek to replace fossil fuels, used in heat generation, with renewable alternatives, one of which is eucalyptus, due to the absorption of CO₂ during its development and low acquisition cost. However, there are still impacts associated with its use due to the emission of pollutants during burning. Thus, the present work aimed to evaluate the correlation of CO, NO_x and Particulate Matter emissions by the heat generation system in a furnace used to provide heat to coffee roasters, proposing improvements to reduce emissions and assessment of the environmental impacts generated. Based on the results of the analysis of the gaseous effluents of the process of 2021, which presented emission of pollutants within the specified by the legislation, the emissions of the second analysis of the year of 2022 (2022/02) and its correlation with the following parameters: Air supply, furnace temperature, fuel quality and flow rate of the Particulate Material collection system. The hypothesis raised considers that the increase in the effluent emission flow suggests excess air in the combustion chamber, which reduces the temperature of the furnace, generating less NO_x, more carbon monoxide and particulate matter, evidenced by the results of the analysis of the gases of exhaustion of 2022/02. As an improvement, it is suggested to monitor the emissions of pollutants (CO, NO_x and CO₂) in the chimneys, and of O₂ in the output of the furnace gases. This control enables operational adjustments and a detailed assessment of the correlation between critical process points and their real influence on pollutant emissions. For environmental impact assessment, the Climate Change (GWP) category indicator was calculated which presented impact values between 45,000 and 55,000 CO₂eq., in which the main contributor is the CO₂ emission, characteristic of the eucalyptus burning process. The replacement of this fuel must consider the entire life cycle of alternative fuels, for example, natural gas emits less CO₂ (0.32 mol CO₂/MJ generated) during burning, but during its extraction, the emission of Greenhouse Gases is high compared to eucalyptus, which emits 1.7 mol CO₂/MJ generated. During this work, the absence of continuous monitoring of the process and the emission of the pollutants studied made it difficult to test adjustments in parameters that influence heat generation and to estimate the real environmental impact generated by the process, since the emissions considered are measured in a punctual way. More studies are needed after the implementation of the proposed improvements, aiming to establish standards that don't compromise the process and generate less environmental impact.

Keywords: Emission of pollutants. Environmental impact. Combustion efficiency. Coffee roasters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do grão de café.	4
Figura 2 - Estrutura celular da biomassa.	15
Figura 3 - Processo de combustão da biomassa.	16
Figura 4 - Princípio de funcionamento de ciclones.	20
Figura 5 - Ciclones em série e em paralelo.	21
Figura 6 - Fluxograma do processo.	28
Figura 7 - Esquema detalhado da fornalha.	29
Figura 8 - Área disponível para amostragem.....	31
Figura 9 - Distribuição dos pontos de amostragem para determinação de velocidade/vazão dos gases.....	31
Figura 10 - Analisador de gases teste.	32
Figura 11 - Fotografia do Coletor CIPA.....	33
Figura 12 - Gráfico das emissões de poluentes da Chaminé 1.....	38
Figura 13 - Gráfico das emissões de poluentes da Chaminé 2.....	39
Figura 14 - Gráfico das emissões de poluentes da Chaminé 3.....	40
Figura 15 - Indicador de GWP para cada análise realizada.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados de massa específica, densidade energética em função dos poderes caloríficos inferiores e superiores de diferentes espécies de eucaliptos.	9
Quadro 2 - Análise elementar de 3 amostras de eucalipto.	11
Quadro 3 - Relação entre poder calorífico e umidade de uma amostra de eucalipto.	12
Quadro 4 - Resultados da análise imediata do eucalipto.	13
Quadro 5 - Composição da cinza de eucalipto.	14
Quadro 6 - Distribuição granulométrica da amostra 3.	14
Quadro 7 - Substâncias que contribuem para cada categoria de impacto ambiental.....	23
Quadro 8 - Especificação para emissão de CO em processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.	25
Quadro 9 - Especificações para emissão de MP e NOx para processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.	25
Quadro 10 - Limites máximos de emissões atmosféricas para geradores de calor a partir da combustão de derivados de madeira.	26
Quadro 11 - Índices de deposição preditiva.	34
Quadro 12 - Fatores de caracterização para determinação do GWP.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição elementar teórica do eucalipto.....	36
Tabela 2 - Composição teórica do gás natural.....	37
Tabela 3 - Vazão das análises na Chaminé 1.....	38
Tabela 4 - Vazões obtidas nas análises na Chaminé 2.	39
Tabela 5 - Vazões obtidas nas análises na Chaminé 3.	40
Tabela 6 - Emissão de poluentes e parâmetros das Chaminés 1, 2 e 3.....	41
Tabela 7 - Somatório das vazões mássicas das emissões obtidas em cada análise.	45
Tabela 8 - Índices de deposição preditiva.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivos gerais	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	REFERENCIAL TEORICO	4
3.1	Torrefação do café	4
3.2	Fornalhas	5
3.2.1	Fornalha de leito fixo ou grelhas	6
3.3	Uso energético de biomassa	8
3.4	Caracterização do cavaco de eucalipto	8
3.4.1	Características físicas	9
3.4.2	Composição química	11
3.5	Combustão de biomassa	15
3.6	Emissões Gasosas	17
3.7	Ciclones	19
3.8	Avaliação do Impacto Ambiental	21
3.8.2	Regulamentação sobre emissões industriais	24
4	METODOLOGIA	27
4.1	Processo de torrefação de café	27
4.2	Amostragem das emissões	30
4.3	Avaliação do Impacto ambiental	33
4.3.1	Cálculo de indicadores de impacto	35
4.3.2	Comparação entre a queima de biomassa <i>versus</i> gás natural	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Avaliação das emissões	38
5.1.1	Qualidade do combustível	42
5.1.2	Alimentação de ar e temperatura da câmara de queima	43
5.1.3	Sistema de separação de particulado	44
5.2	Indicadores de impacto ambiental	45
5.3	Proposição de melhorias	47
5.3.1	Tecnologias para tratamento de poluentes	49
5.4	Comparação do impacto ambiental da biomassa <i>versus</i> gás natural	51

6	CONCLUSÃO	53
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Após a Revolução industrial, o uso desordenado de combustíveis fósseis como fonte de energia para geração de calor levou a consideráveis alterações ambientais que despertaram preocupações no sentido de controlar os impactos sobre meio ambiente, toxicidade e prováveis danos correspondentes à saúde (BRAGA, 2001). O primeiro desastre decorrente da poluição atmosférica ocorreu no Vale do Meuse, na Bélgica, em 1930, onde havia uma região com elevada concentração de indústrias de diferentes segmentos. Condições meteorológicas desfavoráveis impediram a dispersão dos poluentes, levando ao aumento imediato de doenças respiratórias que ocasionaram a morte de 60 pessoas. Em 1952, na cidade de Londres, a não dissipação dos poluentes tóxicos resultantes da queima de carvão gerou uma nuvem composta por material particulado e enxofre que causou a morte de quatro mil pessoas (HOGAN, 2007).

Além dos danos à saúde humana, o aumento da concentração de poluentes na atmosfera está diretamente ligado às mudanças climáticas. Por isso os órgãos governamentais buscam limitar as emissões desses poluentes em todo o mundo, sendo um assunto amplamente discutido. A Organização das Nações Unidas (ONU) elencou dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) metas de priorização do controle das emissões visando reduzir a poluição nos países até 2030. Dos 17 objetivos, dois deles trataram o tema profundamente: Ações Contra a Mudança Global do Clima e o Consumo e Produção Responsáveis.

Segundo o Observatório do Clima (2020), o Brasil representava 3,2 % das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o 5º maior emissor do mundo. Das emissões brasileiras, o dióxido de carbono (CO_2) lidera representando 65 %, seguido pelo metano (CH_4 , 26 %) e óxidos de nitrogênio (NO_x , 8 %). Ressalta-se que a geração de energia contribuiu com 18 % das emissões de monóxido de carbono (CO), equivalente a 394 Mega toneladas de monóxido de carbono equivalente ($\text{MtCO}_2\text{eq.}$) e as atividades industriais com 5 %, o que corresponde a 100 $\text{MtCO}_2\text{eq.}$ (SISTEMA DE ESTIVATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA, 2020).

Neste trabalho, destaca-se a geração de calor para o processo de torra de cafés. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Café (2021a), o Brasil, em 2021 foi considerado o segundo maior consumidor mundial de café, atrás apenas dos Estados Unidos. Mesmo com a crise causada pela pandemia, o setor cresceu 1,71 % em relação a 2020. Deste modo, as indústrias de cafés do Brasil passam por um processo de expansão, aumentando o número de torras e consequentemente a queima de combustíveis. A fim de suprir o crescimento do mercado

com responsabilidade ambiental, atualmente essas indústrias buscam por alternativas renováveis e sustentáveis para geração de calor.

Uma das alternativas é o uso da biomassa como combustível, objetivando a redução do consumo de combustíveis fósseis. Segundo Brasil (2020), o setor industrial consumiu para geração de energia e calor em 2019, 35,4 % de fontes não renováveis, 16,7 % de bagaço de cana, 13,8 % de lenha e carvão vegetal. O aumento do consumo de biomassa para geração de energia ao decorrer dos anos, caracteriza a busca das indústrias em substituir combustíveis fósseis por fontes renováveis. No Brasil, devido às características climáticas e de solo, essa substituição é viável, uma vez que é possível suprir esse mercado (SANTOS, 2017).

A lenha em forma de cavaco já é amplamente utilizada nas indústrias para gerar calor. A exploração de lenhas de matas nativas é considerada prejudicial visto que causam degradação do solo, alteração no regime de chuvas e possível desertificação. Para conter esses impactos, o consumo de lenhas de madeira de reflorestamento tem aumentado. Essa forma de cultivo é considerada limpa, visto que o eucalipto cultivado em larga escala de maneira controlada, não impacta na exploração das matas nativas e consome CO₂ (SANTOS, 2017).

A queima de biomassa, no entanto, ainda carrega consigo a geração de impactos ambientais. Em condições normais a queima deste combustível gera poluentes e, quando ocorre da maneira incorreta produz, em excesso, resíduos prejudiciais ao meio ambiente como CO, NO_x e Material Particulado (MP). A fim de controlar as concentrações desses poluentes na atmosfera, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) descreve limites para as emissões atmosféricas advindas de geradores de calor de fontes estacionárias na Resolução nº 382, 26 de dezembro de 2006.

Mesmo que a geração de calor seja muito importante industrialmente, como na produção de cafés torrados, é necessário produzir de forma consciente a fim de impactar minimamente o ambiente. Para isso, as indústrias buscam por fontes de energia renovável, entretanto essa substituição demanda cautela. Atualmente, existem alternativas para reduzir as emissões e consequentemente os impactos gerados, possibilitando entregar mais produto com menos desequilíbrio ambiental, propiciando ir além de somente adequação às legislações brasileiras.

Este trabalho visou avaliar as emissões atmosféricas um processo de torrefação de café que usa o calor gerado por uma fornalha, bem como entender e estimar os impactos ambientais gerados a fim de propor melhorias para a redução dos poluentes e o impacto ambiental do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar as emissões de uma fornalha com paredes refratárias e suporte em grelha que utiliza biomassa (cavaco de madeira de eucalipto puro) a granel como combustível, o qual é alimentado mecanicamente de forma contínua, para fornecer calor a torrefação de café.

2.2 Objetivos específicos

- Mapear os fatores que influenciam as emissões de CO, NO_x e Material Particulado;
- Calcular indicadores de impacto ambiental referentes ao processo, assim como avaliar o impacto ambiental causado;
- Propor melhorias para a redução da emissão dos poluentes CO, NO_x e Material Particulado;
- Comparar as emissões de uma fornalha que opera com biomassa e com gás natural como combustível.

3 REFERENCIAL TEORICO

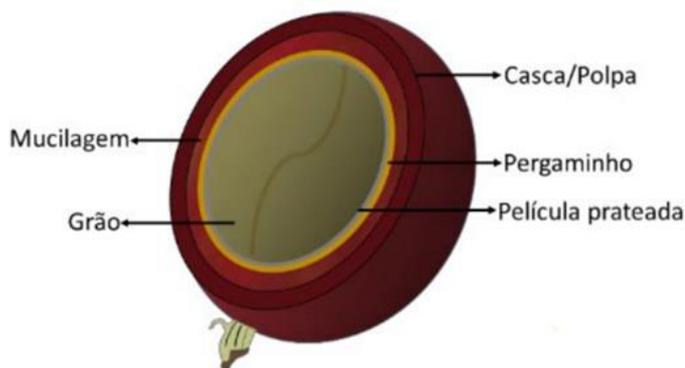
3.1 Torrefação do café

O café é nativo do continente africano, na região da Etiópia. Seu cultivo expandiu da Etiópia para a Arábia, Egito e Turquia. Nessa época sua principal aplicação era de cunho medicinal, somente na Pérsia o café foi definitivamente torrado e usado para fins alimentícios. No Brasil, o café chegou em 1727 na cidade de Belém-PA, e posteriormente foi levado a outros estados brasileiros (DE OLIVEIRA; OLIVEIRA; DE MO, 2012).

As condições climáticas brasileiras fizeram com que, segundo a ABIC (2021b), o Brasil se tornasse o maior produtor de café do mundo. Minas Gerais lidera em produção, produzindo cerca de 50 % do total nacional, seguido pelo Espírito Santo, São Paulo e Bahia.

Conforme ilustrado na Figura 1, o fruto do café apresenta a seguinte estrutura: casca (exocarpo), polpa ou mucilagem (mesocarpo), pergaminho (endocarpo), grão (endosperma) e película prateada (DURÁN *et al.*,2017).

Figura 1 - Estrutura do grão de café.



Fonte: Durán *et al.* (2017).

Após a colheita, o café passa por uma limpeza para retirar impurezas, como galhos e folhas, colhidos junto aos grãos. Limpo, o café é despulpado, isto é, ocorre a remoção da polpa ou mucilagem e, segue para o processo de pré-secagem, que acontece em terrenos, ou por meio de secadores. O café limpo e seco se encontra no estado ideal para o armazenamento e torrefação.

O gás quente entra nas câmaras dos torradores industriais, onde ocorre o processo de torra. Segundo Silva *et al.* (2021), é composto por três fases: secagem, pirólise e resfriamento.

Dentro da câmara de torra o café é aquecido por meio do calor para retirar a umidade presente no grão. Este processo baseia-se a absorção de energia para vaporização da água, isso ocorre até que a temperatura atinja aproximadamente 150 ° C.

De acordo com Estal (2021), após a fase de secagem, inicia-se a Reação de Maillard, que ocorre entre aminoácidos e açúcares redutores, dando origem a gases, como CO, CO₂, vapor d'água e compostos voláteis. A reação de caramelização acontece em temperaturas entre 170 e 200 °C, essa reação de redução envolve somente os açúcares, produzindo compostos caramelizados de cor marrom. Em cerca de 205 °C, a água vaporizada presente internamente no grão expande dando origem ao primeiro “crack” (ruptura do grão).

Por volta de 220 °C, começa a pirólise no café, uma reação exotérmica. Ela continuará até aproximadamente 230 °C, em que ocorre o segundo “crack”, indicando a ruptura da matriz celular. Nesse momento, o grão apresenta mais brilho devido à eliminação dos óleos aromáticos, indicando que o café alcançou os sabores desejados (ESTAL, 2021).

Para evitar a carbonização do grão, ocorre a etapa de resfriamento, no qual, cessa o fornecimento de gás quente e injeta-se água na câmara de torra para diminuir a temperatura e evitar a continuação da pirólise (GONZALEZ, 2004).

Durante as etapas de torra os grãos são agitados em busca da homogeneização, essa movimentação gera a liberação das películas de café que devem ser removidas antes gás ser emitido para atmosfera.

A energia necessária para o processo de torrefação, é de aproximadamente 237,64 KJ/mol, fornecidas pela queima de combustíveis realizada em fornalhas (WANG; LIM, 2013). O calor gerado é usado no processo de secagem e torra do café, variando de acordo com a curva de torra especificada para cada tipo de café (tradicional, extraforte, especial, entre outros). Além da geração de calor, a fornalha também é responsável por queimar efluentes gasosos derivados do processo de torra. Por esse motivo, a geração de calor é um processo essencial para a fabricação de cafés torrados.

3.2 Fornalhas

A maior parte dos processos industriais necessitam da elevação de temperatura para realizar a transformação de matéria-prima em produto de valor agregado. Fornalhas são equipamentos em que a queima do combustível transforma energia química em energia térmica, usada para fornecer elevadas temperaturas aos processos. De acordo com Bazzo (1995), os principais fatores que influenciam na eficiência de queima: tempo de permanência do

combustível na câmara, temperatura de operação, quantidade de ar, eficiência da mistura do ar com o combustível.

Fornalhas são constituídas por uma câmara de combustão, aparelho de queima, chaminés, sistema de alimentação de ar e de combustível e outros dispositivos auxiliares como dispositivos de controle e segurança, que objetivam manter as condições operacionais do equipamento, regulando pressão, temperatura, vazão de ar e combustível.

O sistema de alimentação de ar pode ser realizado de forma primária, secundária e terciária. O ar primário, normalmente injetado junto ao combustível é destinado à nebulização ou espalhamento dele. O ar secundário é lançado ao encontro da chama, diretamente na câmara, a fim de fornecer oxigênio para a combustão e o terciário é injetado objetivando manutenção e uniformidade da reação de combustão dentro da fornalha. A alimentação de combustível pode ocorrer de forma manual ou mecanizada a depender do tipo de combustível e capacidade da fornalha (BAZZO,1995).

Em um projeto da câmara de queima, seu dimensionamento, a disposição dos queimadores, as correntes gasosas e sua carga térmica, dependem diretamente do tipo de combustível usado para queima e sua preparação. Também devem ser considerados os parâmetros (pressão e temperatura) do vapor a ser produzido e a disponibilidade de capital (SILVA, 2016).

As fornalhas podem ser classificadas pelo tipo de combustível (sólido, líquido e gasoso), estado de divisão de combustível (granel, pulverizado e gaseificado), sistema de alimentação do combustível (manual, mecanizada e automatizada), tipo de construção da câmara de combustão (paredes refratárias e paredes d'água), sistema de queima (suspensão ou gelhas) e regime de suprimento de combustível (intermitente ou contínuo). A depender do tipo de combustível, são usadas fornalhas de leito fluidizado, de queima em suspensão e de grelhas (BAZZO, 1995 e SILVA 2016).

