



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

MATEUS NUNES DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CARVÃO E DOS REQUISITOS
OPERACIONAIS NA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS USANDO BALANÇO DE
MASSA**

FORTALEZA
2022

MATEUS NUNES DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CARVÃO E DOS REQUISITOS
OPERACIONAIS NA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS USANDO BALANÇO DE
MASSA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48e Oliveira, Mateus Nunes de.

Estudo da influência da composição do carvão e dos requisitos operacionais na combustão em caldeiras usando balanço de massa / Mateus Nunes de Oliveira. – 2022.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado.

1. Balanço de massa. 2. Carvão. 3. Combustão. 4. Emissão. 5. Poluentes. I. Título.

CDD 669

MATEUS NUNES DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CARVÃO E DOS REQUISITOS
OPERACIONAIS NA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS USANDO BALANÇO DE
MASSA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

João Nunes da Silva Junior
(Examinador Externo)

Bruno Deves Flores
(Examinador Externo)

A Deus,
A minha mãe, Tânia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, meu Criador, Amigo Fiel para todas as horas, doador de toda força, inteligência, sabedoria e discernimento necessários em mais esta conquista. A Ti toda honra, toda glória e todo louvor por mais esta etapa cumprida e mais este sonho realizado.

À minha mãe, Tânia, meu maior exemplo de amor, força e superação, e que mesmo na simplicidade se abnegou e me proporcionou a oportunidade de me graduar em Engenharia Metalúrgica e me incentivou a sempre continuar lutando e buscando novos desafios na caminhada desta vida.

À minha orientadora, Janaína, pelo suporte, empenho e paciência ao longo de boa parte da graduação e pelas valiosas e incontáveis orientações.

À minha namorada, Ana Bianca, que esteve comigo desde o início da graduação torcendo por mim em todos os momentos e me apoiando totalmente na constante luta pelos meus objetivos.

Ao Édrio, Juliana e Lucas, por serem grandes amigos e companheiros de curso, compartilhando momentos ótimos e momentos adversos durante toda a graduação. Sem vocês a minha graduação não teria tanta graça, pois: “Ninguém se forma sozinho”.

Ao meu amigo Thiago, pelos anos de amizade e de lealdade que não se abateram com distância.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein)

RESUMO

O processo de combustão é responsável por mais de 80% da energia utilizada pelo homem transpassando quase todos os setores de uma sociedade, seja em qualquer parte do mundo, apesar do grau de desenvolvimento. No Brasil, avalia-se que mais de 75% da energia empregada no país sejam provenientes da queima de carvão mineral, lenha, derivados de petróleo, carvão vegetal e biomassas, isto é, por processos de combustão. A inconveniência da utilização destes processos é a poluição do ar, tópico que tem sido amplamente pesquisado nas últimas décadas e caracteriza-se como um fator de grande relevância na busca da preservação do meio ambiente e na execução de um desenvolvimento sustentável, pois seus efeitos afetam de diversas formas a saúde humana, os ecossistemas e os materiais. A primeira etapa para utilizar melhor esta forma de conversão de energia é entender como o processo de combustão acontece, quais as variáveis podem ser alteradas objetivando eficiência e redução na emissão de poluentes. Neste trabalho foi estudada a influência do tipo de carvão e condições de operação no processo de combustão, por meio da elaboração de um modelo de balanço de massa e também mediante a comparação de valores reais medidos na planta industrial de uma usina termelétrica de queima de carvão pulverizado. Foram analisadas as emissões dos poluentes SO_2 e NO_x como uma função da composição do carvão e também foram testadas variações individuais do coeficiente de excesso de ar, observando-se assim a influência desta variável nas emissões de CO e NO_x . Examinou-se, através da análise da composição dos carvões, que a emissão de SO_2 é diretamente proporcional ao teor de enxofre do carvão. Nos testes, percebeu-se que o excesso de ar exerce uma pequena influência na formação do NO_x total oriundo da combustão de carvão, sendo que um aumento desta variável diminui a emissão do NO_x . Em relação à emissão de CO , houve uma diminuição mais considerável deste poluente quando se elevou o excesso de ar. Comparando-se os resultados das análises dos gases de combustão medidos na planta industrial com os valores calculados pelo modelo, verificou-se uma boa concordância, tornando-o útil para a análise de diferentes cenários de combustão.

Palavras-chave: carvão, combustão, emissão, poluentes

ABSTRACT

The combustion process is responsible for more than 80% of the energy used by man, passing through almost all sectors of a society, whether in any part of the world, despite the degree of development. In Brazil, it is estimated that more than 75% of the energy used in the country comes from the burning of coal, firewood, petroleum derivatives, charcoal and biomass, that is, by combustion processes. The inconvenience of using these processes is air pollution, a topic that has been widely researched in recent decades and is characterized as a factor of great relevance in the search for the preservation of the environment and in the execution of sustainable development, as its effects affect human health, ecosystems and materials in many ways. The first step to better use this form of energy conversion is to understand how the combustion process takes place, which variables can be changed, aiming at efficiency and reduction in the emission of pollutants. In this work, the influence of the type of coal and operating conditions on the combustion process was studied, through the elaboration of a mass balance model and also through the comparison of real values measured in a pulverized-coal-fired power plant. The emissions of SO₂ and NO_x pollutants were analyzed as a function of coal composition and individual variations of the excess air coefficient were also tested, thus observing the influence of this variable on CO and NO_x emissions. Through the analysis of the composition of the coals, it was examined that the SO₂ emission is directly proportional to the sulfur content of the coal. In the tests, it was noticed that excess air exerts a small influence on the formation of total NO_x from coal combustion, and an increase in this variable decreases the emission of NO_x. Regarding CO emission, there was a more considerable decrease of this pollutant when the excess air was increased. Comparing the results of the analysis of the combustion gases measured in the industrial plant with the values calculated by the model, a good agreement was verified, making it useful for the analysis of different combustion scenarios.