3.2.1 Fornalha de leito fixo ou grelhas

Fornalhas de grelha são equipamentos destinados ao atendimento de geração de vapor de médio a pequeno porte, visto que, para capacidades superiores, devido à praticidade e questões econômicas, são utilizados queimadores de leito fluidizado. Mesmo apresentando limitações, as fornalhas de leito fixo apresentam emissões com baixos teores de cinzas e se adaptam a vários tipos de combustíveis sólidos, como: lenha, resíduos industriais e bagaço de cana (RAYAPROLU, 2009 e BAZZO, 1995).

A alimentação de combustível em fornalhas com queima em grelhas pode ocorrer de duas maneiras: abaixo da grelha, de modo que o ar e o combustível são alimentados na parte inferior e as cinzas são removidas pelas laterais; e acima da grelha, com alimentação de combustível pela parte superior e ar pela parte inferior. Sendo que a utilização da última, tem sido menos empregada, visto que possui menores capacidades, além de exigir alta qualidade de combustíveis (RAYAPROLU, 2009).

O combustível pode ser alimentado de forma manual ou automática. A alimentação manual favorece a redução da eficiência do equipamento, devido à ocorrência de infiltrações de ar, implicando em variações de temperatura. O carregamento automatizado é mais eficiente por diversos fatores, entre eles: sistema de alimentação fechado, diminuindo a variação de temperatura dentro da fornalha por admissão de ar frio, alimentação baseada na temperatura da fornalha, ou seja, ocorre somente quando necessário, uma vez que a qualidade do combustível interfere diretamente na quantidade de carga e conseqüentemente na temperatura interna da fornalha etc. (BAZZO, 1995).

Segundo Pinto (2017), a área da grelha é dimensionada em função da taxa de carregamento, tipo de grelha, tipo de combustível, fluxo de ar, forma de alimentação de combustível e extração de cinzas. Existem diferentes modelos de grelhas, variando seu formato em função do tipo de combustível.

Conforme Bazzo (1995), fornalhas de grelhas podem ser classificadas em: fornalhas de grelha fixa ou estacionária e fornalhas de grelhas móveis. As grelhas fixas podem ser inclinadas ou horizontais. Sendo que, grelhas inclinadas são consideradas mais eficientes, devido a ação da gravidade na distribuição do combustível.

As grelhas móveis podem ser mecânicas ou rotativas. Grelhas mecânicas visam movimentar o combustível de acordo com o processo de combustão. Normalmente são sistemas complexos e de alto valor agregado, sendo indicados para combustíveis sólidos com alta umidade, como resíduos industriais e urbanos. A utilização de grelhas rotativas possibilita a remoção contínua de cinzas, eliminando o tempo de parada para limpeza. Além de que, através da regulagem da velocidade de deslocamento, é possível controlar a espessura da camada de combustível e, ao cessar o funcionamento da fornalha, é possível aumentar a velocidade de deslocamento da grelha, retirando o combustível com maior facilidade (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

3.3 Uso energético de biomassa

Há aproximadamente 100 anos, o aumento da utilização de petróleo e gás natural como fontes de energia fez com que o uso de biomassa, lenha, se restringisse ao uso domiciliar. O uso da lenha como combustível, por muito tempo, foi considerado um atraso econômico e tecnológico, servindo como indicador da civilização de uma nação. Entretanto, hoje, a consciência dos impactos gerados pelo uso desordenado dos combustíveis fósseis, como o aumento da temperatura média global em consequência do efeito estufa, fez com que o aproveitamento da biomassa seja associado a níveis elevados e sofisticados de produção (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

De acordo com Brasil (2020), as fontes renováveis correspondiam, no ano de 2019, a 23,2 % da matriz energética do mundo. No mesmo ano, 46 % da matriz energética do Brasil era proveniente de fontes renováveis, deste valor 27,6 % representavam a utilização de biomassa, sendo 8,9 % derivados de lenha e carvão vegetal.

A biomassa é toda matéria orgânica não fóssil de origem biológica que pode ser usada como fonte de energia (PARLAMENTO EUROPEU, 2001). Portanto, biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, vegetais lenhosos, resíduos orgânicos (resíduos agrícolas, urbanos e industriais) e de biofluidos através de óleos vegetais, por exemplo o óleo de mamona e soja (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

Dentre os tipos de biomassa cultivados no Brasil, o eucalipto é o que possui maior demanda industrial. Em 2019, aproximadamente 154 milhões de m³ de eucalipto foram consumidos pela indústria, justificando assim uma elevada área de plantio dessa árvore, que em 2020, representava cerca de 77 % dos 9 milhões de hectares destinados ao cultivo de madeira, aproximadamente 6,97 milhões de hectares, (INDUSTRIA BRASILEIRA DAS ÁRVORES, 2020).

3.4 Caracterização do cavaco de eucalipto

O uso do eucalipto como combustível na geração de calor industrial é atrativo pois, possui baixo custo e grande potencial energético. Embora seu uso seja associado à degradação do solo e desmatamento, seu rápido desenvolvimento infere em captura de dióxido carbono da atmosfera por meio da fotossíntese. Desse modo, pode-se considerar que, além de uma fonte de energia renovável, o processo de obtenção dessa madeira implica em vantagens políticas e ambientais (BORGES, 2015).

3.4.1 Características físicas

A avaliação do desempenho da madeira na geração de calor, depende das características físicas e químicas do material. A partir do conhecimento das propriedades de um combustível é possível prever as vantagens e desvantagens de seu uso na reação de combustão.

A massa específica é um parâmetro físico diretamente ligado à produção de energia. Madeiras com baixa densidade queimam mais rápido, pois apresentam menos massa em um mesmo volume. Todavia, densidades muito elevadas dificultam a fase inicial da combustão do material, visto que essa condição dificulta a propagação do fogo (VALE; BRASIL; LEÃO, 2002).

A densidade pode ser obtida de duas formas: a primeira, a massa específica convencional ou densidade básica (ρ), definida pela razão entre massa seca (em g) e volume saturado (V_s) expressa em cm^3 . E a segunda, a densidade energética (De), que expressa a quantidade de energia, obtida na reação de combustão, por unidade de volume do material. Seu resultado é calculado multiplicando a densidade básica da madeira pelo poder calorífico inferior médio (LIMA, 2020).

A massa específica ou densidade básica e a densidade energética podem variar de acordo com as espécies de eucalipto, e seus valores de poder calorífico inferior e superior conforme estudado por Jesus *et. al* (2017), apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Dados de massa específica, densidade energética em função dos poderes caloríficos inferiores e superiores de diferentes espécies de eucaliptos.

Espécie	Poder calorífico		ρ (g cm^{-3})	De (kcal m^{-3})
	superior (PCS) (kcal kg^{-1})	Inferior (PCI) (kcal kg^{-1})		
Híbrido entre <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden e <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4538	4234	0,374	1402
<i>Eucalyptus propinqua</i> H. Deane & Maiden	4623	4319	0,406	1553
<i>Eucalyptus robusta</i> Sm.	4669	3465	0,418	1617
<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell	4634	4330	0,466	1788
<i>Eucalyptus botryoides</i> Sm.	4620	4316	0,391	1495
CVexp (%)	1,13	1,21	6,87	6,80

Fonte: Jesus *et al.* (2017).

A granulometria é uma propriedade física que interfere diretamente na escolha da fornalha utilizada e no seu funcionamento da fornalha. A presença de cavacos maiores que o planejado pode gerar entupimento no sistema de alimentação, enquanto cavacos menores que o planejado, pode gerar variações de temperatura, pois sua queima seria mais rápida. Dessa forma, a distribuição granulométrica ideal é aquela na qual a maior parte da amostra possui o diâmetro dimensionado para o queimador.

Segundo Cortez, Gomes e Lara (2008), há três formas de determinar a distribuição granulométrica, sendo elas: método de microscopia eletrônica, método físico de sedimentação e análise de peneiras padronizadas.

O método de microscopia eletrônica utiliza da metodologia de contagem visual de partículas sólidas. Basicamente, conta-se o número de partículas de um determinado tamanho e, ao associar essas partículas a uma forma geométrica, determina-se seu volume. A determinação do diâmetro, é feita tomando como base uma esfera de mesmo volume que o da partícula (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

O método de sedimentação é usado para estudar a relação líquido-sólido em que, devido a ação de forças como a gravitacional ou centrífuga, as partículas vencem a resistência do líquido e se sedimentam. A distribuição de tamanhos é calculada com base no diâmetro da esfera que tem a mesma velocidade terminal que a partícula em regime de Stokes (CREMASCO, 2018).

A caracterização da granulometria das partículas usando as peneiras padronizadas, consiste na separação mecânica dos diferentes diâmetros apresentados na amostra. As peneiras são padronizadas em relação ao tamanho da abertura da malha, ou seja, há no final do peneiramento uma fração mássica x_i passante e uma fração x_f retida (CREMASCO, 2018).

A função de distribuição granulométrica do material particulado permite visualizar a forma que os tamanhos das partículas estão distribuídos ao longo da amostra, possibilitando determinar um diâmetro correspondente e o desvio padrão da média (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008). A distribuição cumulativa, pode ser descrita por modelos matemáticos. Dentre os modelos mais utilizados temos o de Gates, Gaudin e Schumann (GGS) e o modelo de Rosin, Rammler e Bennet (RRB). Deve-se considerar o modelo que obtenha o melhor ajuste matemático aos dados obtidos (CREMASCO, 2018).

3.4.2 Composição química

A determinação da composição química da biomassa é essencial para o processo de combustão. Segundo Jenkis (1990), a biomassa é um componente complexo que pode apresentar, em sua composição, diversos elementos, todavia seus principais constituintes são: carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, também pode ser encontrado enxofre em quantidades inferiores a 1 %. Por isso, sua fórmula química pode apresentar diferentes formas, em função dos compostos nela apresentados, por exemplo: $C_{x1}H_{x2}O_{x3}N_{x4}S_{x5}Cl_{x6}Si_{x7}K_{x8}Ca_{x9}Mg_{x10}Na_{x11}P_{x12}Fe_{x13}Al_{x14}$.

A composição elementar mensura as quantidades de cada componente no eucalipto, como, carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), entre outros. Com base no resultado dessa análise é possível calcular os volumes de ar e o poder calorífico (CORTEZ; GOMES; LARA,2008).

No Quadro 2 são apresentados valores da composição elementar da madeira obtidos em diferentes trabalhos acadêmicos.

Quadro 2 - Análise elementar de 3 amostras de eucalipto.

Análise Elementar	Eucalipto ¹	Eucalipto ²	Eucalipto ³
C (%)	46,81	46,01	49,00
H (%)	6,11	6,20	5,99
O (%)	46,76	46,94	44,36
N (%)	0,12	0,13	0,06
S (%)	<0,01	0,02	0,03

Fonte: Adaptada de ¹Borges (2015); ²Silva (2019); ³Jenkins (1990).

Após a caracterização elementar, o poder calorífico superior pode ser obtido através da Equação 1 (CHANNIWALA; PARIKH, 2002):

$$PCS = 0,3491 C + 1,1783 H + 0,1005 S - 0,01034 O - 0,0151 N - 0,0211 Cz \quad (1)$$

em que, PCS é o poder calorífico superior (MJ/kg), C é a quantidade de carbono (%), H é a quantidade de hidrogênio (%), O a quantidade de oxigênio (%), N a quantidade de nitrogênio (%), e Cz a quantidade de cinzas em (%), obtidos na caracterização elementar da amostra.

O poder calorífico representa a quantidade de energia liberada em forma de calor pela massa do combustível durante a combustão completa, apresentando como unidade KJ/kg. O valor pode variar de acordo com a composição elementar, grau de umidade e teor de carbono fixo e quantidade de cinzas da biomassa (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

Essa propriedade é definida como Poder Calorífico Superior (PCS), que representa a máxima quantidade de energia que um combustível pode liberar em forma de calor por unidade de massa seca; e Poder Calorífico Inferior (PCI), definido pela quantidade de calor liberada, considerando a quantidade de calor requerida durante a evaporação da umidade presente no combustível e gerada no processo de combustão. Portanto, a diferença entre PCS e PCI é o calor de vaporização de condensação da umidade do combustível (CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

A análise imediata é uma avaliação química que define o teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas da biomassa. A umidade é a quantidade de água presente na amostra, ela influencia diretamente na energia liberada na queima, visto que, haverá um gasto energético para evaporação dessa parcela. Garcia (2013), demonstra a variação do poder calorífico inferior em relação à umidade presente no eucalipto. Em que, quanto maior a umidade do combustível menor será o PCI (QUADRO 3).

Quadro 3 - Relação entre poder calorífico e umidade de uma amostra de eucalipto.

Umidade % massa	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
0	4756
10	4221
20	3687
30	3153
40	2619
50	2085
60	1551
68	1124

Fonte: Garcia, 2013.

Os voláteis indicam a facilidade de se queimar um material, sendo determinada pela fração mássica do combustível que volatiliza durante o aquecimento da amostra. Deste modo essa característica se relaciona diretamente com a ignição do material, contribuindo para a

estabilidade da chama e velocidade de combustão. O carbono fixo é o combustível após liberação dos voláteis. Elevados percentuais desse parâmetro proporciona maior geração de energia para a mesma carga vegetal, por outro lado, índices muito elevados causam degradação térmica reduzindo o rendimento do combustível (PAULUCIO, 2012). O Quadro 4, apresenta diferentes composições imediata do eucalipto conforme a literatura.

Quadro 4 - Resultados da análise imediata do eucalipto.

Análise Imediata	Eucalipto Seco¹	Eucalipto Seco²	Eucalipto Seco³
Teor de Voláteis (%)	83,23	82,01	81,42
Carbono Fixo (%)	16,42	17,28	17,82
Cinzas (%)	0,56	0,71	0,79

Fonte: Adaptada de ¹Borges (2015); ²Silva (2019); ³Jenkins (1990).

As cinzas são resíduos oriundos da combustão. Sua composição varia de acordo com a espécie da madeira, nutrientes disponíveis no solo, fertilizantes e condições climáticas, podendo apresentar elementos como magnésio (Mg), potássio (K), silício (Si), cálcio (Ca), fósforo (P) e sódio (Na), a depender do tipo e idade da madeira (SAIDUR *et al.*, 2011). Normalmente, a cinza, representa menos de 1 % em base seca de madeira, todavia, a grande quantidade de madeira usada para fins de processamento industrial gera uma fração significativa de cinzas (ASSIS *et al.*, 2012). Quantidade elevada de cinzas reduz o poder calorífico do combustível e, a depender de sua composição, pode provocar corrosão dos equipamentos (SANTOS, 2008; VIEIRA, 2012).

Além disso, de acordo com Garcia *at al.* (2015), o diâmetro das partículas de cinzas influencia na emissão de material particulado. Quanto maior o diâmetro das cinzas (maiores que 200 µm) maior a deposição, logo as cinzas podem ser removidas pelo fundo da câmara de combustão. Se a amostra de cinzas possui elevado teor de cinzas volantes, de diâmetro entre 0,2 e 200 µm, maior será a emissão de cinzas para a atmosfera.

Todas as características das cinzas, como sinterização, acidez, incrustação e tendência de deposição podem ser determinadas a partir de sua composição. O Quadro 5 apresenta a caracterização de cinzas reportada em diferentes estudos para amostras 1, 2 e 3 provenientes da queima de eucalipto. Em que, para a amostra 3, é possível conhecer os valores de sua distribuição granulométrica (QUADRO 6). O estudo realizado por Vaske (2012), apresenta valores da caracterização das cinzas e sua distribuição granulométrica. A amostra 3 considerada neste trabalho representa a análise de número 5 das 42 amostras analisadas em seu estudo. Ao

calcular a tendência de deposição para esses dados é possível relacionar a propensão de emissão de particulado com as características químicas das cinzas. Visto que utiliza-se a composição química para obter a tendência de deposição de cinzas, e quanto maior a tendência de deposição, menor será a emissão de material particulado.

Quadro 5 - Composição da cinza de eucalipto.

Composição (%m/m)	Amostra ¹	Amostra ²	Amostra ³
CaO	32,60	40,67	55,90
K ₂ O	7,00	7,74	3,84
SiO ₂	16,90	4,80	0,61
Cl	0,15	0,00	2,07
MnO ₂	0,39	0,00	0,00
MnO	0,00	1,19	3,13
P ₂ O ₅	3,70	4,50	2,12
Fe ₂ O ₃	0,800	1,00	0,98
MgO	7,20	8,44	2,06
SO ₃	4,4	0,00	1,24
Al ₂ O ₃	2,70	2,50	0,25
SrO	0,27	0,26	0,55
BaO	0,00	0,00	0,34
Na ₂ O	2,40	2,46	0,29
TiO ₂	0,00	0,10	0,00
ZnO	0,00	0,00	0,05
CuO	0,00	0,00	0,02
Br	0,00	0,00	0,01
Perda Fogo	21,50	26,28	26,53

Fonte: Adaptada de ¹ Borlini *et al.* (2005), ² Pinheiro, Vale e Roberti (2011) e ³ Vaske (2012).

Quadro 6 - Distribuição granulométrica da amostra 3.

Porcentagem (m/m)	Diâmetro Médio 3 (µm)
10%	0,00 - 6,64
40%	6,64 - 21,96
40%	21,96 - 52,77
10%	> 52,77

Fonte: Adaptada de Vaske (2012).

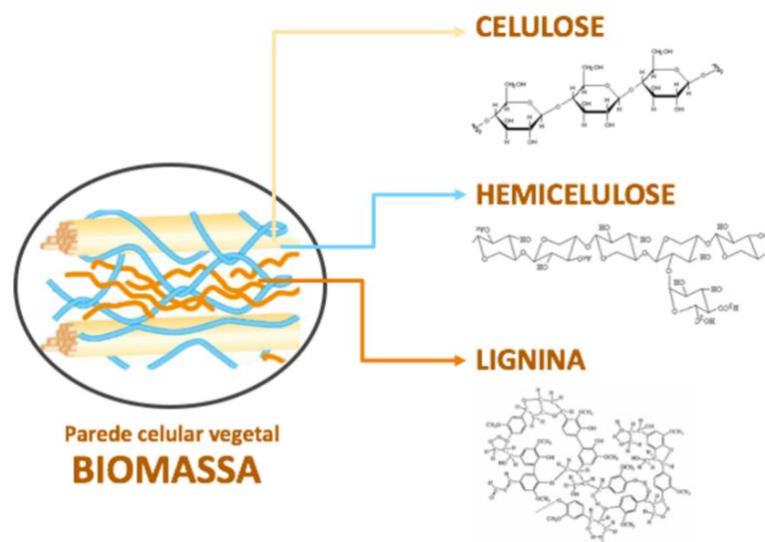
A partir da análise elementar percebe-se que o eucalipto é constituído basicamente por C, H e O. A combinação desses elementos gera celulose, hemicelulose e lignina, apresentados na Figura 2 (SANTOS, 2008). A celulose é considerada a estrutura base das células das plantas,

constituída por glicose anidra unidas em longas cadeias lineares, tornando-se um polímero orgânico. Por possuir tendência à formação de pontes de hidrogênio intra e intermoleculares, ela é insolúvel em grande parte dos solventes. Sua estrutura alterna entre regiões cristalinas e outras menos ordenadas (ROWEL, 2005).

As hemiceluloses são polissacarídeos de baixo peso molecular presentes na biomassa. Normalmente são polímeros formados por monossacarídeos de cinco átomos de carbono. Durante a combustão da biomassa, hemiceluloses são decompostas e transformadas em diferentes produtos com mais facilidade comparado as celuloses, devido à sua estrutura amorfa e ramificada, o que justifica sua baixa resistência à degradação térmica (MESA PÉREZ, 2004; FREDERICO, 2009).

A lignina é constituída por um arranjo complexo de unidades fenólicas. Possui alto peso molecular, elevado teor de carbono e é, mesmo com estrutura amorfa, resistente à degradação, devido à presença de estruturas aromáticas em sua composição. Portanto, dispõe de elevada estabilidade térmica (ROWEL, 2005; MESA PÉREZ, 2004; FREDERICO, 2009).

Figura 2 - Estrutura celular da biomassa.



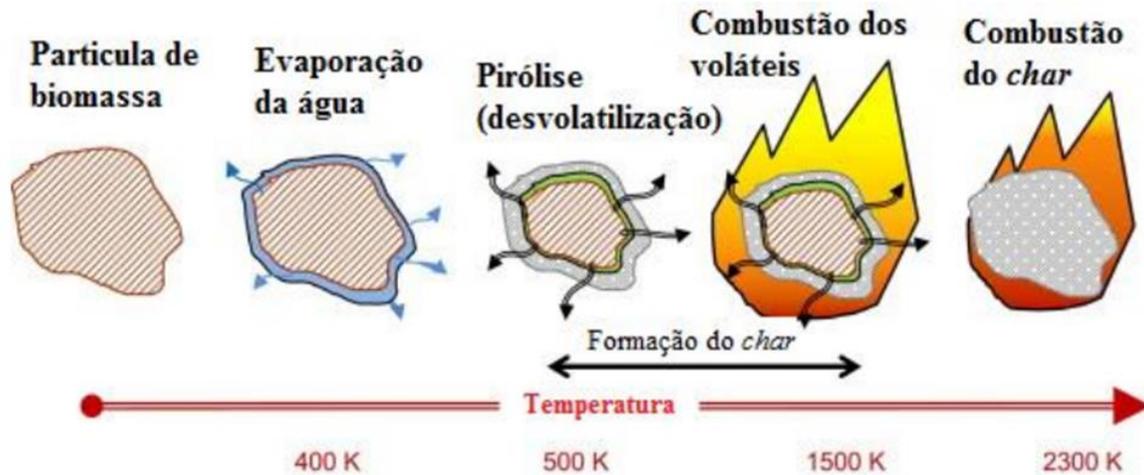
Fonte: Cunha (2020).

3.5 Combustão de biomassa

A combustão é a reação de oxidação de um combustível que libera calor entre outros produtos. Logo, são necessários a presença de um combustível, um comburente – normalmente o ar – e condições específicas de pressão, temperatura e composição da mistura.

A queima de combustíveis sólidos, como a biomassa acontece em 4 etapas, sendo elas: aquecimento ou secagem, pirólise ou devolatilização, combustão, combustão dos resíduos carbonosos (FIGURA 3).

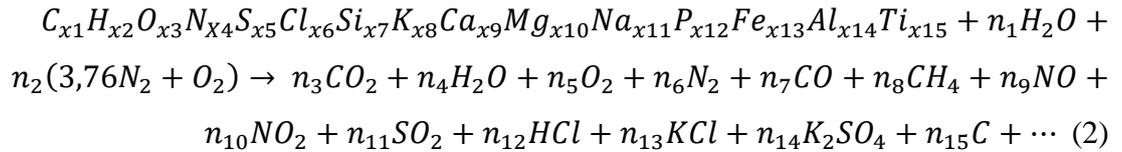
Figura 3 - Processo de combustão da biomassa.



Fonte: Silva, 2016.

A secagem é um processo endotérmico, em que a absorção de calor induz a vaporização da água, ao expandir, o vapor é conduzido para a superfície da biomassa. A quantidade de energia necessária para o processo de transferência de calor e massa depende da umidade, dimensões e outras propriedades do combustível. Deste modo, ao decorrer desta reação, a temperatura da fornalha diminui. Na etapa de devolatilização, ocorre o desprendimento dos voláteis presentes no combustível sólido, dependendo de vários fatores como: dimensões e velocidade de queima do cavaco de eucalipto, taxa de aquecimento e temperatura da câmara de combustão. A combustão dos gases voláteis pode ser considerada como a combustão gasosa de produtos como H_2O , CO_2 , CO , hidrocarbonetos leves, H_2 e hidrocarbonetos pesados, resultando em uma chama que sucede a decomposição térmica da biomassa. A combustão de resíduo carbonoso é uma reação exotérmica entre, majoritariamente, carbono e cinzas originando a combustão (SILVA, 2016).

Segundo Jenkins (1990), a equação que descreve esse processo de combustão é complexa, devido à composição da biomassa, como apresentado na Equação 2. O primeiro termo dos reagentes representa a biomassa, o segundo sua umidade e o terceiro o ar, em sua forma simplificada. Os produtos, por sua vez, variam de acordo com a composição da biomassa e do ar.



Quando a fração de ar fornecida contém a quantidade teórica de oxigênio para que ocorra a reação de combustão, define-se como combustão estequiométrica. Entretanto, o fornecimento real de ar acontece sempre em excesso, a fim de aumentar a eficiência da mistura do ar com o combustível, buscando uma combustão completa. O coeficiente de excesso de ar é a razão entre a quantidade real usada e a quantidade de ar teórica necessária para a combustão. O excesso de ar varia de acordo com o tipo de combustível e modelo do queimador, sendo que para combustíveis sólidos, em geral, utiliza-se de 15 a 30% de excesso de ar (GARCIA, 2013; CORTEZ; GOMES; LARA, 2008).

O excesso de ar elevado causa redução da temperatura do queimador, interferindo no retardamento da reação de combustão e, conseqüentemente, reduzindo sua eficiência.

No entanto, a redução do coeficiente de excesso de ar, ou seja, fornecer menos ar do que o necessário para a combustão estequiométrica, causa combustão incompleta, gerando a presença de monóxido de carbono (CO) óxidos de nitrogênio (NO_x) e fuligem nos gases emitidos (LOPES et.al, 2000 e VERGNHANINI, 2017).

3.6 Emissões Gasosas

Ao entender as características químicas do eucalipto e o processo de combustão desta biomassa usando ar como comburente, é possível prever as principais emissões atmosféricas provenientes do processo de combustão do cavaco. Consideram-se os principais poluentes atmosféricos advindos dessa reação, o material particulado, compostos nitrogenados, monóxido e dióxido de carbono e em pequenas quantidades os compostos sulfurados.

Por definição, Material Particulado (MP) pode ser fumaça, poeira, fuligem, cinzas e todo material sólido ou líquido que se encontram suspensos no ar. O impacto dessa emissão varia de acordo com as características químicas e físicas das partículas em suspensão. A dimensão e densidade interferem diretamente na capacidade de penetrar no sistema respiratório, enquanto sua composição, indica como esse particulado vai interagir com os órgãos (SALEMA, 2008).

Os materiais particulados respiráveis, que podem ser absorvidos pelos seres humanos através da respiração, possuem diâmetro médio menor que 10 µm e 2,5 µm sendo chamados de PM₁₀ e PM_{2,5} respectivamente. Essa fração, ao adentrar no sistema respiratório pode causar

desde irritação até inflamação pulmonar sistêmica, comprometendo o funcionamento dos alvéolos e brônquios pulmonares causando perdas respiratórias, podendo levar a morte do indivíduo (SANTOS, 2019).

A emissão de MP pode estar associada ao teor de cinzas e produção de carbono na reação de combustão incompleta. Em que a combustão incompleta normalmente se dá por alterações na temperatura da combustão, baixa eficiência da mistura ar/combustível, baixa velocidade de queima do combustível e zona de queima curta (SALEMA, 2008).

Segundo Schirmer (2009), compostos nitrogenados (NO_x) englobam o óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO_2) e o óxido nitroso (N_2O). O monóxido e dióxido de nitrogênio são formados na queima do combustível. O excesso de ar e umidade podem converter NO e NO_2 em HNO_3 (ácido nítrico), que contribui para a formação de ozônio e chuva ácida. Óxidos de nitrogênio com os compostos orgânicos voláteis, reagem sob radiação da luz solar, formando gases chamados de oxidantes fotoquímicos, caracterizado pela presença de ozônio e outros poluentes dando origem ao smog fotoquímico. Smog, é uma poluição local, caracterizado pela parcela de ar estagnado, composto pela mistura de ozônio, óxidos de nitrogênio, aerossóis ácidos etc. A presença abundante de ozônio no interior da atmosfera danifica a vegetação, implica em danos em materiais plásticos e causa irritação no sistema respiratório, podendo afetar a mucosa dos olhos e nariz e aumentar a reatividade brônquica (SANTOS, 2019; CHEEREMISINOFF, 2002).

A emissão de NO_x contribui não somente para poluição do ar, mas também para poluição de solo e água. Isso porque, a chuva ácida entra em contato com ambos os ambientes. Isso torna os impactos ambientais muito abrangentes, dificultando sua estimativa. Sabe-se que a chuva ácida pode impactar a população de insetos e espécies de plantas, além de favorecer a eutrofização das águas (CHEEREMISINOFF, 2002).

Ao final de toda combustão haverá a presença de dióxido de carbono e vapor d'água, além disso, caso a queima do combustível seja incompleta, por diferentes motivos, haverá também a presença de monóxido de carbono. O dióxido de carbono não é considerado tóxico à saúde humana, já o monóxido de carbono sim. Sua toxicidade se deve à facilidade de reação com a hemoglobina das hemácias do sangue formando carboxiemoglobina, impedindo a captação de oxigênio, o que impossibilita a troca do gás carbônico pelo oxigênio nos pulmões (GARCIA, 2013).

Ademais, o dióxido de carbono e o óxido nitroso são considerados os principais poluentes contribuintes do efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural que garante a estabilidade da temperatura média do planeta. Ao aumentar a concentração dos gases de efeito

estufa, devido às emissões atmosféricas de diferentes fontes, a energia que entra no planeta se torna maior que a energia que sai, esse desequilíbrio causa a elevação da temperatura terrestre (ONU, 2022b).

Entende-se, após a avaliação da composição elementar do eucalipto, que o enxofre se encontra em pequenas concentrações na composição desta biomassa. Mesmo que as emissões de MP, e CO sejam maiores, pode-se considerar que, ainda que em pequena quantidade, há emissões de compostos sulfurados ao queimar cavaco de eucalipto.

O processo de combustão gera a oxidação do enxofre podendo dar origem aos compostos SO₂. O dióxido de enxofre, segundo Salema (2008), causa irritação na mucosa dos olhos, garganta e do trato respiratório, causando tosse.

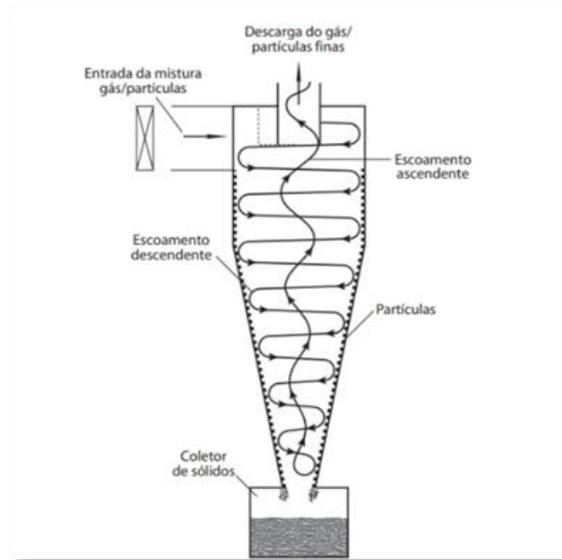
3.7 Ciclones

Ciclones são equipamentos que promovem a separação contínua de partículas em uma corrente gasosa, sendo uma das alternativas mais utilizadas para tratar correntes gasosas e evitar emissão de material particulado.

A corrente de gás entra tangencialmente no ciclone iniciando um movimento giratório com alta velocidade na seção compreendida entre a saída do gás e o corpo do ciclone. Esse movimento forma uma espiral descendente externa constituída pelas partículas maiores, que são lançadas contra a parede do equipamento em direção a saída inferior (*underflow*), podendo ser coletada no coletor de sólido. Em contrapartida, forma-se uma espiral ascendente interna, que carrega as partículas de menor diâmetro, que serão descarregadas axialmente pela saída localizada no topo do ciclone (*overflow*) (CREMASCO, 2018).

Na Figura 4, temos a esquematização dos fluxos ascendentes e descendentes gerados de acordo com a conformação do ciclone.

Figura 4 - Princípio de funcionamento de ciclones.



Fonte: Cremasco, 2018.

O dimensionamento do ciclone é fundamentado no diâmetro de corte. De acordo com Cremasco (2018), partículas com diâmetro superior ao de corte são coletadas no underflow, enquanto as partículas com diâmetro inferior ao de corte são arrastadas para o overflow. O diâmetro de corte pode ser especificado em termos da eficiência. A determinação do diâmetro de corte pode ser realizada através da Equação 3:

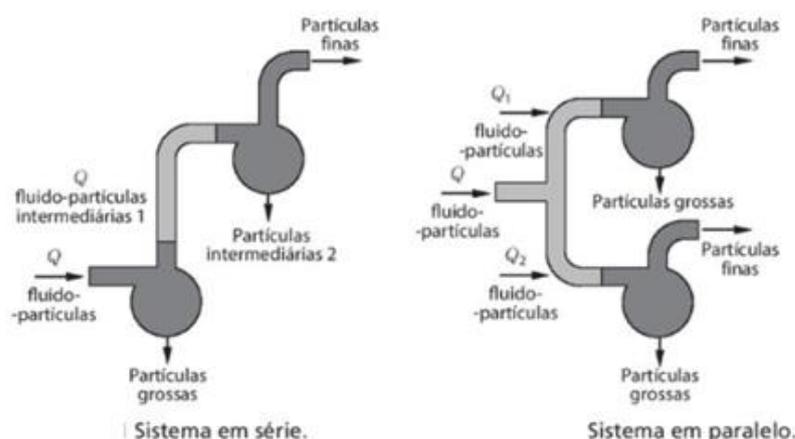
$$\frac{D^*}{D} = k \left[\frac{\mu D}{Q(\rho_p - \rho_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \alpha(R_L) \beta(C_V) \quad (3)$$

em que D é o diâmetro da parte cilíndrica, D^* é o diâmetro de corte das partículas, k o parâmetro que depende da família do ciclone, μ a viscosidade dinâmica do fluido, Q a vazão volumétrica do fluido, ρ_p a densidade das partículas, ρ_f a densidade do fluido, $\alpha(R_L)$ a razão entre as vazões no underflow e na alimentação e $\beta(C_V)$ o fator de correção de concentração. Sendo que, em ciclones que operam com suspensões diluídas e que possuem coleta de partículas intermitente, os termos $\alpha(R_L)$ e $\beta(C_V)$ são desprezados. Portanto, a eficiência de coleta em um ciclone depende das características geométricas, propriedades físicas do gás, propriedades das partículas e das suas condições de operação.

Uma bateria de ciclones pode ser disposta em série, se vários ciclones, operando na mesma vazão, são conectados de forma que o segundo estágio retire partículas finas resultantes do primeiro estágio, ou em paralelo, normalmente usados para correntes gasosas com taxas

elevadas de partículas, visto que a vazão de entrada é dividida em dois ou mais ciclones como visto na Figura 5 (CREMASCO, 2018).

Figura 5 - Ciclones em série e em paralelo.



Fonte: Cremasco, 2018.

3.8 Avaliação do Impacto Ambiental

Segundo Canter (1997), impactos ambientais são consequências causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetam a saúde, o meio ambiente, a segurança e o bem-estar da população. De acordo com o Garcia (2014), os impactos ambientais podem ser categorizados com relação a sua:

- Natureza: indicando se os efeitos são positivos ou negativos, em que efeitos positivos são ações que causam uma melhoria de um fator ambiental, enquanto negativos causam danos a esse fator.
- Forma: se o impacto é direto ou indireto, no qual impacto direto é resultante de uma simples causa e efeito, enquanto o impacto indireto é resultante de uma ação secundária.
- Duração: sendo manifesta de forma temporária ou permanente. A duração é relativa aos efeitos da ação, há ações que possuem efeitos temporários e ações que causam efeito permanente.
- Abrangência: podendo afetar de forma local, regional ou estratégica. Se o impacto for local a ação afeta somente um local e suas imediações, quando o impacto é regional, a ação afeta uma região que extrapola o sítio de origem e impactos

estratégicos ocorrem quando o segmento ambiental afetado apresenta interesse coletivo ou nacional.

- e) Temporalidade: no qual os impactos podem se manifestar de forma imediata, imediatamente após ação, de médio ou longo prazo, quando os impactos da ação são sentidos depois de um período (médio ou longo).
- f) Reversibilidade: refere-se à manifestação de seus efeitos, podendo ser reversíveis ou irreversíveis. Essa classificação permite identificar quais ações devem ser mitigadas e quais podem ser compensadas a depender do impacto causado.
- g) Cumulatividade: representa a soma dos impactos causados por diferentes empreendimentos em um mesmo sistema ambiental.
- h) Sinergia: é um fenômeno no qual o efeito resultante da combinação de dois impactos diferentes é maior do que a soma de seus efeitos individuais.
- i) Magnitude: refere-se ao grau de incidência de um impacto sobre o fator ambiental, sendo classificada como alta, média, baixa ou irrelevante.
- j) Importância: refere-se ao grau de significância do impacto para a sociedade, podendo se apresentar como: alta, média ou baixa, conforme os valores atribuídos pela sociedade ao fator impactado.
- k) Probabilidade de impacto está relacionada com a ocorrência da ação, se a ação for constante, a probabilidade será alta ou média, se a ação for intermitente, ela pode ser baixa ou improvável.
- l) Significância: é obtida por meio da combinação da magnitude, importância e probabilidade, sendo, não significativo, pouco significativo, significativo e muito significativo.