Keywords: coal, combustion, emission, pollutants

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico do Fornecimento de Energia por Combustível em 1971 e 2018...	16
Figura 2 - Composição química dos carvões minerais.....	22
Figura 3 - UTE's à carvão mineral em operação em 08/09/2021	24
Figura 4 - Emissão de poluentes na combustão	35
Figura 5 - Técnicas de redução das emissões de enxofre aplicadas a uma planta Industrial.....	38
Figura 6 - Combustor de leito fluidizado.....	39
Figura 7 - Precipitador eletroestático.....	41
Figura 8 - Separador com filtros de mangas do tipo vibrador.....	42
Figura 9 - Ciclone simples.....	43
Figura 10 - Atuação do teor de enxofre do carvão na emissão de SO _x	58
Figura 11 - Gráfico do % de excesso de O ₂ nos gases de exaustão em função do % de excesso de ar para queima do carvão 4.....	59
Figura 12 - Influência do excesso de ar na emissão de NO _x para o carvão 4	60
Figura 13 - Influência do excesso de ar na emissão de CO para o carvão 4	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte no Brasil.....	16
Tabela 2 - Evolução da Oferta Interna de Energia por Fonte	17
Tabela 3 - Reservas, produção e consumo de carvão mineral no mundo em 2020..	23
Tabela 4 - Relação entre Fontes e seus Poluentes Característicos.....	33
Tabela 5 - Padrões nacionais de qualidade do ar	34
Tabela 6 – Composição do combustível referência*	44
Tabela 7 - Composição aproximada do ar seco	45
Tabela 8 - Parâmetros do Ar seco considerado nesse estudo	46
Tabela 9 - Parâmetros químicos do carvão.....	46
Tabela 10 - Cálculo do O ₂ requerido para a reação de combustão estequiométrica do carvão exemplo	48
Tabela 11 - Cálculo da composição (em volume) dos gases de combustão para a reação de combustão estequiométrica do carvão exemplo	49
Tabela 12 - Cálculo da composição (em volume) dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base úmida	51
Tabela 13 - Cálculo da composição (mássica) e concentração dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base úmida.....	52
Tabela 14 - Cálculo da composição (mássica) e concentração dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base seca.....	52
Tabela 15 - Concentração final dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base seca.....	53
Tabela 16 - Análise elementar dos carvões	55
Tabela 17 – Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 02/02/21 – Carvão 1	55
Tabela 18 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 17/02/21 – Carvão 2	56
Tabela 19 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 11/07/21 – Carvão 5	56
Tabela 20 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 11/06/21 – Carvão 4	56

Tabela 21 - Atuação do teor de enxofre do carvão na emissão de SO _x	57
Tabela 22 - Atuação do teor de nitrogênio do carvão na emissão de NO _x	59
Tabela 23 - Influência do excesso de ar na emissão de NO _x para o carvão 4	60
Tabela 24 - Influência do excesso de ar na emissão de CO para o carvão 4	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivos Gerais	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Combustão	20
3.2	Combustão de carvão	21
3.2.1	Carvão Mineral	21
3.2.2	Processos industriais de combustão de carvão	24
3.3	Estequiometria	26
3.4	Poluentes atmosféricos e seu controle	28
3.4.1	Poluente Primário	29
3.4.2	Poluente Secundário	29
3.4.3	Poluentes Primários, Secundários e seus efeitos	29
3.4.4	Fontes de Poluição	32
3.4.5	Padrões de Qualidade do Ar	33
3.4.6	Tecnologias para Controle da Poluição	34
4	METODOLOGIA	44
4.1	Aquisição de Dados	44
4.2	Combustão sem excesso de ar	45
4.3	Combustão com excesso de ar	49
4.4	Cálculos da concentração dos componentes dos gases de combustão	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Caracterização dos carvões	54
5.2	Verificação do modelo de combustão	55

5.3	Influência da composição do carvão nas emissões de SO_x e NO_x	57
5.4	Influência do excesso de ar nas emissões dos gases de exaustão	59
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65

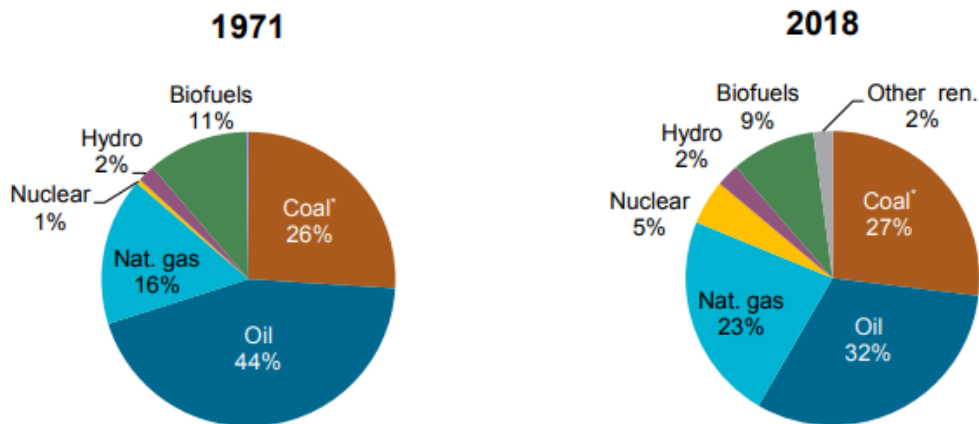
1 INTRODUÇÃO

O crescimento sustentável de um país, com evolução social, econômica e ambiental é altamente vinculada com a disponibilidade e oferta de energia. Observa-se na Figura 1 que os processos de combustão são responsáveis por mais de 80% da energia utilizada pelo homem em um período de quase 50 anos. Este método transpassa quase todos os setores de uma sociedade, seja em qualquer parte do mundo, apesar do grau de desenvolvimento. Diante disso, a combustão é um meio estratégico para a economia dos países. Hoje no Brasil, avalia-se que mais de 75% da energia empregada no país seja proveniente da queima de carvão mineral, lenha, derivados de petróleo, carvão vegetal e biomassas, isto é, por processos de combustão. Esse processo tem grande efeito no setor industrial, agricultura, nos transportes e na produção de energia elétrica, portanto, no próprio desenvolvimento.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, a oferta mundial de energia em 2018 foi de 1,353 tep/hab, 93,6% maior que a oferta mundial em 1971 com 0,699 tep/hab. Na Figura 1 são apresentadas essas ofertas por tipos de fontes para os dois anos em destaque. Mediante os gráficos, nota-se a variação de algumas fontes, como o caso da energia nuclear e do gás natural que tiveram um aumento de 4 e 7% respectivamente, e também o petróleo, que experimentou uma queda considerável de 44% para 32%.

Já no Brasil, é possível ver, a partir da Tabela 1 (Oferta Interna de Energia por Fonte no Brasil), que de 1970 a 2019, a oferta de energia aumentou mais de quatro vezes. Na Tabela 2 observa-se a evolução da oferta interna de energia por fonte em porcentagem entre os anos de 1970 até 2019. No Brasil houve uma forte queda na oferta de lenha declinando de 47,58% em 1970 para 8,75% em 2019. Por outro lado, verifica-se uma variação no sentido oposto na oferta do petróleo, gás natural e derivados crescendo 37,97% em 1970 para 46,58% em 2019. É notório também um aumento relevante na oferta de energia hidráulica e nos produtos de cana.

Figura 1 - Gráfico do Fornecimento de Energia por Combustível em 1971 e 2018



Fonte: IEA, 2020

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte no Brasil

Fontes	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2018	2019
Petróleo, Gás Natural e Derivados	25.420	56.509	62.085	96.999	129.250	152.807	135.532	136.960
Carvão Mineral e Derivados	2.437	5.902	9.598	12.999	14.462	17.625	16.418	15.480
Hidráulica e Eletricidade	3.420	11.063	20.051	29.980	37.663	33.897	36.460	36.364
Lenha e Carvão vegetal	31.852	31.083	28.537	23.060	25.998	24.900	25.511	25.725
Produtos da Cana	3.593	9.129	18.988	20.761	47.102	50.648	50.090	52.841
Eólica				0	187	1.860	4.169	4.815
Solar					-	5	298	572
Outras	223	1.010	2.782	6.244	14.044	18.142	21.393	21.279
Total	66.946	114.698	142.041	190.043	268.706	299.883	289.870	294.036

Fonte: BEN, 2020

Unidade: 10³ tep

Tabela 2 - Evolução da Oferta Interna de Energia por Fonte

Fontes	1970	1980	1990	2000	2010	2015	2018	2019
Petróleo, Gás Natural e Derivados	37,97%	49,27%	43,71%	51,04%	48,10%	50,96%	46,76%	46,58%
Carvão Mineral e Derivados	3,64%	5,15%	6,76%	6,84%	5,38%	5,88%	5,66%	5,26%
Hidráulica e Eletricidade	5,11%	9,65%	14,12%	15,78%	14,02%	11,30%	12,58%	12,37%
Lenha e Carvão vegetal	47,58%	27,10%	20,09%	12,13%	9,68%	8,30%	8,80%	8,75%
Produtos da Cana	5,37%	7,96%	13,37%	10,92%	17,53%	16,89%	17,28%	17,97%
Eólica				0,00%	0,07%	0,62%	1,44%	1,64%
Solar					0,00%	0,00%	0,10%	0,19%
Outras	0,33%	0,88%	1,96%	3,29%	5,23%	6,05%	7,38%	7,24%

Fonte: BEN, 2020

Além disso, é possível observar um aumento gradativo na produção total de energia primária no País. Nas fontes não renováveis há um crescimento progressivo ao longo dos anos, porém, por volta de 2015 inicia-se uma leve queda na oferta. Nas ofertas de energia renováveis similarmente observa-se um impulso década a década, com exceção na Lenha e Carvão Vegetal que sofre constantes quedas. Esse aumento no consumo de energia tanto no Brasil como no mundo é explicado pela ligeira evolução dos países em desenvolvimento e seus habitantes e também pela mudança nos hábitos que as tecnologias proporcionam às populações. A partir disso, percebe-se a necessidade de estudos e elaboração de técnicas mais eficazes para a queima de combustíveis, a fim de melhorar o rendimento da energia oriundo dos mesmos e também a atenuação das agressões ao meio ambiente.

Por isso, o conhecimento sobre a combustão torna-se mais importante hoje devido ao aumento no consumo de energia, associado a necessidade do uso racional dos recursos energéticos. Essa alta na demanda de energia provém, essencialmente, do crescimento populacional humano e da industrialização. No entanto, apesar de existir uma polaridade na discussão sobre as mudanças climáticas com visões antropogênica versus natural, o aquecimento global, poluição do ar, queimadas,

empobrecimento dos recursos naturais e malefícios a saúde pública são consequências que são muitas vezes relacionadas a esse processo de combustão.

Hoje o uso excessivo dos combustíveis fósseis, como o carvão, que demoraram séculos para sua formação, tem causado, para parte da comunidade científica, danos à atmosfera e ao balanço térmico do planeta. Em consequência disso, há uma forte pressão para mudanças na matriz energética de fóssil para renovável para garantir o desenvolvimento mais sustentável. Em contrapartida, com a atual crise energética mundial, os países recorrem às fontes não renováveis, como o carvão. Um exemplo é o Brasil que, diante de uma crise hídrica, no mês de agosto de 2021 bateu o recorde em geração de energia gerada por termelétricas, desde o início da série histórica, iniciada em 1999 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), segundo o jornal CNN Brasil. Tal fato põe em xeque se a mudança de matriz energética terá capacidade para suprir a demanda de energia do mundo.