Segundo Godoy (2014), a estrutura básica dos métodos de avaliação de impacto ambiental é composta pela classificação, caracterização e avaliação de dados. A caracterização pode apresentar normalização e agrupamento de forma opcional, e a avaliação de dados pode conter a etapa de ponderação, sendo opcional. A classificação, é a etapa que define quais substâncias emitidas contribuem para quais categorias de impacto. Como visto no Quadro 7, que apresenta a classificação das categorias de impacto de acordo com Institution of chemical engineers (2002), em que a emissão de óxidos de nitrogênio contribui para as categorias de Mudanças Climáticas e de Eutrofização. Em que, cada categoria de impacto é expressa por meio de uma espécie de referência.

Quadro 7 – Substâncias que contribuem para cada categoria de impacto ambiental.

Categoria de Impacto Ambiental	Substâncias que contribuem para a categoria de impacto ambiental
Acidificação atmosférica	SO ₂ , Amônia, HCl, Hf, NO ₂ e misturas contendo H ₂ SO ₄ .
Mudanças climáticas	Dióxido de carbono, Monóxido de carbono, Tetracloroeto de carbono, Clorodifluorometano (R22), Clorofórmio, Cloropentafluoroetano (R115), Diclorodifluorometano (R12), Diclorotetrafluoroetano (R114), Difluoroetano, Hexafluoroetano, Metano, Cloreto de metileno, Óxido Nitroso, Óxidos de Nitrogênio (NOx), Pentafluoroetano (R125) Perfluorometano, Tetrafluoroetano, Tricloroetano (1,1,1), Triclorofluorometano (R11), Triclorotrifluoroetano (R113), Trifluoroetano (R143a) Trifluorometano (R23) e Compostos orgânicos voláteis.
Efeitos na saúde humana (cancerígenos)	Acrilamida, Acrilonitrila, Antimônio e compostos exceto estibina, como Sb, Arsênico e compostos exceto arsina, como As, Azodicarbonato, Benzeno, Berílio e Compostos, Éter bis (clorometil), Buta-1,3-dieno, Cádmio e Compostos, Fumo de óxido de cádmio, Dissulfeto de carbono, 1-Cloro-2,3-epoxipropano, Compostos de cromo (VI), Cobalto e Compostos, Pó de algodão, 1,2-dibromoetano, 1,2-dicloroetano, Diclorometan, 2-2'-dicloro-4,4'-metilenodianilina (MbOCA), Sulfato de dietil, Sulfato de dimetil, 2-Etoxietanol, Acetato de 2-etoxietil, Óxido de etileno, Formaldeído, Pó de grão, Pó de madeira, Hidrazina, Iodometano, Isocianatos, Anidrido maleico, Fibra mineral sintética, 2-Metoxietanol, Acetato de 2-metoxietil, 4 4-4'-metilenodianilina, Níquel e compostos inorgânicos, 2-Nitropropano, Anidrido ftálico, Bifenilos policlorados (PCB), Óxido de propileno, Fumo de borracha, Pó de processo de borracha, Sílica cristalina respirável, Pó de madeira macia, Estireno , o-Toluidina, Triglicidil isocianurato (TGIC), Anidrido de trimelita, Cloreto de vinilideno, Pó de processo de lã e Pó de madeira macia.
Depleção do ozônio estratosférico	CFC - 11, CFC - 12, CFC - 113, CFC - 114, CFC - 115, CFC - 13, CFC - 111, CFC - 112, CFC - 212, CFC - 213, CFC - 214, CFC - 215, CFC - 216, CFC - 217, halon-1211, halon-1301, halon-2402, Tetracloroeto de carbono 1.1, 1-tricloroetano, Brometo de metila, HCFC-21, HCFC-22, HCFC-31, HCFC-121, HCFC-122, HCFC-123 (3), HCFC-124 (3), HCFC-131, HCFC-132, HCFC-133, HCFC-141, HCFC-141b (3), HCFC-142, HCFC-142b (3), HCFC-151, HCFC-221, HCFC-222, HCFC-223, HCFC-224, HCFC-225, HCFC-225ca (3), HCFC-225cb (3), HCFC-226, HCFC-231, HCFC-232, HCFC-233, HCFC-234, HCFC-235, HCFC-241, HCFC-242, HCFC-243, HCFC-244, HCFC-251, HCFC-252, HCFC-253, HCFC-261, HCFC-262 e HCFC-271.
Formação fotoquímica de ozônio	Alcanos Metano, Etano, Propano, n-butano, i-butano, n-Pentano, i-Pentano, n-hexano, 2-Metilpentano, 3-Metilpentano, 2,2-Dimetilbutano, 2,3-Dimetilbutano, n-heptano, 2-Metilhexano, 3-Metilhexano, n-octano, 2-Metilheptano, n-Nonano, 2-Metiloctano, n-Decano, 2-Metilnonano, n-Undecano, n-Dodecano, Ciclohexano, Metil ciclohexano, Alcenos Etileno, Propileno, 1-Buteno, 2-Buteno, 2-Penteno, 1-Penteno, 2-Metilbut-1-eno, 3-Metilbut-1-eno, 2-Metilbut-2-eno, Butileno, Isopreno, Estireno, Alcinos Acetileno, Aromático Benzeno, Tolueno, l o- Xileno, m-xileno, p-Xileno, Etil benzeno, n-propilbenzeno, i-propilbenzeno, 1,2,3-Trimetilbenzeno, 1,2,4- Trimetilbenzeno, 1,3,5- Trimetilbenzeno, o-Etiltolueno, m-Etiltolueno, p-Etiltolueno, 3,5-Dimetiletilbenzeno, 3,5-Dietiltolueno, Aldeídos Formol, Acetaldeído, Propionaldeído, Butiraldeído, i-butiraldeído, Valeraldeído, Benzaldeído, Cetonas Acetona, Metiletilcetona, Metil-i-butilcetona, Ciclohexanona, Álcoois Álcool metílico, Álcool etílico, i-Propanol, n-butanol, i-butanol, s-butanol, t-butanol, Álcool diacetona, Ciclohexanol, Ésteres Acetato de metil, Acetato de etila, Acetato de n-propil, Acetato de i-propil, Acetato de n-butila, Acetato de s-butila, Ácido fórmico, Ácido acético, Ácido propiônico, Éteres Butilglicol, Éter metílico de propilenoglicol, Éter dimetílico, Éter metil-t-butílico, Halocarbonos Cloreto de metila, Cloreto de metileno, Metilclorofórmio, Tetracloroetileno, Tricloroetileno, Cloreto de vinil, 1,1-dicloroetileno, cis 1,2- Dicloroetileno, trans 1,2-Dicloroetileno, Óxido nítrico, Dióxido de nitrogênio, Dióxido de enxofre e Monóxido de carbono.
Acidificação das águas	Ácido sulfúrico, Ácido clorídrico, Fluoreto de hidrogênio e Ácido acético.
Eco toxicidade para a Vida Aquática	Arsênico, Cádmio, Cromo, Cobre, Ferro, Chumbo, Manganês, Mercúrio, Níquel, Vanádio e Zinco.
Eutrofização	Ácido acético, Acetona, Nitrato de amônio em solução, Sulfato de amônio em solução, Clorotrifluoroetano, 1,2 – Dicloroetano (EDC), Etileno, Etilenoglicol, Íon ferroso, Metanol, Metacrilato de metila, Cloreto de Metileno, Fenol e Cloreto de vinil.
Demanda do oxigênio aquático	Amônia, Nitrogênio, PO4 (III-), Fósforo, NO ₂ , NO e NOx.

Fonte: Adaptada de Institution of Chemical Engineers (2002).

A caracterização é a etapa que define a contribuição da substância para uma categoria de impacto expressa pelo fator de impacto, por exemplo, CO₂ é expresso através do fator de impacto de 1 KgCO₂eq., enquanto o metano é expresso pelo fator de impacto de 25 KgCO₂eq. na categoria Mudanças Climáticas, logo para essa categoria 1 kg de metano impacta o equivalente a 25 kg de dióxido de carbono. O resultado total por categoria é apresentado por

meio dos indicadores de categoria de impacto. Nessa etapa é possível realizar a normalização, que objetiva regular o resultado dos indicadores de acordo com alguma informação de referência, podendo auxiliar na comparação de resultados. E o agrupamento, em que os conjuntos de impactos são reunidos em uma base nominal, como regionais e locais, entradas e saídas entre outros (GODOY, 2014).

A avaliação dos dados combina as etapas anteriores de classificação e caracterização, reunindo as contribuições em uma categoria de impacto. A Ponderação é uma etapa opcional em que se atribui pesos às categorias de impacto para obter um valor de impacto geral. Esses pesos são realizados de acordo com a região e suas características (GODOY, 2014).

Mesmo que métodos para avaliação do impacto ambiental presente em grande parte, um valor subjetivo em relação ao real do impacto causado, pode-se considerar que, ainda sim, é possível apresentar resultados genéricos confiáveis (STEIN, 2018).

3.8.1 Regulamentação sobre emissões industriais

O Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA rege as diretrizes Federais, possuindo duas resoluções para emissões de poluentes atmosféricos. A Resolução nº 382, de dezembro de 2006 que estabelece limites de emissões máximas de poluentes atmosféricos válidos em todo país. E a Resolução 436, de dezembro de 2011 que estabelece limites de emissão para as indústrias instaladas ou que entraram com pedido de licença de instalação antes da publicação da Resolução nº 382.

O CONAMA estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos de acordo com o tipo de processo de geração de calor ou equipamento e o tipo de combustível. Para cada tipo de processo há limites estabelecidos de acordo com a Potência Térmica Nominal (P), que é calculada pela multiplicação do Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível e a quantidade máxima de combustível queimada por unidade de tempo.

Sabendo-se a Potência Térmica Nominal do processo e o tipo de combustível usado para queima é possível verificar os limites máximos de emissões para CO, NO_x e Material Particulado permitidos por legislação, como visto nos Quadros 9 e 9 respectivamente.

Quadro 8 - Especificação para emissão de CO em processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.

Potência Térmica Nominal (MW)	CO (mg/Nm ³)
Até 0,05	6500
Entre > 0,05 e = 0,15	3250
Entre > 0,15 e =1,0	1700
Entre > 1,0 e =10	1300

Fonte: CONAMA (2006).

Quadro 9 - Especificações para emissão de MP e NO_x para processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.

Potência Térmica Nominal (MW)	MP (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)
Menor que 10	730	N. A.
Entre 10 e 30	520	650
Entre 30 e 70	260	650
Maior que 70	130	650

Fonte: CONAMA (2006).

A legislação federal se sobrepõe às legislações estaduais. Os estados podem emitir decretos ou resoluções que estabelecem padrões de emissão de poluentes desde que sejam mais restritivos que a legislação federal. Logo, ao seguir a legislação estadual as emissões se adequam à legislação federal.

A legislação estadual de Minas Gerais é estabelecida pelo Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. A Deliberação Normativa de nº 187 de 19 de setembro de 2013 rege os limites máximos de emissão de gases poluentes atmosféricos no estado de Minas Gerais, considerando as diretrizes das resoluções do CONAMA citadas acima. Sendo assim, os limites atribuídos ao estado de Minas Gerais também são estabelecidos pelo tipo de combustível usado para geração de calor e a Potência Térmica Nominal (P).

O Quadro 10 apresenta os valores de limites máximos de emissões atmosféricas de Material Particulado (MP), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), sendo a soma das concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), e Monóxido de Carbono (CO) para processo de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira de acordo com o prazo para atendimento da normativa.

Quadro 10 - Limites máximos de emissões atmosféricas para geradores de calor a partir da combustão de derivados de madeira.

PRAZO PARA ATENDIMENTO	POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL (P)	CONDIÇÕES E LME (mg/Nm ³ , base seca, a 8% de O ₂)			
		MP	NO _x	CO	
Geradores de calor existentes (até 02.01.2007)	P = 0,5 MW	200	NA	7.800	
	0,5 MW < P = 2 MW	200	NA	3.900	
	2 MW < P = 10 MW	200	NA	3.250	
	MP (P = 70MW), LME de 200 mg/Nm ³ .	10 MW < P = 50,0 MW	200	650	NA
		P > 50 MW	200	650	NA
Geradores de calor instalados após 02.01.2007	P = 0,05 MW	200	NA	6.500	
	0,05 MW < P = 0,15 MW	200	NA	3.250	
	0,15 MW < P = 1,0 MW	200	NA	1.700	
	1,0 MW < P < 10,0 MW	200	NA	1.300	
	10 MW = P < 30 MW	200	650	NA	
	30 MW = P = 70 MW	200	650	NA	
	P > 70 MW	130	650	NA	

Fonte: COPAM (2013).

4 METODOLOGIA

4.1 Processo de torrefação de café

Este trabalho visou a redução de emissões dos poluentes gerados por uma fornalha usada para fornecer calor a um torrador de café. Na Figura 6 ilustra-se o processo de torrefação de café estudado.

A fornalha é alimentada por cavaco de madeira, eucalipto 100% e ar, de forma mecanizada e automatizada. Em seu topo localiza-se a Chaminé 1.

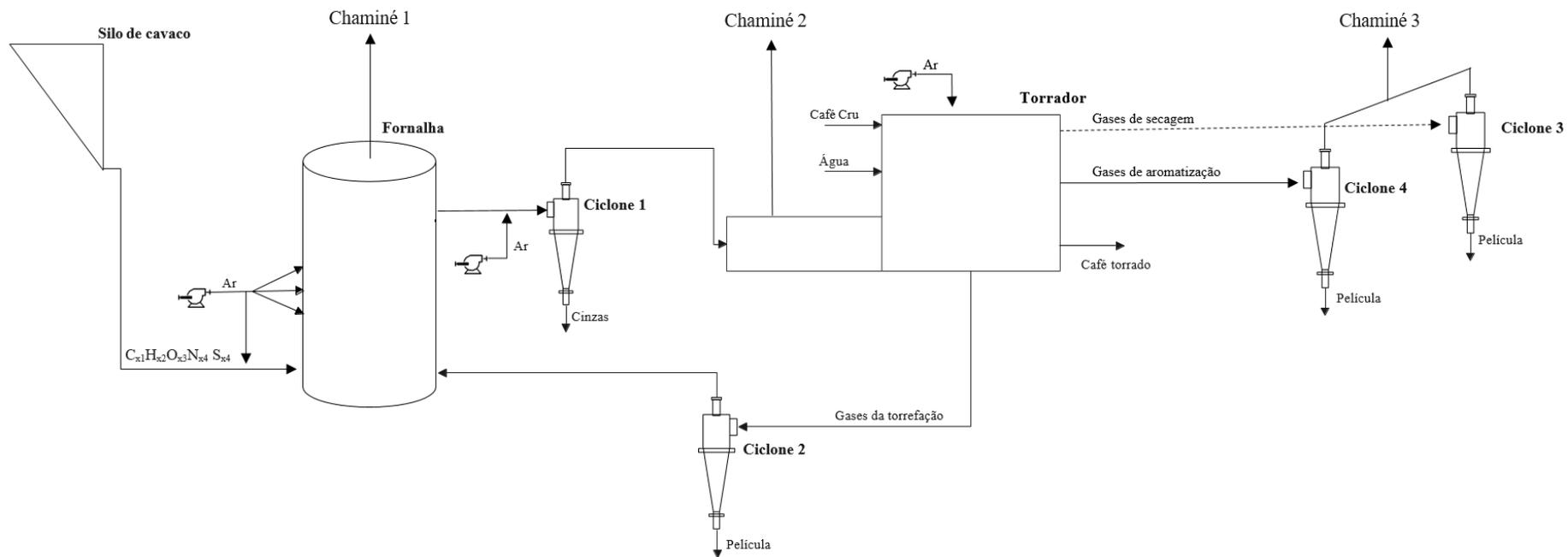
A exaustão de gás quente da fornalha é direcionada para um conjunto de ciclones, indicado como Ciclone 1 na Figura 6, este equipamento remove as cinzas geradas na fornalha durante a queima de cavaco. Para ajustar a temperatura do gás quente há uma entrada de ar ambiente na saída da fornalha, antes dele ser tratado pelo ciclone.

Além de reduzir as emissões de material particulado, a remoção das cinzas da corrente gasosa garante a qualidade do produto, visto que o gás quente entra em contato direto com o café. Assim, caso haja problemas na eficiência de separação dos ciclones, a fim de impedir o contato das cinzas com o café, um sistema automático baseado na temperatura do Ciclone 1, aciona o travamento do torrador até que o problema seja solucionado. Temperaturas baixas indicam entupimento e, elevadas temperaturas podem sugerir princípio de incêndio. Não há, no entanto, nenhum sistema de contenção de material particulado para as emissões da Chaminé 2 nessas ocorrências pontuais.

O ar quente livre de cinzas é direcionado à fornalha interna do torrador, que apresenta a Chaminé 2. Esse gás quente se equilibra com o ar ambiente dentro da câmara de secagem para atingir as temperaturas desejadas e retirar a umidade do grão cru e segue para o Ciclone 3, onde as películas são coletadas e o gás limpo é liberado para atmosfera através da Chaminé 3. Após a secagem, o café passa pelo processo de torra onde há menos injeção de ar ambiente para que temperaturas maiores sejam alcançadas. Os gases desse processo vão para o Ciclone 2, onde são coletadas as películas que saem do grão de café, o gás limpo é reciclado na fornalha objetivando a queima de CO e compostos aromáticos, liberados durante a torra, minimizando os impactos deles no meio ambiente.

Ao atingir os níveis desejados de temperatura da curva de torra, a entrada de ar quente é fechada e o café é aromatizado através da injeção de água tratada. Os efluentes gasosos desta terceira etapa são direcionados ao Ciclone 4 com objetivo de retirar as películas que possam restar no gás.

Figura 6 - Fluxograma do processo de torrefação de café.

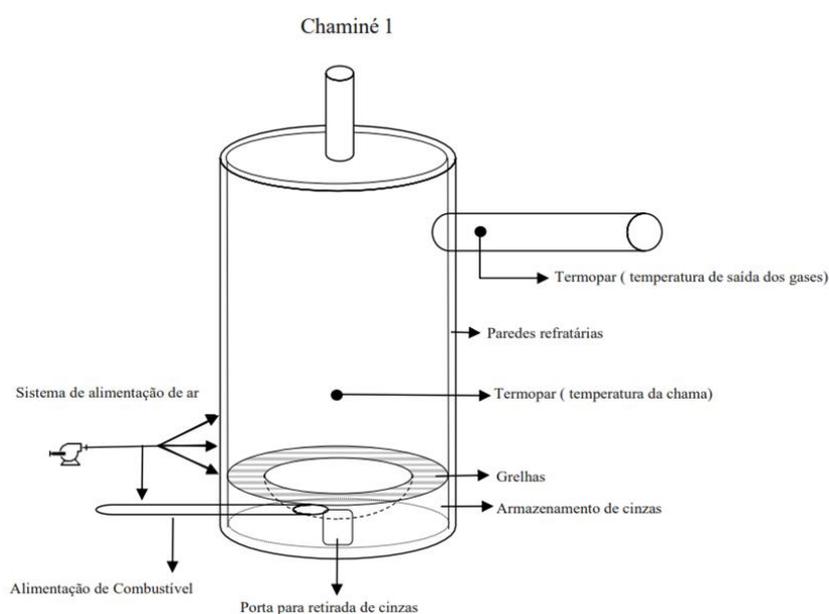


Fonte: Do autor (2022).