Com base em todos esses aspectos acima abordados, há um grande empenho sendo aplicado para conseguir-se amenizar os efeitos ambientais, tanto com modos mais eficientes e econômicos de redução das emissões de poluentes quanto a otimização dos processos de combustão. Sendo assim, identificou-se a necessidade de analisar alguns fatores que influenciam esse processo em uma usina termelétrica a carvão pulverizado. Logo, a proposta deste trabalho visa, por meio da elaboração de um modelo de balanço de massa auxiliado a partir da coleta de dados reais, examinar diferentes condições de queima a fim de analisar as emissões dos gases de combustão em função da composição do carvão e do excesso de ar.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho busca verificar a influência da qualidade do carvão e das condições de operação no processo de combustão de carvão mineral em uma Usina Termelétrica por meio do desenvolvimento de um modelo que possibilita ao usuário explorar diferentes hipóteses intervindo tanto nas condições de queima como na escolha do carvão.

2.2 Objetivos Específicos

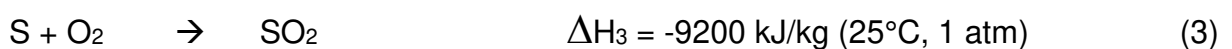
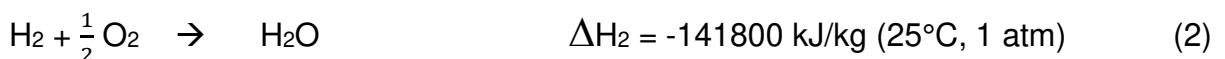
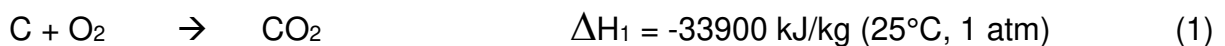
Analisar as emissões de SO_2 e NO_x como uma função da composição do carvão e também realizar testes de diferentes cenários para verificar a ação da variável excesso de ar nas emissões de CO e NO_x .

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Combustão

Os processos de combustão é um dos principais fornecedores de energia para nossa sociedade. Nesse processo, o combustível reage com o oxidante, que na maior parte das aplicações industriais é o ar atmosférico, e libera grandes quantidade de energia através de uma reação exotérmica. O ar atmosférico é constituído, em volume, por 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases (neônio, hélio, metano, etc.) (CARVALHO JUNIOR; MACQUAY, 2007). Porém, apenas o O₂ é elemento ativo no processo de combustão para a produção de calor. O N₂ não participa ativamente no processo de combustão, sendo o elemento responsável pela formação dos NO_x (DE LAS OBRAS-LOSCERTALES et al., 2015).

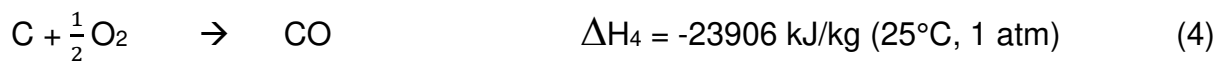
De acordo com Moran *et al.* (2013), quando uma reação química acontece, as ligações entre as moléculas dos reagentes são quebradas e os átomos e elétrons rearranjam-se formando os produtos. Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustíveis do combustível resulta em uma liberação de energia à medida que os produtos de combustão são formados. Na maior parte dos combustíveis os três principais elementos químicos que oxidam são o carbono, o hidrogênio e o enxofre. Geralmente, o enxofre praticamente não contribui para a liberação de energia como é mostrado nas reações abaixo, mas ele pode ser a origem relevante de problemas de poluição e corrosão.



As reações exotérmicas acima demonstram, para grande parte dos combustíveis industriais, a chamada combustão completa. Ela ocorre quando o

carbono queima convertendo-se em dióxido de carbono, o hidrogênio em água e o enxofre em dióxido de enxofre, sendo a quantidade de calor liberada em cada reação denominada de calor de combustão.

Já a combustão incompleta ocorre quando nos produtos resultantes desta reação mostram-se substâncias combustíveis, como por exemplo carbono nas cinzas, escórias e fuligem; gases combustíveis como hidrogênio, hidrocarbonetos gasosos e monóxido de carbono na fumaça (TORREIRA, 1995). Essa reação de combustão incompleta do carbono presente no combustível é mostrada pela equação:



3.2 Combustão de carvão

3.2.1 Carvão Mineral

O carvão mineral é um combustível natural fóssil, resultante da transformação da matéria vegetal de grandes florestas soterradas há milhões de anos e sujeitas à ação da pressão, temperatura e bactérias. A pressão do solo, calor e movimento da crosta terrestre produziram a destilação dos produtos gasosos dos pântanos para formar lignitos. A contínua atividade subterrânea propiciou a redução progressiva do conteúdo gasoso dos carvões, resultando em carvões de diferentes classificações (rank): turfa, lignito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito (ABCM, 2021).