Todos os Ciclones, 1, 2, 3 e 4 contam com uma rosca sem fim para retirada de partículas, onde é injetado água para redução da temperatura das películas, antes que o particulado entre em contato com atmosfera no lançamento para caçambas. As mesmas, quando cheias são destinadas a uma empresa terceirizada que realiza o descarte adequado do material.

A fornalha usada no processo possui paredes refratárias, e conta com um sistema de alimentação de ar dividida em 4 pontos. Sendo uma entrada de ar com diâmetro contínuo e uma tubulação que se divide em três entradas de ar de diâmetros iguais, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema detalhado da fornalha.



Fonte: Do autor (2022).

Na fornalha (Figura 7), a alimentação de ar direcionada à entrada de combustível visa evitar o retorno de calor do sistema de alimentação de cavaco que poderia causar possíveis incêndios. As outras alimentações de ar, dispostas em três alturas diferentes, entram na câmara através de orifícios que objetivam distribuir de forma ciclônica o O_2 , contribuindo para uma combustão completa ao fornecer oxigênio para a chama e homogeneização para mistura ar/combustível.

Um sistema Proporcional Integral Derivativo (PID) controla de forma inferencial a vazão de ar automaticamente, baseado na temperatura de *set point* interna da fornalha e na velocidade da rosca de alimentação de cavaco. Todas as entradas de ar possuem um fechamento manual pois, caso ocorra falha no sistema automático, os operadores podem atuar até que o

sistema automático seja restabelecido. O dimensionamento da fornalha estudada baseou-se em uma equação de combustão de cavaco de eucalipto com 20 % de umidade e coeficiente de excesso de ar em 30 %, ou seja, a quantidade real de ar usada deve ser aproximadamente 30 % da quantidade estequiometria de ar necessária para queimar um cavaco com 20 % de umidade.

No topo da fornalha, como visto na Figura 7, existe uma chaminé de segurança que é acionada pneumaticamente quando há queda de energia e/ou aumento da pressão interna da fornalha evitando assim o risco de explosões.

A alimentação de cavaco ocorre por meio de roscas sem fim que são acionadas de acordo com a temperatura interna da fornalha, através de um controle PID. O cavaco alimentado entra em um recipiente apropriado, sendo alimentado por baixo da grelha. A grelha objetiva a passagem das cinzas da câmara de torra para o local destinado ao seu armazenamento, que posteriormente pode ser retirado através de portas acopladas na área externa da fornalha.

No centro da fornalha existe um termopar que mede a temperatura da chama e, na saída de gases também há um termopar que mensura a temperatura da saída dos gases. Essas temperaturas são usadas para controlar de forma operacional a alimentação de cavaco e de ar, além de serem alertas para possíveis problemas, como a necessidade de acionar as válvulas manuais de entrada de ar, ou aumentar a alimentação de cavaco devido à diminuição da temperatura interna da fornalha.

4.2 Amostragem das emissões

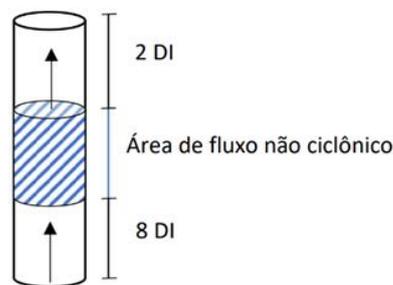
A análise dos efluentes gasosos do processo é realizada de forma anual, entretanto, quando há alterações relacionadas ao lançamento de poluentes com limites estabelecidos pela legislação (material particulado e óxidos de nitrogênio) é solicitada uma nova medição das três chaminés, independentemente de onde a variação tenha ocorrido. Todos os dados foram obtidos em triplicata. A coleta, avaliação das amostras e emissão do laudo técnico são realizados por uma empresa terceirizada que atende os requisitos apresentados pela NBR ISSO/IEC 17025.

Antes da realização das medições propriamente ditas, os pontos de amostragem devem ser avaliados. Esse processo é importante para minimizar o erro de medição relacionado ao fluxo ciclônico que pode estar presente ao longo da chaminé. A área ideal para coleta dos dados é definida de acordo com a Norma Técnica L9.221 (CETESB, 1990), que determina os pontos de amostragem na seção transversal de duto ou chaminé de fonte estacionária.

No presente trabalho, os dados foram coletados em triplicata, em que cada análise durou aproximadamente 60 minutos, nas Chaminés 1, 2 e 3, todas de seção transversal circular, de diâmetro interno maior que 0,6 cm com fluxo de gás conhecido.

Os pontos de coleta foram estabelecidos tomando como base a Norma Técnica Vigente L9.221 (CETESB,1990, p. 2), seguindo, portanto, os padrões de amostragem como especificado na Figura 8, sendo a área apta para realização da análise a 2 Diâmetros Internos (DI) do topo da chaminé e a 8 DI da entrada ou local de alteração de direção de fluxo. Isso é definido para que a análise não sofra interferências do fluxo ciclônico.

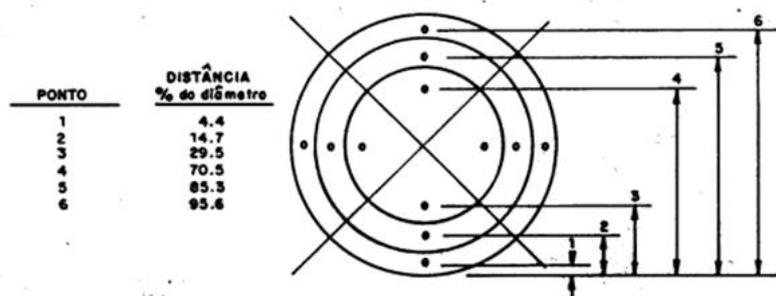
Figura 8 - Área disponível para amostragem das análises realizadas.



Fonte: Do autor (2022).

Para análise de emissão de material particulado, a avaliação da vazão deve ser realizada em condições específicas na área de amostragem, como, a necessidade de avaliação de 12 pontos, a depender do diâmetro interno da seção avaliada, em que, nenhum ponto deve distar menos que 2,5 cm da parede, sendo eles distribuídos perpendicularmente um do outro como ilustrado na Figura 9 (CETESB, 1990, p. 3).

Figura 9 - Distribuição dos pontos de amostragem para determinação de velocidade/vazão dos gases.



Fonte: CETESB (1990).

Equipamentos como Analisador de Gases Testo, Tubo de Pitot tipo “S” junto ao Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA) que são usados na avaliação, devem ser calibrados de acordo com a Norma Técnica Vigente E16.030 (CETESB,2005) por um laboratório acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, qualidade e Tecnologia - INMETRO.

A aferição das concentrações de NO_x , N_2 , H_2 , CO , CO_2 e O_2 como orientado pelo US EPA (1997), são realizadas pelo Analisador de Gases Testo, apresentado na Figura 10. Em que NO_x é o somatório de NO e NO_2 . O equipamento conta com uma sonda que é responsável por levar o gás da chaminé até os sensores que determinam as concentrações dos compostos resultantes da combustão.

Figura 10 - Analisador de gases Testo.



Fonte: Walleser (2011).

A medição de umidade segue o ensaio definido pela Norma Técnica Vigente L9.224 (CETESB,1993), que consiste em medir a umidade contida na amostra, condensando a parcela condensável e absorvendo, em sílica-gel, o não condensável. Para o método de referência, todas aparelhagens necessárias compõem o CIPA, mostrado na Figura 11, que é o equipamento usado em campo para aferição de umidade.

Figura 11 - Fotografia do Coletor CIPA.



Fonte: Dias (2013).

A determinação do material particulado é descrita pela Norma Técnica Vigente L9.225 (CETESB,1995), que descreve essa análise para fluxos gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias. A primeira observação da norma é a necessidade da amostragem isocinética. Tal técnica objetiva coletar uma amostra do material particulado em suspensão de uma corrente gasosa sem a necessidade de separação mecânica, isso ocorre quando a amostra é coletada na mesma velocidade de saída dos efluentes do processo de queima. A aparelhagem necessária para coleta desta amostra também condiz com as aparelhagens do CIPA, logo este equipamento também é usado para coleta de material particulado. A amostra coletada em campo é levada ao laboratório para mensuração de sua massa total.

A determinação da velocidade e vazão do gás foi feita através do tubo de Pitot tipo “S” (componente do CIPA), de acordo com Norma Técnica L9.222 (CETESB, 1992, p.3). A determinação da massa molecular seca e do excesso de Ar requeridas neste processo é realizada seguindo as orientações definidas pela Norma Técnica L9.223 (CETESB, 1992b).

4.3 Avaliação do Impacto ambiental

O processo estudado, possui emissões conhecidas de NO_x , CO, CO_2 e MP. O impacto ambiental gerado pelas emissões de NO_x , CO e CO_2 , foram quantificadas a partir do cálculo do potencial de impacto ambiental. Já para MP não foi possível calcular o indicador de categoria Formação de Material Particulado, que possui como base a unidade PM_{10} eq., visto que, para estimar seu valor é necessário o conhecimento da granulometria das partículas emitidas (PM_{10}

e $PM_{2,5}$), todavia esse dado não é conhecido para o processo estudado. A emissão de Material particulado nas Chaminés 1 e 2 está associada à emissão de cinzas e carbono provenientes da combustão de biomassa. Já para a Chaminé 3, a emissão de Material Particulado se dá pelas partículas de película do café, retiradas nas etapas de secagem e aromatização.

De acordo com Garcia *et al.* (2015) é possível estimar pela caracterização das cinzas, os índices de deposição. A sinterização possibilita a aglutinação de minérios por aquecimento a temperaturas altas, mas inferiores ao ponto de fusão, gerando diâmetro de partículas maiores, que se depositam no fundo na câmara e não são lançadas à atmosfera. Todavia, as cinzas depositadas podem incrustar e se apresentarem elevada acidez, corroem o equipamento.

A deposição das cinzas e suas consequências são indicadas pelo índice de temperatura de fusão (IF), parâmetro de sinterização (I), índice de incrustação (F_u) e razão ácido base ($R_{b/a}$) e podem ser obtidos através das Equações 4, 5, 6 e 7 indicadas no Quadro 11.

Quadro 11 - Índices de deposição preditiva.

Índice	Fórmula e critério de deposição
Razão ácido base	$R_{b/a} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O + P_2O_5}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} \quad (4)$ <p>Baixo: <0,5 Médio: 0,5-1,0 Alto: > 1,0</p>
Índice de incrustação	$F_u = R_{b/a} (K_2O + Na_2O) \quad (5)$ <p>Baixo: <0,6 Médio: 0,6-2,0 Alto: > 2,0</p>
Parâmetro de Sinterização	$I = \frac{CaO + MgO}{K_2O + Na_2O} \quad (6)$ <p>Não sinteriza: $I > 2$</p>
Índice de temperatura	$IF = \frac{SiO_2 + K_2O + P_2O_5}{CaO + MgO} \quad (7)$

A tendência a deposição preditiva aumenta com o valor de IF

Fonte: Adaptada de Garcia et. al. (2015).

Após a avaliação dos impactos causados pelos estressores citados, é possível comparar o impacto ambiental causado pela queima de combustíveis como o eucalipto, de fonte renovável e o gás natural, de fonte não renovável derivado de petróleo.

4.3.1 Cálculo de indicadores de impacto

No presente trabalho avaliaram-se as emissões atmosféricas oriundas da geração de calor para o processo de torra de café objetivando estimar o Potencial de Impacto Ambiental (PEI) gerado pela fonte poluidora. Este pode ser calculado através da Equação 8.

$$PEI_j = \sum_i \dot{m}_i \Psi_{ij} \quad (8)$$

no qual \dot{m} é a vazão mássica dos estressores e Ψ é o fator de caracterização apropriado.

A emissão de NO_x contribui para a categoria de Acidificação, expressa em kg de dióxido de enxofre equivalente, com fator de caracterização igual a 0,7. Considerando as chuvas ácidas e o seu impacto, a emissão de óxidos de nitrogênio possui uma parcela de contribuição na categoria Eutrofização de impacto ambiental das águas, expresso em fosfato equivalente, em que o fator de impacto do NO_x é de 0,13 (INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS, 2002).

As substâncias emitidas (CO , CO_2 e NO_x) possuem contribuição considerável na categoria de impacto ambiental de Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*), expressa em kg de dióxido de carbono equivalente (kg CO_2 eq.), por esse motivo, essa categoria será considerada no cálculo e avaliação do impacto ambiental (INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS, 2002).

Para determinação do GWP utilizaram-se os fatores de caracterização apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 - Fatores de caracterização para determinação do GWP.

Parâmetro	Ψ_{ij}
NO_x	40,00
CO_2	1,00
CO	3,00

Fonte: Institution of Chemical Engineers (2002).

A emissão desses poluentes e de material particulado estão diretamente ligados à eficiência da combustão, o processo de utilização do calor e emissões resultantes, logo avaliaram-se quatro fatores: Qualidade do combustível; Temperatura da câmara de queima da fornalha; Alimentação de ar e Sistema de coleta de particulado.

4.3.2 Comparação entre a queima de biomassa *versus* gás natural

Com intuito de entender os impactos gerados pela queima dos combustíveis biomassa e gás natural. Calcularam-se os valores teóricos de emissão de dióxido de carbono, tomando como base a estequiometria de reação de combustão. Para o eucalipto, utilizou-se a média normalizada das composições elementares teóricas, a normalização dos dados foi realizada dividindo a média de concentração de cada elemento pela soma das médias das concentrações apresentadas, a fim de gerar uma base de cálculo de 100 % (m/m) como visto na Tabela 1.

Considerando, combustão completa em base seca, as massas molares de cada elemento e quantidade teórica de ar necessária para combustão. E desconsiderando o teor de cinzas, obtêm-se para o eucalipto a reação de combustão apresentada pela Equação 9.

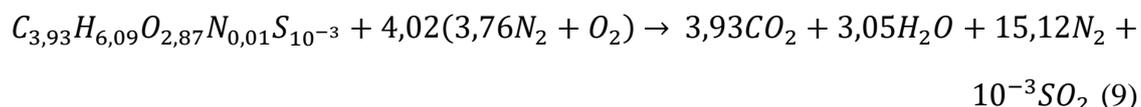


Tabela 1 - Composição elementar teórica do eucalipto.

Propriedades (% m/m)	Eucalipto ¹	Eucalipto ²	Eucalipto ³	Média (% m/m)	Média Normalizada (% m/m)
C	46,81	46,01	49	47,27 ± 1,15	47,20
H	6,11	6,2	5,99	6,1 ± 0,07	6,09
N	0,12	0,13	0,06	0,1 ± 0,03	0,10
O	46,76	46,76	44,36	45,96 ± 1,07	45,89
S	<0,01	0,02	0,03	0,03 ± 0,01	0,02
Cinzas	0,56	0,71	0,79	0,69 ± 0,08	0,69

Fonte adaptada de ¹Borges (2015); ²Silva (2019); ³Jenkins (1990).

O PCS do eucalipto foi calculado usando a Equação 1 com as propriedades apresentadas no Quadro 2.

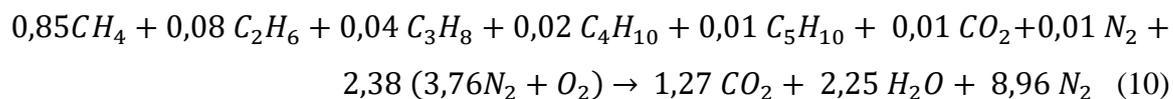
A composição do gás natural foi obtida através da média normalizada das composições do gás originados de poços de petróleo localizados em diferentes estados brasileiros, desconsiderando a concentração de C₆₊, usando como base de cálculo 100 litros de combustível, seus valores estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição teórica do gás natural.

Composição (%v/v)	São Paulo	Rio de Janeiro	Espírito Santo	Sergipe/Alagoas	Média (%v/v)	Média Normalizada (%v/v)
Metano	87,98	79,69	88,16	81,32	84,29 ± 3,78	84,54
Etano	6,27	9,89	4,8	8,94	7,48 ± 1,94	7,50
Propano	2,86	5,9	2,75	3,26	3,69 ± 1,10	3,70
Butano	1,16	2,13	1,55	1,84	1,67 ± 0,32	1,68
Pentano	0,27	0,77	0,44	0,74	0,56 ± 0,20	0,56
Nitrogênio	1,16	0,8	1,62	1,51	1,27 ± 0,29	1,28
CO ₂	0,23	0,5	0,24	1,97	0,74 ± 0,62	0,74

Fonte adaptada de Vaz (2008).

A reação de combustão do gás natural (Equação 10) foi obtida considerando combustão completa em base seca, gás ideal e quantidade teórica de ar necessária para combustão. Em que, para gás ideal, nas CNTP, assume-se o volume molar igual a 22,4 mol/L.



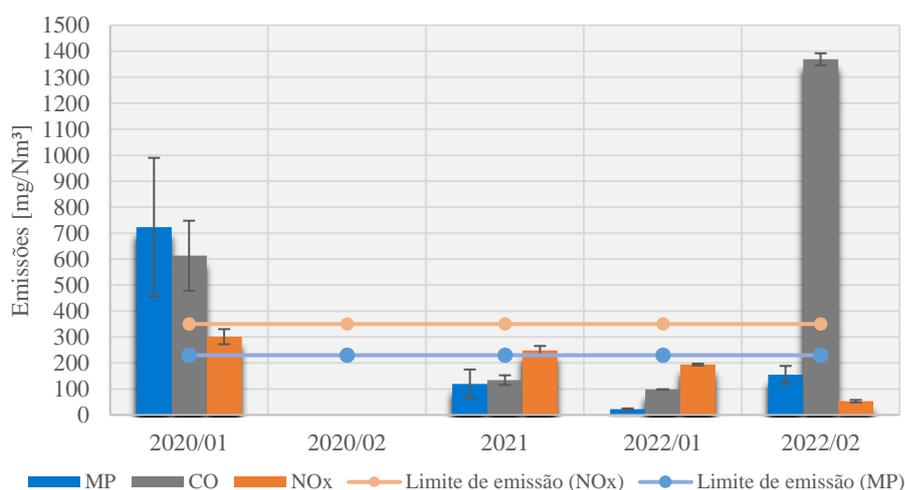
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emissões de uma fornalha que fornece calor para torrefação de café foram avaliadas a fim de se mapear os fatores que influenciam as emissões de CO, NO_x e Material Particulado e propor melhorias para o processo.