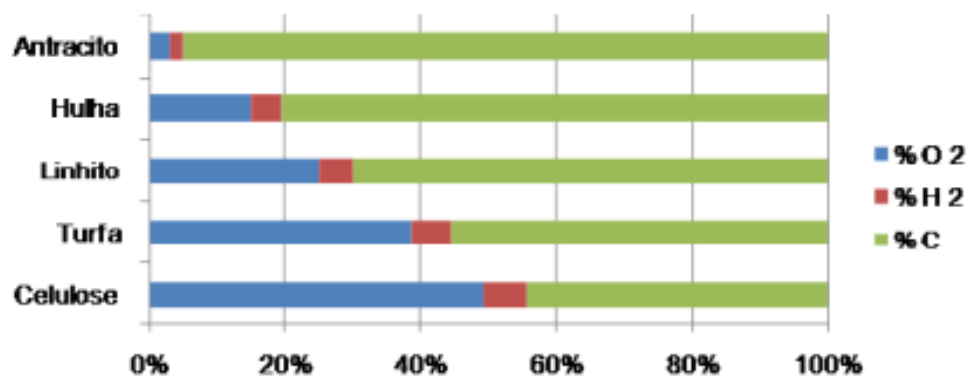
O carbono é o principal elemento presente no carvão mineral, embora sejam encontradas em sua composição outras substâncias, como o enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio. O teor de carbono é importante porque ele determina a maturidade geológica deste mineral, denominada rank, ou seja, o estágio de carbonificação atingido na sequência evolutiva. A umidade, o poder calorífico, os teores de carbono e hidrogênio ou a fluorescência, são propriedades que permitem estimar o rank, uma vez que a elevação da carbonificação aumenta o poder refletor e reduz o hidrogênio e as matérias voláteis (ANM, 2021).

Tanto o carvão vegetal quanto o mineral podem ser usados na indústria (principalmente siderúrgica) e na produção de energia elétrica. No entanto, enquanto o primeiro é pouco utilizado – exceto no Brasil, maior produtor mundial – o consumo

do segundo está bastante aquecido. Este movimento tem a ver não só com a disponibilidade de reservas, mas com a qualidade do carvão, medida pela capacidade de produção de calor em sua queima – ou poder calorífico, expresso em kcal/kg (quilocalorias geradas por quilo de combustível queimado). Este poder calorífico, por sua vez, é favorecido pela incidência de carbono e prejudicado pela quantidade de impurezas argilominerais (elementos rochosos e minerais) (ANEEL, 2008).

Por isto, o desenvolvimento deste combustível é indicado por quatro etapas distintas, nas quais, a turfa é a composição inicial, medida pelo reduzido teor de carbono, o linhito, o sub-betuminoso e betuminoso (hulha) e o antracito seguem, de acordo com o rank, respectivamente.

Figura 2 - Composição química dos carvões minerais



Fonte: ANM, 2021

A eficiência de combustão depende do tipo e do estágio dos compostos orgânicos presentes no minério. Podem ser observados quatro estágios, nos quais o teor de carbono varia em função do tempo dedicado ao processo de fossilização. O primeiro estágio corresponde à turfa, que ocorre devido à decomposição e putrefação de vegetais em ambientes de várzeas ou pântanos (conteúdo carbonáceo na ordem de 45%).

O segundo estágio corresponde ao linhito, um carvão que apresenta ambos, baixo grau de carbonificação e poder calorífico a partir de uma base úmida, além de conter de 60 a 75% de orgânicos. Os tipos sub-betuminoso e betuminoso (ou hulha) referem-se ao terceiro estágio e se diferenciam pelo teor de oxigênio: 12 a 21% (sub-betuminoso) e 5 a 20% (betuminoso), e apresentam alto teor de carbono (75 a 85%). O carvão sub-betuminoso apresenta um grau de carbonificação ligeiramente superior

ao apresentado pelo linhito e é classificado em três grupos em uma ordem decrescente de poder calorífico: sub-betuminoso A, B e C. Já o carvão betuminoso apresenta um alto grau de carbonificação, possuindo menos que 86% de carbono fixo, 14% de matéria volátil em uma base seca. Esse tipo de carvão está subdividido em cinco grupos de carvão a partir de uma ordem decrescente de poder calorífico e carbono fixo e crescente de matéria volátil: betuminoso de baixo volátil e médio volátil, betuminoso de grande volátil A, betuminoso de grande volátil B e betuminoso de grande volátil C.

O último estágio corresponde ao antracito, o carvão de maior grau de carbonificação, apresentando mais que 86% de carbono fixo e menos que 14% de matéria volátil em uma base seca, livre de matéria mineral. Esse tipo de carvão está subdividido em três grupos em uma ordem decrescente de carbono fixo e conteúdo crescente de matéria volátil: meta-antracito, antracito e semi-antracito (classificações ASTM).

A abundância do carvão mineral, com reservas provadas da ordem de 1 trilhão de toneladas, segundo o Statistical Review of World Energy 2021 da British Petroleum, é capaz de atender à demanda atual por mais de cem anos. A Tabela 3 ilustra as reservas, produção e consumo das regiões do mundo, onde os Estados Unidos, Rússia e Austrália lideram com as maiores reservas.

Tabela 3 - Reservas, produção e consumo de carvão mineral no mundo em 2020

	Reservas		Produção		Consumo	
	Milhão ton	Participação no total	Milhão ton	Participação no total	Milhão tEP	Participação no total
América do Norte	256734,0	23,9%	11,76	7,4%	9,91	6,5%
América do Sul e Central	13689,0	1,3%	1,60	1,0%	1,48	1,0%
Europa	137240,0	12,8%	5,53	3,5%	9,40	6,2%
CEI	190655,0	17,8%	10,58	6,6%	5,17	3,4%
África e Oriente Médio	16040,0	1,5%	6,52	4,1%	4,49	3,0%
Ásia e Oceania	459750,0	42,8%	123,62	77,5%	120,97	79,9%
Total	1074108,0	100,0%	159,61	100,0%	151,42	100,0%
Brasil	6596,0	0,6%	0,09	0,06%	0,58	0,4%

Fonte: British Petroleum, Statistical Review of World Energy, 2021

No Brasil, a mineração ocorre no sul do país, sendo que as maiores jazidas se encontram nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, com produção de carvão energético equivalente a 53,78%, 44,15% e 2,07% respectivamente (ABCM, 2021). Infelizmente, este carvão é energeticamente pobre devido ao alto teor de impurezas presente em sua composição. Logo, o beneficiamento e o transporte ficam prejudicados do ponto de vista econômico e, por este motivo, a maioria das usinas acabam sendo comissionadas ao lado das minas de lavragem (Tolmasquim, 2016). Hoje, as principais usinas termelétricas em operação no país se concentram nos estados do Ceará, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, e Maranhão.

Figura 3 - UTE's à carvão mineral em operação em 08/09/2021

Origem	UF	Tipo	Combustível Final	Qtde	Potência Outorgada (kW)
Fóssil	CE	Carvão mineral	Carvão Mineral	2	1.085.274,00
Fóssil	SC	Carvão mineral	Carvão Mineral	4	862.000,00
Fóssil	RS	Carvão mineral	Carvão Mineral	2	695.000,00
Fóssil	MA	Carvão mineral	Carvão Mineral	2	435.337,00
Fóssil	PA	Carvão mineral	Carvão Mineral	1	103.854,00
Fóssil	PR	Carvão mineral	Carvão Mineral	1	20.000,00
Fóssil	MG	Carvão mineral	Carvão Mineral	1	1.275,00
Total				13	3.202.740,00

Fonte: SIGA, Matriz por Fonte e Combustível Final, 2021

3.2.2 Processos industriais de combustão de carvão

A utilização de carvão mineral na produção de energia requer o uso de tecnologias que poluem menos o planeta devido às questões climáticas ocasionadas pelo efeito dos gases de estufa (CO₂) e gases poluentes de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x). Sendo assim, as principais tecnologias usadas para a geração de energia com base no carvão são:

- Combustão de carvão em leito fluidizado;
- Ciclo combinado integrado com gaseificação de carvão; e
- Processos que utilizam carvão pulverizado.

3.2.2.1 Combustão em Leito Fluidizado

A tecnologia de leito fluidizado consiste na queima de um combustível sólido convenientemente preparado, em um leito de material inerte (geralmente areia) que se encontra fluidizado devido ao escoamento de um gás (ar). Esta tecnologia permite um contato eficiente entre as fases gás-sólido, opera a temperaturas mais baixas, em torno de 700-900 °C, o que possibilita a redução de gases de efeito estufa como óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), além de possibilitar a utilização de carvões de baixo rank (Philippsen, 2018). O seu potencial para utilizar absorvedores de baixo custo na captura do enxofre (in situ), dentro do leito, é uma das características mais atrativas dos leitos borbulhantes e circulantes (Gonçalves Filho, 2012). Por apresentar alta eficiência de queima e controle ambiental, a tecnologia de leito fluidizado se adapta muito bem no processo de combustão do carvão nacional (Samaniego, 2011).

3.2.2.2 Ciclo Combinado Integrado com Gaseificação

O Ciclo Combinado com Gasificação Integrada (Integrated Gasification Combined Cycle, ou IGCC) se caracteriza pela combinação de duas tecnologias: a geração de energia em ciclo combinado e a gaseificação de combustíveis sólidos ou líquidos. A geração em ciclo combinado se destaca por sua alta eficiência (Rochedo, 2011).

A gaseificação do carvão fornece a possibilidade de se beneficiar da alta eficiência da tecnologia do ciclo combinado e ao mesmo tempo utiliza um combustível com reservas consideráveis nos principais mercados consumidores, de preço baixo e estável. Além disso, a gasificação não se restringe ao consumo do carvão, mas se aplica a vários outros combustíveis sólidos e líquidos de baixo valor tais como biomassa, coque de petróleo e resíduos de refinaria.

O ciclo se inicia com a gaseificação do carvão, a qual resulta na geração de um gás sintetizado (syngas) e vapor. O syngas passa por uma remoção de enxofre, mercúrio e particulados, e é destinado a uma turbina a combustão que o utiliza como combustível. Os gases de exaustão da turbina a combustão, em consonância ao vapor gerado na gaseificação, passam por um reaproveitador de calor, o qual produz vapor

para movimentar uma turbina acoplada a um gerador, completando o ciclo (Magnus, Tavares e Salvaro, 2017).

3.2.2.2 Combustão de Carvão Pulverizado

Sistemas de Combustão Pulverizada de Carvão (PCC - Pulverized Coal Combustion System) é uma das tecnologias mais utilizadas para a combustão de carvão e geração de energia elétrica no mundo, e se baseia em muitas décadas de experiência e aprimoramentos. A tecnologia está muito bem desenvolvida, existindo um grande número de unidades operando no mundo (mais de 90% das unidades em operação) (Tolmasquim, 2016).

O carvão depois de beneficiado e pulverizado é admitido na caldeira pneumaticamente com ar de combustão (ar primário) através de uma série de bicos queimadores. É usado ar secundário e em alguns casos, ar terciário. Dependendo do tipo de carvão a temperatura de operação fica na faixa dos 1300 a 1500°C. O tempo médio de permanência do combustível na caldeira é normalmente de 2 a 5 segundos. É utilizada para uma gama grande de carvões, entretanto com restrições à carvões com altos teor de cinzas (Tolmasquim, 2016).

Em queimadores de baixo NO_x, o excesso de ar é administrado de tal forma que a combustão se realize a mais próxima possível da combustão completa, permitindo a queima de todo carbono contido no carvão e com a mínima formação de NO_x, satisfazendo assim, às exigências ambientais quanto às emissões de NO_x para a atmosfera. Isso é conseguido diminuindo a quantidade de ar introduzido na zona de combustão primária, criando assim um ambiente rico em combustível e carente de oxigênio. Um ar adicional (secundário ou terciário) é adicionado após a zona de combustão primária para completar a queima do carvão. Além disso, o controle do SO_x pode ser realizado utilizando-se o sistema FGD (Flue Gas Desulphurization) após a combustão.