5.1 Avaliação das emissões

As emissões da Chaminé 1 (FIGURA 12) correspondente as vazões apresentadas na Tabela 3, provém do topo da fornalha, diretamente da câmara de combustão.

Figura 12 – Emissões de poluentes da Chaminé 1.



Fonte: Do autor (2022).

Tabela 3 - Vazão das análises na Chaminé 1.

Análise	Vazão (m³/h)
2020/01	4.132,46 ± 20,82
2020/02	-
2021	4.804,67 ± 6,44
2022/01	7.336,33 ± 37,78
2022/02	11.888,33 ± 48,89

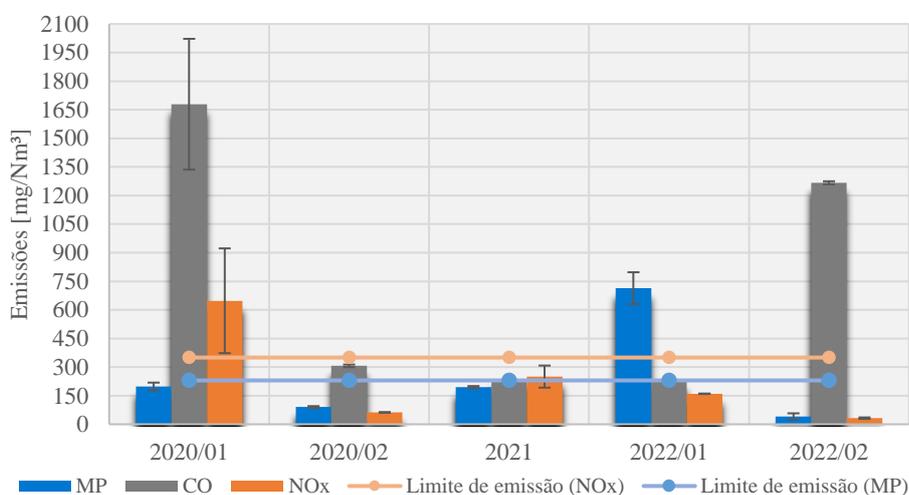
Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 12, percebe-se em 2020/01 níveis de MP e CO acima do permitido, enquanto NO_x se encontra dentro do limite. A análise de 2020/02 não foi realizada na Chaminé 1, pois havia medições de CO₂ e O₂, na tubulação de saída da fornalha, sendo realizada de forma contínua, com a intenção de encontrar ajustes que reduzissem as emissões. Em 2021, obteve-se

uma redução da emissão de poluentes, a qual foi ainda mais pronunciada em 2022/01. Já em 2022/02, a emissão de CO aumentou expressivamente, enquanto a emissão de NO_x reduziu e o lançamento de MP quase quadruplicou comparado ao ano anterior.

Para a Chaminé 2, localizada na fornalha interna do torrador, as emissões são um pouco maiores que as da Chaminé 1, como visto na Tabela 3 e 4. Isso ocorre, pois, a Chaminé 1 emite gases somente quando há pressurização da fornalha e queda de energia, já a Chaminé 2 possui, na maioria dos casos, uma vazão maior dos gases advindos da combustão, como visto na Tabela 4.

Figura 13 - Emissões de poluentes da Chaminé 2.



Fonte: Do autor (2022).

Tabela 4 - Vazões obtidas nas análises na Chaminé 2.

Análise	Vazão (m³/h)
2020/01	30.859,08 ± 65,26
2020/02	14.688,44 ± 34,09
2021	7.080,67 ± 32,44
2022/01	7.740,67 ± 33,78
2022/02	16.909,67 ± 34,22

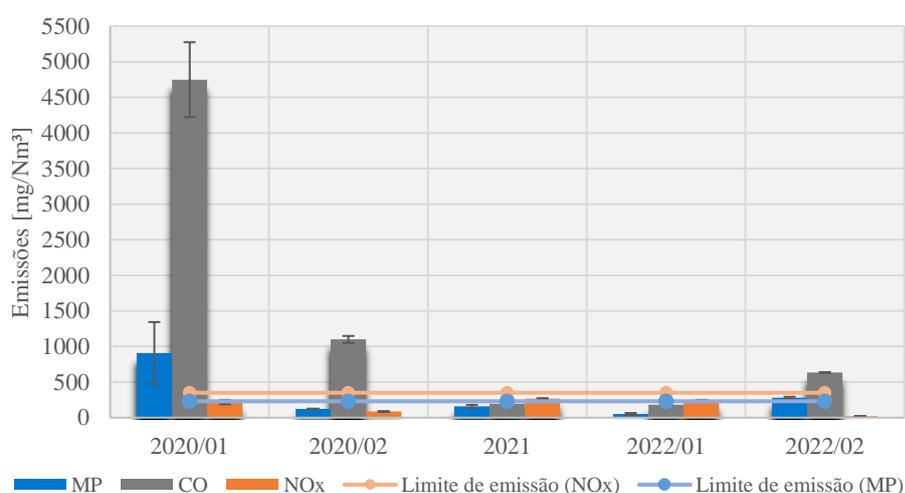
Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 13, observa-se que, em 2020/01, o lançamento de MP se encontrava dentro do estabelecido pela legislação, 230 mg/Nm³. Entretanto, as quantidades de NO_x e de CO estavam acima do limite. Em 2020/02, as emissões de NO_x, MP e CO foram reduzidas significativamente, em 2021 esses poluentes se mantiveram dentro do permitido por lei, entretanto houve um aumento de sua emissão comparado ao ano anterior.

Na primeira análise de 2022, a Chaminé 2 apresentou valores de MP maiores que o esperado, reduzindo a quantidade de NO_x e mantendo o valor de CO. A segunda análise deste mesmo ano mostrou redução significativa de MP e NO_x, entretanto o CO aumentou consideravelmente.

Por fim, para a Chaminé 3, que recebe os gases limpos dos ciclones 3 e 4 dos processos de resfriamento e aromatização, as concentrações de poluentes nas emissões estão dispostas na Figura 14 e as correspondentes vazões na Tabela 5.

Figura 14 – Emissões de poluentes da Chaminé 3.



Fonte: Do autor (2022).

Tabela 5 - Vazões obtidas nas análises na Chaminé 3.

Análise	Vazão (m³/h)
2020/01	21.086,91 ± 20,29
2020/02	16.333,50 ± 12,00
2021	15.723,67 ± 25,11
2022/01	11.974,33 ± 32,89
2022/02	25.701,33 ± 178,44

Fonte: Do autor (2022).

Como pode ser notado na Figura 14, em 2020/01 foram observados valores elevados para emissão de CO, seguido por uma elevada quantidade de MP e com NO_x dentro do permitido pela legislação. Em 2020/02, os valores de NO_x e MP voltam a normalidade, enquanto o lançamento de CO ainda se encontrava elevado. Essas emissões se normalizaram na análise realizada em 2021, se mantendo dentro dos padrões legais de emissão até 2022/02,

quando houve alterações das emissões de MP e de CO. Em contrapartida, houve uma redução significativa dos valores emitidos de NO_x.

Ao analisar as emissões mostradas nas Figuras 13, 14 e 15 é possível perceber que, em 2021, os parâmetros de processos estavam ajustados, possibilitando uma maior conversão completa da reação de combustão, visto que as concentrações de poluentes foram reduzidas. Por esse motivo, a avaliação das emissões da última análise realizada (2022/02) será realizada em comparação com as de 2021, como apresentado na Tabela 6. Essa análise foi feita associando os dados da emissão de 2022/02 com os parâmetros de processos que influenciam na emissão dos poluentes (CO, NO_x e MP).

Tabela 6 - Emissão de poluentes e parâmetros das Chaminés 1, 2 e 3 para as amostragens do ano de 2021 e 2022/02.

		Amostragem ano de 2021					
		Chaminé 1		Chaminé 2		Chaminé 3	
MP	[mg/Nm³]	119,33 ±	55,11	197,33 ±	5,56	158,00 ±	22,00
NO_x	[mg/Nm³]	249,00 ±	16,67	250,00 ±	58,00	265,00 ±	9,11
CO	[mg/Nm³]	134,33 ±	18,89	237,67 ±	4,89	196,00 ±	2,44
CO₂	[%]	11,95 ±	0,53	11,21 ±	0,28	11,79 ±	0,01
O₂	[%]	7,70 ±	0,20	7,80 ±	0,00	7,67 ±	0,09
N₂	[%]	80,51 ±	0,19	81,27 ±	0,18	80,60 ±	0,13
Vazão	[m³/h]	4.804,67 ±	6,44	7.080,67 ±	32,44	15.723,67 ±	25,11
Umidade	[%]	6,43 ±	0,18	18,80 ±	0,13	6,23 ±	0,11
Temperatura	[K]	328,90 ±	0,83	783,23 ±	2,78	394,37 ±	2,96
		Amostragem ano de 2022/02					
		Chaminé 1		Chaminé 2		Chaminé 3	
MP	[mg/Nm³]	155,33 ±	33,78	41,33 ±	16,44	278,33 ±	14,89
NO_x	[mg/Nm³]	53,33 ±	4,89	35,00 ±	4,00	61,67 ±	0,89
CO	[mg/Nm³]	1.368,67 ±	23,11	1.267,33 ±	7,78	632,69 ±	6,89
CO₂	[%]	2,29 ±	0,61	4,80 ±	0,06	11,20 ±	0,00
O₂	[%]	8,90 ±	0,05	9,45 ±	0,04	5,10 ±	0,09
N₂	[%]	88,55 ±	1,12	80,40 ±	0,04	83,63 ±	0,11
Vazão	[m³/h]	11.888,33 ±	48,89	16.909,67 ±	34,22	25.701,33 ±	178,44
Umidade	[%]	7,67 ±	0,04	9,80 ±	0,40	8,70 ±	0,20
Temperatura	[K]	318,82 ±	0,14	534,40 ±	2,39	383,01 ±	6,91

Fonte: Do autor (2022).

5.1.1 Qualidade do combustível

O combustível usado neste processo é o cavaco de eucalipto, com granulometria aceitável de no máximo 5 % para finos, de 60 a 75 % na dimensão de interesse e até 10 % com dimensões acima do definido. Em que, os finos são removidos por um pré-processamento da biomassa. As especificações usadas para aceitar uma carga de cavaco permitem para as características químicas do eucalipto, que a umidade varie de 20 a 40 %.

Caso as características químicas e físicas permitidas pelas especificações do cavaco interfiram no funcionamento do processo, os operadores ajustam os valores de alimentação de combustível e ar, tomando como base a temperatura interna da câmara de queima.

A uniformidade do combustível interfere diretamente na velocidade de queima do combustível, implicando em variações de temperatura. Pedacos maiores de biomassa possuem mais dificuldade em serem queimados, em contrapartida, dimensões reduzidas queimam rapidamente implicando em um maior consumo de combustível para manter a temperatura constante. Segundo Corradi (2021), a granulometria principal deve representar 80 % da amostra, em que a fração de finos não deve ser maior que 5 % e a fração de partículas maiores que a principal não deve ser maior que 1 %. A divergência entre a granulometria recomendada por Corradi (2021), e o usado no processo, sugere a necessidade de reavaliar as especificações aceitáveis desta característica para o processo.

A umidade ou teor de água do combustível é um parâmetro importante nessa avaliação, visto que quanto maior a quantidade de água a ser evaporada, maior será o consumo de energia na fase endotérmica da queima do combustível, gerando redução da temperatura dos gases da câmara. No estudo realizado por Resende (2019), testou-se o rendimento da queima de eucalipto para aquecimento da água de uma caldeira, variando o teor de umidade do combustível. Em que, o cavaco com aproximadamente 25 % de umidade apresentou maior rendimento térmico. Deste modo, sugere-se para o processo estudado a revisão da especificação de umidade. Essa reavaliação deve ser feita tomando como base testes operacionais e os valores encontrados em trabalhos disponíveis na literatura.

Na Tabela 6, observa-se uma redução de temperatura para as Chaminés 1, 2 e 3, ao comparar os resultados obtidos na análise dos gases de exaustão dos anos de 2021 e 2022/02. A redução da temperatura de exaustão dos gases pode surgir que houve uma redução na temperatura da câmara de queima, gerando como consequência a emissão de poluentes como CO e NO_x.

A baixa temperatura da câmara de queima pode estar associada a variações na qualidade do combustível, porém as características do cavaco de eucalipto usado na queima que gerou os gases de exaustão analisados e o seu consumo, não são conhecidas. Portanto, não foi possível relacionar a baixa temperatura dos gases de exaustão com a temperatura da câmara de queima através da avaliação das variações da qualidade do combustível.

5.1.2 Alimentação de ar e temperatura da câmara de queima.

O ar é a fonte do oxigênio necessário para a queima do combustível, variações nesse parâmetro implicam diretamente na temperatura da chama e emissões de CO, MP (advindos da liberação de C) e NO_x. Segundo Cortez *et al.* (2008), o excesso de ar para combustíveis sólidos deve se manter de 15 a 30 %. Neste trabalho, o percentual de excesso de ar indicado pelo fornecedor que dimensionou a câmara de queima é de 30 %, estando de encontro com o valor encontrado na literatura. Entretanto o real excesso de ar alimentado na fornalha não é verificado durante o processo de queima do eucalipto. Por isso não há evidências de que o excesso de ar real usado na alimentação da fornalha estivesse de acordo com o sugerido pelo fornecedor e a literatura.

Ao comparar os resultados das análises realizadas em 2021 e 2022/02 presentes na Tabela 6, percebe-se a redução da concentração de NO_x, o aumento da concentração de CO, elevação da vazão e redução da temperatura dos gases de exaustão das Chaminés 1, 2 e 3. A elevação da vazão e a redução de temperatura dos gases de exaustão, surge que houve uma redução na temperatura da câmara de queima pelo excesso de alimentação de ar.

Francisco (2012), relaciona o percentual de oxigênio nos gases de exaustão com o percentual de excesso de ar, em que quanto maior a quantidade de oxigênio nos gases de exaustão, maior é o percentual de excesso de ar. Além de que essa condição gera também a diminuição da temperatura da câmara de queima, reduzindo a eficiência da reação de combustão. No processo avaliado, para as Chaminés 1 e 2 houve um aumento na porcentagem de oxigênio presente no gás de exaustão apresentados na Tabela 6, tais chaminés emitem diretamente os gases gerados na queima do combustível na câmara de combustão da fornalha. Já a chaminé 3, possui a interferência dos gases gerados no processo de torrefação em sua emissão.

A redução da temperatura da câmara de queima resulta na redução de emissão de NO_x e aumento da emissão de CO nos gases de exaustão em consequência da combustão incompleta. No sistema estudado, além da queima de cavaco de eucalipto, há queima dos gases advindos

do processo de torrefação, em que compostos aromáticos e CO são queimados. Portanto a elevada emissão de CO, considerando a hipótese de redução da temperatura da câmara de queima pelo excesso de alimentação de ar, ocorre tanto pela presença de combustão incompleta, quanto pela queima ineficiente dos gases recirculados.

Portanto, acredita-se que há a necessidade de revisar a alimentação de ar da fornalha. Pois, caso haja redução da temperatura da câmara de queima, em consequência do excesso de ar inadequado, reduzir a emissão dos poluentes se torna uma questão de controle de processos.

5.1.3 Sistema de coleta de particulado

Como pode ser notado na Tabela 6, a emissão de MP se mantém dentro no esperado para Chaminé 1, sua redução na Chaminé 2 apresentada na análise de 2022/02 em relação a análise de 2021 está relacionada ao bom funcionamento do Ciclone 1, que remove as cinzas geradas do processo de combustão. Já na Chaminé 3, há um aumento da emissão de MP. Este desvio está diretamente ligado à eficiência de separação de MP do gás de combustão dos Ciclones 3 e 4 (FIGURA 6).

No estudo realizado, normalmente os ciclones cumprem seu papel, entretanto, pontualmente, ocorre o entupimento das roscas que retiram o particulado dos ciclones e consequentemente eles são preenchidos por partículas, tornando a limpeza da corrente gasosa ineficiente. Para a remoção de cinzas do Ciclone 1, a incrustação nas tubulações causadas pela presença das cinzas, favorece o entupimento do sistema, portanto, é necessário limpá-la de forma rotineira para não haja o travamento das roscas.

Já para os Ciclones 3 e 4 o mesmo não ocorre, visto que o seu particulado é composto por películas de café. Segundo Mutha (2019), quanto maior a velocidade de entrada do gás no ciclone, maior será sua eficiência, ou seja, o ciclone passa a coletar também partículas menores que o especificado no projeto. No sistema estudado, o aumento do volume coletado pelos ciclones não é associado à sua remoção. Isso significa que parte do volume coletado devido à elevação da eficiência permanece no fundo do ciclone. Essa condição pode estar associada a redução do intervalo entre entupimentos desses ciclones.

Segundo Peçanha (2014), a velocidade do gás na alimentação de ciclones deve estar entre 21.945,6 e 76.809,6 m/h, para velocidades maiores que a recomendada há uma ressuspensão das partículas coletadas, devido a maior turbulência do fluido. Ao comparar as características da emissão das chaminés na análise de 2021 com as de 2022/02, observa-se o aumento da vazão do lançamento de efluentes na Chaminé 3. Entretanto falta de dados

relacionados ao dimensionamento do equipamento, velocidade de gás na entrada e tipo de ciclone, impossibilitou verificar se o aumento da velocidade dos gases emitidos pela Chaminé 3 estava diretamente relacionado com a elevação de emissão de material particulado.

5.2 Indicadores de impacto ambiental

As vazões mássicas emitidas de CO₂, CO e NO_x nas três chaminés do processo são apresentadas na Tabela 7. Ao avaliar as vazões mássicas das emissões, entende-se que o maior impacto em volume lançado na atmosfera é da emissão de CO₂. É importante ressaltar que esse composto, de acordo com a ONU (2022b), é um dos principais gases que impactam no efeito estufa. Entretanto, as legislações brasileiras não limitam essa emissão para fontes estacionárias, isso ocorre pois o CO₂ não diluído na atmosfera não oferece risco imediato a saúde dos seres humanos.

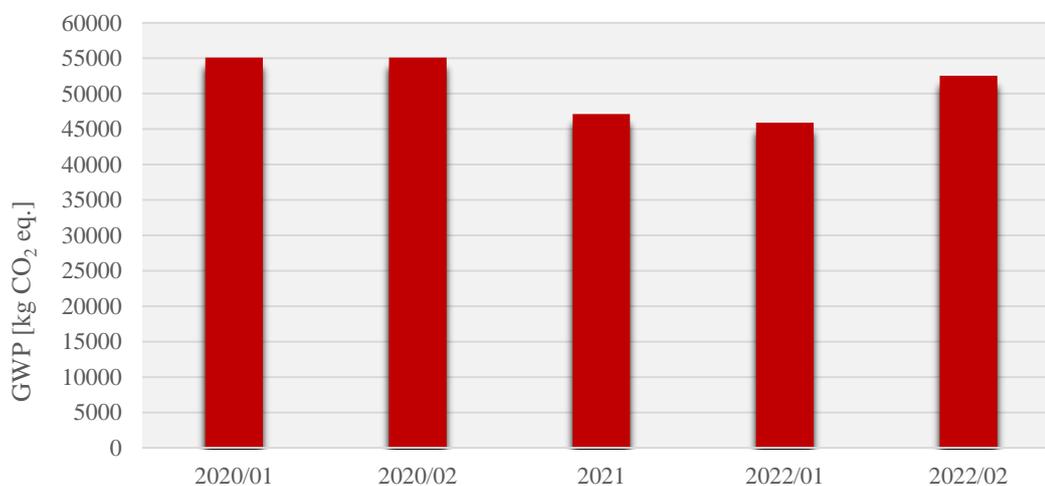
Tabela 7 - Somatório das vazões mássicas das emissões obtidas em cada análise.

	2020/01	2020/02	2021	2022/01	2022/02
\dot{m}_{NO_x} [kg/h]	25,83	2,34	7,13	5,65	1,78
\dot{m}_{CO} [kg/h]	154,46	22,55	5,41	4,70	53,96
\dot{m}_{CO_2} [kg/h]	53.583,06	54.940,24	46.840,56	45.670,10	52.320,07

Fonte: Do autor (2022).

A partir dos valores apresentados na Tabela 7, foram calculados os Potenciais de Aquecimento Global (GWP) via modelo de Equivalência conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Indicador de GWP para cada análise realizada.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 15 percebe-se que, para o processo de torra de cafés estudado, o potencial de aquecimento global varia entre 45000 e 55.000 kgCO_{2eq}.

Em 2020/01, a elevada emissão de CO e NO_x, que contribui, para a categoria de Mudanças Climáticas, em 3 e 40 vezes mais que a emissão de CO₂, respectivamente. Resultando em aproximadamente 55 toneladas de kgCO_{2eq}. de potencial de aquecimento global. É importante ressaltar que a elevada emissão de NO_x, também contribui para outras categorias de impacto ambiental, como Eutrofização e Acidificação da atmosfera.

Na análise de 2020/02, a redução da emissão de CO e NO_x é compensada pelo aumento da emissão de dióxido de carbono. Entretanto, considerando que as emissões da Chaminé 1, para essa análise, não são conhecidas, esse valor ultrapassa o potencial de 55.000 kgCO_{2eq}. Em 2021 e 2022/01, entende-se que há um equilíbrio entre emissão de CO₂ e as emissões de CO e NO_x, visto que há uma redução do impacto ambiental devido à redução de CO₂, CO e de compostos nitrogenados. Em que, os dois últimos permanecem dentro do especificado pela legislação.

Em 2022/02, a maior contribuição continua sendo de CO₂, entretanto, nota-se uma maior parcela de contribuição do lançamento de CO para o impacto ambiental em comparação a análise anterior. Essa emissão é considerada prejudicial tanto pelas questões climáticas quanto pelos impactos à saúde humana, visto que ele apresenta alto índice de toxicidade (SANTOS, 2019).

Em virtude da falta de dados, no cálculo do indicador GWP, não foram consideradas as emissões de óxidos de enxofre. O cavaco usado no processo é de eucalipto e, de acordo com a avaliação elementar apresentada na literatura, essa biomassa, mesmo que em pequenas quantidades, possui enxofre em sua composição. A sua emissão, além dos impactos nas mudanças climáticas, gera, segundo Salema (2008), irritações na garganta e trato respiratório, e se entrar em contato com a água pode reagir e produzir ácido sulfúrico, por esse motivo é de extrema importância o seu monitoramento.

Outro ponto a ser considerado é a emissão de Material Particulado. Conforme Santos (2019), trata-se de um estressor ao meio, pois prejudica diretamente a saúde humana causando perdas respiratórias e, em alguns casos pode provocar até morte. Para calcular seu impacto seria necessário conhecer a granulometria das partículas emitidas (PM₁₀ e PM_{2,5}), todavia esse dado não é conhecido para o processo estudado. Segundo García *et al.* (2015), é possível estimar a granulometria do particulado oriundo das cinzas através da avaliação da tendência de deposição das cinzas. Considerando a composição das cinzas encontrada na literatura para o eucalipto

(TABELA 5), determinaram-se os índices de deposição preventiva para as três amostras de composição de cinzas obtidas através da literatura apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices de deposição preditiva para as três amostras de composição de cinzas obtidas através da literatura.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Razão ácido/base	Médio (2,74)	Alto (8,75)	Alto (75,60)
Índice de incrustação	Alto (25,75)	Extremamente alto (89,33)	Extremamente alto (312,38)
Parâmetro I	Não sinteriza (4,23)	Não sinteriza (4,81)	Não sinteriza (14,03)
Índice de temperatura de fusão	0,69	0,34	0,11

Fonte: Do autor (2022).

Segundo Garcia *at al.* (2015), é interessante que as frações de cinza no fundo seja alta, evitando a emissão para atmosfera. O Quadro 6, mostra a granulometria da amostra 3, que apresenta aproximadamente 18 % de cinzas com diâmetro menor que 10 μm e menos que 10 % com diâmetro menor que 2,5 μm . Na Tabela 8 percebe-se que a amostra 3 possui uma alta tendência a deposição devido ao elevado índice de incrustação e razão ácido/base. Portanto quanto maior a propensão de deposição, menor a emissão de particulado. As amostras 1 e 2 seguem a mesma tendência.

A ausência do indicador de categoria Formação de Material Particulado, assim como a desconsideração de óxidos de enxofre, não anulam os impactos existentes, portanto o impacto real causado pelo processo de torrefação de café é maior que o demonstrado pelo indicador GWP.

5.3 Proposição de melhorias

A maior dificuldade encontrada para propor melhorias que diminuíssem as emissões foi a falta de controle desse processo. A medição das concentrações dos poluentes emitidos é realizada de forma amostral, sem dados dos acontecimentos do sistema. Portanto, mesmo que seja possível conhecer as concentrações dos poluentes emitidos, este método pode refletir apenas a taxa de emissão respectiva a um determinado momento, com condições operacionais específicas, aumentando consequentemente a incerteza dos dados extrapolados (PIRES, 2005).

Atualmente, na planta avaliada os operadores realizam o monitoramento contínuo das emissões através de câmeras que possibilitam a visualização das chaminés e, a depender da coloração, realizam alguma atuação. No entanto, segundo Pires (2005), este método possui um caráter muito subjetivo, dependendo de condições da imagem emitida pela câmera, análise crítica do operador entre outros.

O conhecimento dos dados de concentração de componentes emitidos durante o funcionamento da fornalha ofereceria uma visão crítica dos pontos reais de melhoria. Já que se as oscilações de concentrações fossem conhecidas, seria possível associá-las às manobras operacionais, variações de qualidade de combustível, quantidade de alimentação de ar e de combustível, condições dos equipamentos, tubulações entre outros.

Sendo assim, a primeira melhoria a ser considerada é a realização de um monitoramento contínuo de emissões de poluentes nas chaminés. Segundo Pires (2005), o monitoramento contínuo de emissões comumente mede as concentrações de NO_x , CO_2 , CO , SO_2 e hidrocarbonetos totais. Para Cortez *et al.* (2008), é mais vantajoso realizar o controle do coeficiente de excesso de ar pelo acompanhamento da concentração de oxigênio, visto que a quantidade de dióxido de carbono varia de acordo com a composição química do combustível. Logo, para o sistema estudado, indica-se, o monitoramento das concentrações de CO , NO_x e CO_2 , nas Chaminés 1, 2 e 3, e o controle do coeficiente de excesso de ar pelo monitoramento da concentração de O_2 , na saída dos gases gerados na câmara de combustão.

Esse controle norteará demais projetos de melhoria, possibilitaria ações imediatas em casos de pequenos desvios não vistos pelos operadores através das características da fumaça emitida pela chaminé, temperatura da fornalha e ciclones etc., além de possibilitar testes eficientes, gerando ajustes operacionais do processo, mais precisos. Um exemplo disso é que, se hoje a alimentação de ar for alterada, não é possível saber se há mais ou menos emissão de poluentes. Só há conhecimento da temperatura da chama e dos gases de saída da fornalha direcionados ao processo. Logo, se há mais CO , NO_x ou MP sendo emitido, e a temperatura de saída dos gases da fornalha está dentro do esperado, independente se houve aumento no consumo de combustível ou ar, o processo para os operadores se encontra em perfeito funcionamento.

É importante ressaltar que o monitoramento desses compostos de forma contínua, mesmo que sejam registrados não resolvem os problemas. Essa informação deve ser usada nos ajustes operacionais rotineiros, logo é imprescindível treinar os operadores quanto à influência de cada parâmetro do processo em cada emissão medida.

Quanto à eficiência dos ciclones, é imprescindível manter a velocidade de exaustão gasosa da entrada do equipamento na faixa que mantenha a eficiência deste tratamento. Para determinação dos valores de vazão mínima e máxima aceitável na entrada do ciclone, deve-se realizar testes usando como base as variações de emissão de material particulado nas chaminés e a faixa recomendada pela literatura, entre 21.945,6 e 76.809,6 m/h. Sendo assim, para esse ajuste é necessário o controle da emissão sugerida acima.

5.3.1 Tecnologias para tratamento de poluentes

As proposições sugeridas visam controlar as emissões e com isso otimizar o processo de combustão, sendo elas ações preventivas as alterações de lançamentos de poluentes gasosos. Este tópico trata de ações de caráter corretivo as emissões, ou seja, implantação de equipamentos e/ou processos que objetivam a redução da emissão dos poluentes oriundos da exaustão de gases antes de serem lançados para atmosfera, também conhecida como tecnologia fim-de-tubo.

Os principais aspectos que devem ser considerados na escolha de um equipamento e/ou processos que reduz a concentração dos poluentes do ar são: tipo e origem dos poluentes, vazão da fonte, eficiência de retenção, condições locais, forma de destinação do poluente e condições técnicas e econômicas de adquirir, instalar, operar e realizar as manutenções do equipamento (FERNANDES, 2003).

Se tratando da emissão de Material Particulado, o processo estudado já possui ciclones como equipamentos de controle. No entanto, em casos de desvios há emissão de MP, logo o ideal é associar os ciclones a outro equipamento de controle. Filtros mangas possuem elevada eficiência para controlar a emissão de MP, porém necessitam, na maioria dos casos, de resfriamento e desumidificação dos gases antes da filtração. Precipitadores eletrostáticos possuem menor eficiência para pó superfino ($PM_{2,5}$) comparado com lavadores de gás. Lavadores de Venturi de Média Energia, possuem eficiência de 99,94 % para partículas menores que 50 μm , 99,8 % para partículas menores que 25 μm e para $PM_{2,5}$, uma eficiência de 99,3 % (LORA, 2002).

Lavadores são absorvedores no qual há transferência de massa entre o gás e um líquido. A eficiência deste equipamento está diretamente ligada à solubilidade e reatividade entre soluto e solvente, área de contato para transferência de massa e tempo de residência. O uso desse equipamento possui como vantagem: baixa fração de água recirculada, resfriamento dos gases quentes, possibilidade de processar fluidos inflamáveis e explosivos com baixo risco. Dentre

suas desvantagens estão: a geração de efluentes líquidos, produtos úmidos, grande potencial de corrosão e a destinação da lama residual é associada a alto custo de disposição (CHEREMISINOF, 2002).

São muitos os tratamentos secundários para conter as emissões de NO_x , dentre elas existem: a redução catalítica, injeção de feixes de elétrons, injeção de combustíveis e compostos para oxidar NO, lavagem dos gases por um líquido solvente etc. Segundo Rodrigues (2020), a alternativa mais viável tomando como base o tipo de combustível usado na queima, impacto gerado pós-tratamento, custo de implantação, operação e manutenção é o *Wet Scrubber* (do tipo coluna de recheio). O uso da coluna de recheio tem crescido devido aos custos moderados e, por apresentar um elevado potencial em relação a reutilização da lama gerada no processo de lavagem dos gases, para produção de fertilizantes.

A redução de emissão de CO_2 só é possível com a implementação de tecnologias para captura e sequestro ou utilização de CO_2 . A captura de CO_2 pode acontecer de três maneiras: oxi-combustão, pré-combustão e pós-combustão. A oxi-combustão visa gerar somente água e CO_2 , ao injetar oxigênio puro na queima, sendo possível a separação de CO_2 por condensação. Na pré-combustão, o combustível é convertido a uma mistura de CO_2 e H_2 , o CO_2 é separado da mistura e o H_2 é queimado levando à produção de água e energia. Esses dois métodos possuem baixa flexibilidade operacional (STURING *et al.*, 2011).

Em vista disso, as técnicas de pós combustão são mais utilizadas. Este processo baseia-se na remoção de CO_2 de gases de exaustão, através de processos físico-químicos ou biológicos. Os processos químicos podem ser por: absorção, no qual o CO_2 é dissolvido em um líquido solvente e termicamente separado para ser posteriormente utilizado; adsorção, que ocorre por meio ligação química ou física à superfície do material adsorvente, como zeólitas, peneiras moleculares e carvão ativado, possuindo redução da eficiência na presença de umidade e baixas pressões; destilação criogênica, em que o CO_2 é obtido através de sucessivos estágios de compressão, resfriamento e expansão (MAIA, 2007).

Os processos biológicos usam da necessidade de carbono para realização de fotossíntese para fixar CO_2 . Comumente são usadas microalgas, que possuem elevadas taxas de biofixação de CO_2 e ainda o converte em biomassa e biomoléculas de valor agregado; e bactérias autotróficas, que também são capazes de converter CO_2 em moléculas orgânicas (ZHOU *et al.*, 2017; LÓPEZ *et al.*, 2009). Entretanto, esses métodos não toleram concentrações superiores a 20 % (v/v) de CO_2 , além de serem afetados negativamente pelas variações de temperatura, diferentes da faixa estável entre 15 e 16° C, e a presença de SO_x e NO_x (WANG *et al.*, 2008).

Todos os processos citados, em maiores ou menores porcentagens, exigem elevado custo de instalação, operação e manutenção.

5.4 Comparação do impacto ambiental da biomassa *versus* gás natural

Após avaliar o funcionamento da fornalha que opera com cavaco de eucalipto como combustível, procedeu-se a uma comparação com o uso de gás natural. O PCS do eucalipto calculado foi de 23,17 MJ/kg. Nakai (2014) comparou valores teóricos de PCS do eucalipto, calculados pela equação de Channiwala *et al.* (2022), com os valores experimentais (18,95 a 19,26 MJ/kg) obtendo um desvio máximo de 0,3 MJ/kg. A diferença entre o valor calculado deste trabalho para os valores experimentais obtidos por Nikai (2014) foi de 3,91 MJ/kg, o que pode ser justificado pela diferença de composição elementar entre ambos, visto que a equação depende diretamente deste parâmetro.

Considerando a reação de combustão do eucalipto (EQUAÇÃO 9), cerca de 3,93 mols de CO₂ são liberados para cada mol de biomassa consumida. Assim, é possível estimar que 1,7 mols de CO₂ são emitidos por MJ gerado.

O gás natural apresenta, segundo Garcia (2013), PCS igual a 39,68 MJ/m³. Ao considerar a equação de combustão (EQUAÇÃO 10), estima-se que 0,32 mols de CO₂ são emitidos por MJ gerados. Portanto, considerando combustão completa em ambos os casos, a queima de gás natural gera menos dióxido de carbono. Além disso, de acordo com Teixeira (2021), o gás natural não emite partículas menores que 2,5 µm (PM_{2,5}), não emite óxidos de enxofre (SO_x) e nem óxidos de nitrogênio (NO_x).

O gás natural é composto por um conjunto de gases, no qual normalmente apresenta maior proporção de metano. As concentrações desse conjunto de gases não são fixas, podendo apresentar variações dependendo da sua origem e contribuição do campo de extração do gás vendido. Segundo Rangel e Büchler (2005), variações na quantidade de nitrogênio não aumentam a formação de NO_x, a desvantagem está relacionada ao aumento do consumo de combustível para manter a eficiência térmica requerida, devido à redução da eficiência da transferência de calor da chama para a parede da fornalha.

Os principais motivos para o uso do gás natural não ter se disseminado para todos os setores industriais são de ordem econômica. A substituição de eucalipto, de baixo custo, é inviável financeiramente. Há também dificuldades técnicas em adaptações demandadas para sua implementação, como melhoria do isolamento térmico, aumento do volume de gases reciclados e incorporação de sistemas de controle, automação e segurança das fornalhas. Além

disso, implica uso de um recurso não renovável, quando derivado de petróleo (HENRIQUES; DANTAS; SCHWOB, 2005).

Ressalta-se, no entanto, que o ciclo de vida de ambos os combustíveis deve ser considerado, ou seja, o impacto gerado desde sua obtenção até a geração de energia pela queima. Visto que para o gás natural, a etapa de obtenção do combustível gera elevada emissão de GEE.

De acordo com Brasil (2010), atividades de exploração, produção, refino e transporte emitem gases como CO₂, CH₄ e N₂O. Em 2008, foram emitidas 13.042.379 toneladas de CO₂, 106.662 toneladas de CH₄ e 185 toneladas de N₂O. Já para o eucalipto, de acordo com Ramos, Matsuura e Barrantes (2018), em sua produção, impacta 86,37 kg CO₂ eq. na categoria de mudanças climáticas. Esse valor se deve ao uso de fertilizantes nitrogenados, uso de transportes e máquinas agrícolas.