3.3 Estequiometria

Um processo de combustão pode ser considerado completo quando um combustível recebe a quantidade de oxigênio para que todo o hidrogênio, carbono e enxofre sejam oxidados para água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de

enxofre (SO₂) respectivamente (CARVALHO e MCQUAY, 2007). Esta quantidade de oxigênio é chamada de estequiométrica ou teórica.

Um simples balanço estequiométrico da reação química de combustão determina a razão estequiométrica ar-combustível ou oxidante-combustível, considerando que o combustível reage para formar uma quantidade ideal de produtos. Se a parcela disponibilizada de oxidante for maior que a estequiométrica, considera-se que a mistura é pobre. Prover uma quantidade de oxidante menor que a estequiométrica ocasiona em uma mistura rica.

A razão ar-combustível estequiométrica pode ser encontrada conforme a equação 5:

$$\overline{A/F}_{esteq} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{esteq} \quad (5)$$

onde $\overline{A/F}_{esteq}$ é a relação ar-combustível estequiométrica na mistura, m_{air} é a massa de ar e m_{fuel} é a massa de combustível compreendidos na reação de combustão.

O abastecimento de ar é composto por 21% de oxigênio (O₂) e o restante que é de 79% é o nitrogênio (N₂), em que o oxigênio é o único elemento ativo no ar que reage com os elementos combustíveis do combustível para gerar calor. Em contrapartida, a grande quantidade de nitrogênio no ar não exerce nenhuma função proveitosa no processo de combustão, porém, pode causar problemas de poluição do ar, principalmente quando a combustão não for devidamente controlada.

Todo processo de combustão deve atender a princípios que certifique economia ou eficiência na queima de combustível (BAZZO, 1995). Todavia, na prática, em condições normais de operação, é muito complexo o aproveitamento total da energia disponível no combustível, razão pela qual se faz necessário um trabalho de otimização com vistas à minimização das perdas de energia envolvidas no processo de combustão.

Para que a combustão ocorra de forma eficaz, são necessárias algumas condições:

- 1) Temperatura alta o suficiente para iniciar e manter a queima do combustível;
- 2) Mistura adequada de ar com o combustível;
- 3) Tempo suficiente para a ocorrência da reação de combustão.

Normalmente, a quantidade de ar fornecida é maior ou menor que a quantidade estequiométrica. O volume de ar que é de fato suprida é habitualmente expressa em termos da percentagem de ar teórico. Por exemplo, 130% de ar teórico significam que o ar que foi abastecido é 1,3 vezes a quantidade estequiométrica de ar. De outro modo, a parcela fornecida de ar pode ser expressa como uma percentagem de excesso ou percentagem de déficit de ar. Com isso, 130% de ar teórico são correspondentes a 30% de excesso de ar, e 75% de ar teórico é o mesmo que 25% de déficit de ar.

3.4 Poluentes atmosféricos e seu controle

A poluição é um assunto amplamente pesquisado nas últimas décadas e configura-se como um fator de grande relevância na procura da preservação do meio ambiente e na elaboração de um desenvolvimento sustentável, pois seus efeitos impactam de várias formas a saúde humana, os materiais e os ecossistemas.

Com o crescimento econômico, a emissão antrópica de gases e partículas tende a intensificar-se progressivamente, levando ao aumento de sua concentração na atmosfera. Alguns desses gases e partículas têm efeitos comprovados na saúde humana e no meio ambiente, razão pela qual são considerados “poluentes atmosféricos” (SANTA et al, 2012).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 003 de 1990, poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora;
- prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Os poluentes podem ainda ser classificados de primários e secundários de acordo com o momento em que se formam. Posto isso, o poluente formado inicialmente, de acordo com o tipo de processo químico envolvido na reação, pode ser:

- Primário
- Secundário

3.4.1 Poluente Primário

São os poluentes formados inicialmente e lançados na atmosfera, conferindo condições para outras reações (secundárias), capazes de afetar a estrutura dos componentes gasosos atmosféricos. Os principais poluentes são: CO, CO₂, SO_x, NO_x, Material particulado e VOC's (Volatile Organic Compound). Estes poluentes são resultado de ações naturais, como no caso de vulcões; ou de ações antropogênicas, como no caso de geração de energia através de centrais termelétricas à base de combustível fóssil.

3.4.2 Poluente Secundário

Estes poluentes são formados através da reação dos poluentes primários com água ou gases presentes na atmosfera, sendo a primeira sob a forma de vapor ou líquido, por meio das chuvas. Os principais são: H₂SO₄, HNO₃, HCl e O₃.

3.4.3 Poluentes Primários, Secundários e seus efeitos

3.4.3.1 Monóxido de Carbono (CO)

Segundo Garcia (2013), o monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e sem cor, formado na combustão incompleta de qualquer material carbonoso. É um gás de elevada toxicidade, pois reage com a hemoglobina das hemácias do sangue inviabilizando a troca gasosa entre oxigênio e o gás carbônico nos pulmões. Consequentemente a concentração de CO nos gases de combustão vai depender bastante da temperatura dos gases e do excesso de ar na combustão. Baixos excessos de ar levam a altos teores de CO a uma dada temperatura.

O monóxido de carbono nos gases de chaminé pode ser medido continuamente com um analisador infravermelho ou, se a razão ar/combustível for ajustada para

manter-se constante o teor de CO nestes gases, então o teor de oxigênio medido pode ser indicativo das condições dos queimadores em uma dada carga (BAZZO, 1995).

3.4.3.2 Dióxido de Carbono (CO₂)

A oxidação completa do CO em CO₂ não soluciona totalmente o problema da emissão de poluentes em processos de combustão. A ausência do CO em áreas urbanas é sempre desejável, por causa de sua alta toxicidade. No entanto, o CO₂ na atmosfera é um dos gases que absorvem a radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global, ou seja, o chamado “efeito estufa”. O CO₂ e traços de outros gases permitem a penetração da radiação solar na superfície da Terra, mas reabsorvem a radiação infravermelha emitida desta (CARVALHO e LACAVA, 2003).