Portanto, apesar de que na etapa de queima, o uso de eucalipto gerar maior emissão de poluentes, ele é vantajoso por ser um combustível de fonte limpa e renovável, apresentando baixo impacto ambiental na sua obtenção. Em contrapartida, o uso de gás natural implica em menos impacto ao ser queimado, entretanto possui alto impacto ambiental relacionado à sua exploração, além de que quando obtido através de reservatórios no subsolo, é considerado um combustível de fonte não renovável. É importante destacar que, ambos os combustíveis contribuem em diversas categorias de impacto ambiental, como evidenciado pelos dados encontrados na literatura citados acima. Portanto, é necessário, para entender qual combustível gera menos impacto ambiental, realizar uma avaliação do ciclo de vida de forma detalhada, e então, ponderar os benefícios e malefícios do uso de cada um.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, analisaram-se as emissões oriundas de um processo de geração e utilização de calor destinado à torrefação de café para propor melhorias que implicassem na redução da emissão de poluentes para atmosfera.

Por meio da avaliação dos parâmetros de processo (Alimentação ar, temperatura da fornalha, qualidade do combustível e vazão do sistema coleta de Material Particulado), levantou-se hipóteses sobre as causas das alterações de processos que levaram a elevada emissão de CO em todas as chaminés, Material Particulado na Chaminé 3 e a redução da emissão de NO_x, encontrada na segunda medição realizada no ano de 2022. A principal delas foi o aumento da vazão do efluente gasoso, sugerindo excesso de ar na câmara de combustão, o qual reduz a temperatura da fornalha, impossibilitando a queima de CO advindos da recirculação de gases provenientes do processo de torra, conseqüentemente gerando menos NO_x, mais monóxido de carbono e Material Particulado na Chaminé 3.

Como melhoria, sugeriu-se o controle da emissão de poluentes (CO, NO_x e CO₂) nas chaminés, e de oxigênio na saída dos gases da fornalha, a fim de possibilitar uma visão crítica dos pontos de melhoria e associá-las às manobras operacionais e parâmetros do processo de queima objetivando a redução desses poluentes.

O impacto ambiental deste processo implica nas categorias: Mudanças Climáticas, pela emissão de CO, NO_x e CO₂ Acidificação e Eutrofização pela emissão de NO_x, e Formação de Material Particulado. Neste trabalho, o Potencial de aquecimento global calculado apresentou valores entre 45.000 e 55.000 kgCO_{2eq}. Seu principal contribuinte foi a emissão de CO₂, característica do processo de queima de eucalipto.

Considerando que existem outras fontes combustíveis que geram menos CO₂, como por exemplo o gás natural, comparou-se seu uso ao da biomassa. Concluiu-se, entretanto, que para considerar uma substituição, é preciso comparar os impactos ambientais causados em todo o ciclo de vida do combustível, desde sua exploração até a queima, pois embora durante a combustão o uso do gás natural implique em menor liberação de CO₂, trata-se de um combustível de fonte não renovável com alto impacto ambiental relacionado à sua exploração.

Em estudos futuros, sugere-se avaliação da qualidade do combustível, temperatura da fornalha e excesso de ar buscando padronizar especificações que não comprometem a emissão dos poluentes e o funcionamento do processo. Também é interessante realizar a avaliação técnico-econômica da implementação de um sistema de controle de poluentes emitidos por chaminés.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, M. R. *at. al.* **Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.** Pesquisa Florestal Brasileira, Lavras, v. 32, n. 71, p.291-302, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/46016/1/ARTIGO_Qualidade%20e%20rendimento%20do%20carv%c3%a3o%20vegetal%20de%20um%20clone%20h%c3%adbrido%20de%20Eucalyptus%20grandis%20x%20Eucalyptus%20urophylla.pdf. Acesso em: 25 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da Indústria de Café.** 2021a. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2021/>. Acesso em: 01 de ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. O café brasileiro na atualidade. 2021b. Disponível em: <https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/o-cafe-brasileiro-na-atualidade/>. Acesso em: 07 ago.2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025** “Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração”. Rio de Janeiro, 2005.

BAZZO, EDSON. **Geração de Vapor.** Ed. UFSC,1995

BORGES, Ane Caroline Pereira. **Caracterização energética do cavaco de *eucalyptusgrandis* “in natura” e torrefeito.** Salvador, BA: UFB, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/21702/1/ANE_CAROLINE_PEREIRA_BORGES.pdf. Acesso em: 29 jul. 2022.

BORLINI, M. C. *et al.* **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza.** Cerâmica, v. 51, p. 192-196, 2005.

BRAGA, Alfesio *et al.* **Poluição atmosférica e saúde humana.** Revista USP, n. 51, p. 58-71, 2001.

BRASIL. Empresa De Pesquisa Energetica. **Atlas da Eficiência Energetica Brasil| 2020**. Brasília, DF: Empresa De Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2020>. Acesso em: 18 de jun. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões fugitivas de gases de efeito estufa na indústria de petróleo e gás natural**. Brasília, DF. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_fugitivas_petroleo.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

CANTER, L. **Environmental impact assessment**. New York: McGraw Hill, 1997. 331 p.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**, p. 1051-1063, 2002.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Handbook of air pollution prevention and control**. Elsevier, 2002.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **E16. 030** “Dutos e Chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes – Método de ensaio”. São Paulo, 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **L9. 221** “Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação de Material Particulado”. São Paulo, 1990.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **L9. 222** “Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. - Determinação da velocidade e vazão dos gases – Método de ensaio”. São Paulo, 1992.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **L9. 223** “Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluido gasoso”. São Paulo, 1992b.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **L9. 224** “Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. - Determinação da umidade dos efluentes”. São Paulo, 1993.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **L9. 225** “Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. - Determinação de material particulado”. São Paulo, 1995.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Resolução nº 187**. “Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas para o estado de Minas Gerais”. 19 de setembro de 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº382**. “Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas”. 26 de dezembro de 2006.

CORRADI, Giordano Marques *et al.* **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no Oeste Paranaense**. Cascavel, PR. Ed. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2021

CORTEZ, Luiz; GOMEZ, Electo; LARA, Edgardo. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados**. Editora Blucher, 2018.

CUNHA, Izabel. **Análise térmica e pirólise analítica de sabugo de milho**. Uberlândia, MG: UFU, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30161/1/Ana%cc%81liseTe%cc%81rmicaPiro%cc%81lise.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2022.

DE OLIVEIRA, Itamar Pereira; OLIVEIRA, Luana Carvalho; DE MO, Camila Stéffane Fernandes Teixeira. Cultura de café: histórico, classificação botânica e fases de crescimento. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 5, n. 4, 2012.

DIAS, José. Manual de operação: **Coletor Isocinético para Poluentes Atmosféricos**. Rio de Janeiro: Ed. Energética, 2013. Disponível em: https://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2016/01/env1_manual-cipa_rev_01.pdf. Acesso em: 09 jun. 2022.

DURÁN, C. A. A. *et al.* **Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida**. Rev. Virtual Quim, v.9, n. 1, nov. de 2017. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v9n1a10.pdf>. Acesso em 23 ago. 2021.

ESTAL, Joachim. **The Science Behind Coffee Roasting**. The Coffee Lab, 2021. Disponível em: <https://www.eraofwe.com/coffee-lab/en/articles/the-science-behind-coffee>. Acesso em: 10 jun. 2022.

FERNANDES, Paulo Sérgio. **Gestão de Fontes Estacionarias de Poluição Atmosférica**. 2003.

FRANCISCO, Rodrigo Pereira. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**. São João Del-Rei, MG. Ed. Universidade Federal de São João Del-Rei, 2012. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo_Pereira_Francisco.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

FREDERICO, Pedro Gustavo Ulisses. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. Viçosa, MG. Ed. Universidade Federal de Viçosa, 2009. Disponível em: <https://poscienciaflorestal.ufv.br/wp-content/uploads/2020/07/Pedro-Gustavo-Ulisses-Frederico.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.

GARCIA, Katia Cristina. **Avaliação de impactos ambientais**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2014. *E-book*.

GARCIA, Roberto *et al.* Study of biomass combustion wastes. **Fuel**, v. 148, p. 152-159, 2015.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. *E-book*.

GODOY, Lincoln Martins. **Estudo comparativo dos métodos de avaliação do impacto ambiental causado pela produção de aço**. 2014. Paraná, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014

GONZALEZ, E.A.S. **Estudo da viabilidade de implantação de pequenas unidades de torrefação de café**. 2004. Rio de Janeiro, RJ: Universidade Estácio de Sá, 2004.

HENRIQUES JR, Maurício; DANTAS, Fabrício; SCHWOB, Marcelo. **Mapeamento e desenvolvimento tecnológico do uso do gás natural em processos térmicos industriais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETROLEO E GÁS. 3, 2005, Salvador, BA. Disponível em: http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0213_05.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

HOGAN, D. J. **População e Meio Ambiente: a emergência de um novo campo de estudos: Dinâmica populacional e mudança ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro**. Campinas: Núcleo de Estudos de População-Nepo, 2007. p.13-49. Disponível em: http://www.unfpa.org.br/Arquivos/livro_dinamica.pdf. Acesso em: 17 jun. 2022.
<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2022.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual de 2020**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS. **The Sustainability Metrics, Institution of Chemical Engineers Sustainable Development Progress Metrics recommended for use in the Process Industries**. 2002.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 20 jul. 2022.

JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomassa materials**. International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The Role Biomass fuels. Delhi, 21-23 maio, 1990.

JESUS, Márcia Silva *et al.* **Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus**. Floresta, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/48418/31907>. Acesso em: 25 jun. 2022.

LACERDA, Luiz Drude de; SANTOS, Angelo Francisco dos; MARINS, Rozane Valente. Emissão de mercúrio para a atmosfera pela queima de gás natural no Brasil. **Química Nova**, v. 30, p. 366-369, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/rBB5S9NKmzZ8JcVKPNBMB8g/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 ago. 2022.

LIMA, Michael Douglas Roque *et al.* **Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de Eucalyptus**. Scientia forestalis., v. 48, n. 128, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr128/2318-1222-scifor-48-128-e3302.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2022.

LOPES, R. P. *et al.* **Controle da combustão em fornalhas a lenha**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas, SP, 2000. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200023&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 27 jul. 2022.

LÓPEZ, CV González *et al.* Utilization of the cyanobacteria *Anabaena* sp. ATCC 33047 in CO₂ removal processes. **Bioresource technology**, v. 100, n. 23, p. 5904-5910, 2009.

LORA, Electo Eudardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2. ed. Editora Interciência, 2002.

MAIA, João Luiz Ponce. **Separação e captura do dióxido de carbono em instalações marítimas de produção de petróleo**. São Paulo, SP. Ed. Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-14012008-163057/publico/Parte_1.PDF. Acesso em 22 ago. 2022.

MESA PEREZ, Juan Miguel. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. Campinas, SP. Ed. Universidade Estadual de Campinas, 2004. Disponível em:

file:///C:/Users/ruth.ribeiro/Downloads/MesaPerez_JuanMiguel_D%20(1).pdf. Acesso em: 23 jul. 2022.

MUTHA, Mayuresh et al. Numerical validation and study of particulate flow in cyclone separator using commercial computational fluid dynamics code. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2019. **Anais [...]**. IOP Publishing, 2019. p. 012027.

NAKAI, Diogo Keiji. **Avaliação do potencial energético de Eucalyptus spp. em gaseificador do tipo contracorrente**. Brasília, DF. Ed. Universidade de Brasília, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33550354.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas de Clima do Brasil 1970-2020**. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável**. 2022 a. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 jun. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta**. 2022b. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/voce-sabe-como-os-gases-de-efeito-estufa-aquecem-o-planeta#:~:text=Quais%20s%C3%A3o%20os%20principais%20gases,nitroso%20por%20aproximadamente%20120%20anos>. Acesso em: 03 ago. 2022.

PARLAMENTO EUROPEU. **Diretiva 2001/77/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de setembro de 2001, relativa à promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da eletricidade.

PAULUCIO, F.F. **Qualidade do carvão vegetal de madeira do cerrado em comparação ao Eucalyptus sp.** 2012. Brasília, DF: UNB, 2012. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/4440/1/2012_FelipeFerreiraPaulucio.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

PECANHA, Ricardo. **Sistemas Particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos**. Elsevier Brasil, 2014.

PELANDA, Karine Andressa *et al.* **Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor**. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), v. 6, n. 2, 2015.

PIMCHUAI, Anuphon; DUTTA, Animesh; BASU, Prabir. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy & Fuels**, v. 24, n. 9, p. 4638-4645, 2010.

PINHEIRO, B. C. A.; VALE C.G; ROBERTI N. **Caracterização física e química de cinza de lenha de eucalipto visando sua aplicação na indústria cerâmica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2014, Bento Gonçalves, RS. Disponível em:https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/13-040.pdf. Acesso em: 02 de ago. 2022.

PINTO, Luis Roberto de Mello. **Estudo experimental da combustão de eucalipto numa fornalha de leito fixo de caldeira em escala de laboratório, incluindo a intensificação acústica**. Itajubá, MG. Ed. Universidade Federal de Itajubá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1516>. Acesso em: 13 jul. 2022.

PIRES, D. O. **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e Sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, RJ. Ed. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

RAMOS, Nilza P.; MATSUURA, MI da SF; BARRANTES, Letícia De S. Avaliação do desempenho ambiental da produção de eucalipto para energia no estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6. 2018, Brasília, DF. **Anais** [...]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1102806/avaliacao-do-desempenho-ambiental-da-producao-de-eucalipto-para-energia-no-estado-de-goias>. Acesso em: 18 ago. 2022.

RANGEL, Leonardo; BÜCHLER, Maurício. **Estudo do nitrogênio na combustão do gás natural**. Química Nova. v. 28, n. 6, p. 957-963, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000600005>. Acesso em: 16 ago. 2022.

RAYAPROLU, Kumar, **Boiler for Power and Process.**, CRC Press, Taylor & Francis Group, 745 p, USA, 2009.

RESENDE, Eric Frederícson Ribeiro *et al.* **O efeito da umidade do cavaco na geração de vapor de uma caldeira aquatubular**. Uberlândia, MG, Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28572/1/EfeitoUmidadeCavaco.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.

RODRIGUES, Bruno Miguel Alves. **Redução das emissões de NO_x numa caldeira a biomassa da IKEA Industry Portugal SA**. Porto, Lisboa. Ed. Universidade do Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/128499/2/412154.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ROWELL, Roger M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. CRC press, 2005.

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

SALEMA, David. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO_x, SO₂, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado**. Lisboa. Ed. Universidade Nova de Lisboa, 2008. Disponível em: https://repositorio.ineg.pt/bitstream/10400.9/418/1/Tese%20Mestrado%20D._Salema.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

SANTOS, Guilherme; NASCIMENTO Raphael; ALVEZ, Geziele. **Biomassa como energia renovável no Brasil**. Uningá Review, Maringá, v. 29, n. 2, p. 06-13, 2017. Disponível em: <https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SANTOS, Haroldo Lima *et al.* **Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde.** Revista Científica Intr@ ciência, Guarujá, v. 17, p. 01-24, 2019. Disponível em: http://www.uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20190312105045.pdf. Acesso em: 22 jul 2022.

SANTOS, M. A. S. **Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno.** *In:* Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, Paulo Gustavo Cardoso dos *et al.* **Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa: adaptação a caldeira pré-existente.** 2009. Porto. Ed. Universidade de Porto, 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59700/1/000134703.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

SCHIRMER, Waldir Nagel; RUDNIAK, Andréia. Avaliação das emissões gasosas de diferentes tipos de combustíveis utilizados e seus impactos ambientais. **Tecno-Lógica**, v. 13, n. 1, p. 25-34, 2009.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Infográfico Brasil. 2020. Disponível em: <https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Infograficos/SEEG-infografico-brasil-1-BR-2020-rev.jpg>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SILVA, Gabriela Balçaçar. **Propriedades energéticas em clones de eucalipto.** Sinop, MT: UFTM, 2019. Disponível em: <https://bdm.ufmt.br/bitstream/1/1635/1/TCC-2019-GABRIELA%20BALCA%c3%87AR%20DA%20SILVA.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SILVA, Gustavo Henrique Daniel Santos *et al.* **Avaliação Do Teor De Água, Perda De Massa E Massa Específica Durante O Processo De Torra De Café Arábica.** *In:* CONGRESSO INTERNACIONAL DA AGROINDÚSTRIA, 2021. Disponível em: <https://ciagro.institutoidv.org/ciagro2021/uploads/236.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

SILVA, João Pedro Vasconcelos. **Análise e modelação da combustão em fornalha de biomassa.** Minho. Ed. Universidade de Minho, 2016. Disponível

em:<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/65438/1/Joao%20Pedro%20Vasconcelos%20Silva.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

STEIN, Ronei T. **Avaliação de Impactos Ambientais**. Ed. Grupo A, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595023451/>. Acesso em: 01 jul. 2022.

STYRING, Peter et al. **Carbon Capture and Utilisation in the green economy**. New York, NY, USA: Centre for Low Carbon Futures, 2011. Disponível em: <http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

TEIXEIRA, Cássio et al. Gás natural: um combustível-chave para uma economia de baixo carbono. *Petróleo & Gás*. V. 27, n. 53, p. 153-175, 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20802/1/PR_Gas%20natural_215277_P_BD.pdf. Acesso em: 14 ago. 2022.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Conditional Method Test 30**. Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process heaters using Portable Analyzers”. Outubro, 13, 1997.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. **Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado**. *Ciência Florestal*. v. 12, n. 1, Santa Maria, 2002.

VASKE, Nei Ricardo. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira flamotubular como adição ao concreto**. Rio Grande do Sul. Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75712/000883246.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 ago. 2022.

VAZ, Célio Eduardo Martins; MARTINS, Célio Eduardo; DOS MAIA, Santos Walmir Gomes. **Tecnologia da indústria de gás natural**. Ed. Blucher, 2008.

VERGNHANINI, Renato. **Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) na combustão industrial**. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 3, 2017. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/24/16>. Acesso em: 25 jun. 2022.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Cascavel, PR. Ed. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012. Disponível em: https://www5.unioeste.br/portaunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf. Acesso em: 22 jul. 2022.

WALLESER. Manual de Instruções: **Texto 340- Analisador de gases de combustão**. Lenzkich, 2011. Disponível em: https://static-int.testo.com/media/9d/be/99a5fa7d9840/Manual_testo_340.pdf. Acesso em: 11 jun. 2022.

WANG, Xiuju; LIM, Loong-Tak. **A Kinetics and Modeling Study of Coffee Roasting Under Isothermal Conditions**. **Food and Bioprocess Technology**. New York: Food and bioprocess technology, 2013.

WANG, Bei et al. CO₂ bio-mitigation using microalgae. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 79, n. 5, p. 707-718, 2008.

ZHOU, Wenguang et al. Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1163-1175, 2017.