3.4.3.3 Óxidos de Enxofre (SO_x)

Na queima dos combustíveis fósseis utilizados pela indústria, o enxofre presente na sua composição é, em sua maioria, oxidado a dióxido de enxofre - SO₂ e a trióxido de enxofre - SO₃. Denominam-se óxidos de enxofre - SO_x, a soma SO₂ mais SO₃. O SO_x lançado na atmosfera causa problemas ambientais e o SO₃, reagindo com a água dos gases de combustão leva à formação de ácido sulfúrico - H₂SO₄, que tem forte ação corrosiva no interior dos equipamentos de combustão (FILHO, 2020).

Dióxido de Enxofre (SO₂) é um gás tóxico e incolor, pode ser emitido por fontes naturais ou por fontes antropogênicas e pode reagir com outros compostos na atmosfera, formando material particulado de diâmetro reduzido (LAGES, 2017). Durante o processo de queima destas fontes, o enxofre reage com o oxigênio, se convertendo em sua maioria a SO₂, segundo a equação 6:



Segundo Carvalho e Lacava (2003), durante a combustão, praticamente todo o enxofre contido no combustível se oxida para SO₂. A concentração resultante do gás nos produtos de combustão é uma função da porcentagem de enxofre contida no combustível e da razão ar/combustível.

3.4.3.4 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Altas concentrações podem ser fatais, em concentrações baixas pode aumentar a vulnerabilidade a infecções, podendo irritar os pulmões, provocar bronquite e pneumonia. Além disso, é tóxico para as plantas, causando redução no crescimento e na fertilidade das sementes. Quando presente em altas concentrações gera uma coloração marrom na atmosfera, sendo um dos precursores da chuva ácida, além de participar do SMOG fotoquímico formando O₃.

NO_x é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. Normalmente, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO₂. Conforme Carvalho e Lacava (2003), em geral, as concentrações de NO₂ na saída das chaminés permanecem bastante baixas. Em baixas temperaturas, a relação NO₂/NO é cerca de 3, mas a concentração de ambos os óxidos é bastante pequena. Essa relação baixa drasticamente para temperaturas mais altas, sendo, geralmente, menor que 0,15 para temperaturas acima de 500 °C.

3.4.3.5 Material Particulado (MP)

De acordo com Braga et al. (2002), o material particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar, sendo que sua composição e tamanho dependem das fontes de emissão. Para Garcia (2013), material particulado é a denominação genérica que engloba fumaça, fuligem e cinzas. Fuligem são pequenas partículas de carbono e material carbonoso, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas com as cinzas resultantes da combustão completa do restante do combustível. Na prática, a fuligem se caracteriza pelo teor escuro presente nos gases de exaustão. A fumaça propriamente dita é constituída por gotícula de hidrocarbonetos ou outros produtos químicos voláteis não queimados.

O material particulado é a forma de poluição mais frequentemente nítida, pela interferência na visibilidade. Os veículos com motor a diesel emitem fuligem e materiais particulados na atmosfera. As partículas mais prejudiciais à saúde são as de diâmetro menor que 5 µm, que chegam aos alvéolos pulmonares e são chamadas

de inaláveis. Estas partículas aumentam a mortalidade geral, podem adsorver e conduzir poluentes tóxicos para as partes mais internas do aparelho respiratório e, na presença de SO₂, aumenta a ocorrência e a gravidade de doenças respiratórias, reduz a visibilidade, suja materiais e construções.

3.4.3.6 Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs)

São gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos, sendo emitidos pelos veículos, pelas indústrias, pelos processos de estocagem e transferência de combustível etc. Muitos desses compostos, participam ativamente das reações de formação do ozônio.

Dentre os compostos orgânicos voláteis presentes nas atmosferas urbanas estão os compostos aromáticos monocíclicos, em particular: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. Os aromáticos monocíclicos são precursores do ozônio e alguns desses compostos podem causar efeitos adversos à saúde (CETESB, 2021).

3.4.4 Fontes de Poluição

Os modos de emissão de poluentes são categorizados de acordo com a origem do poluente em naturais (como partículas dos solos, as emissões vulcânicas, os incêndios florestais, as gotículas de água salgada dos oceanos, etc.), ou de origem antropogênica, que resultam das inúmeras atividades humanas.

As várias fontes de poluição do ar podem ser classificadas do seguinte modo (Monteiro Júnior, 2008):

- Fontes estacionárias ou fontes fixas: que podem ser subdivididas em dois grupos: um abrangendo atividades pouco representativas nas áreas urbanas, como queimadas e queima de combustíveis em padaria, hotéis e outras atividades consideradas não industriais; outro formado por atividades individualmente significativas, em vista à variedade ou intensidade de poluentes emitidos, como a poluição dos processos industriais.
- Fontes móveis: são todos os meios de transporte aéreo, marítimo e terrestre que utilizam motores à combustão como força motriz.
- Fontes naturais: são todos os processos naturais de emissão que vêm ocorrendo durante milhares de anos, como atividades vulcânicas, os aerossóis

marinhos, a liberação de hidrocarbonetos pelas plantas, a ação eólica entre outros.

Tabela 4 - Relação entre Fontes e seus Poluentes Característicos

Fontes		Poluentes
Classificação	Tipo	
Fontes Estacionárias	Combustão	Material particulado
		Dióxido de enxofre e trióxido de enxofre
		Monóxido de carbono
		Hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio
	Processo Industrial	Material particulado (fumos, poeiras e névoas)
		Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl e Hidrocarbonetos
		Mercaptans, HF, H ₂ S, NO _x
Queima de Resíduos Sólidos	Material particulado	
	Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x	
Outros	Hidrocarbonetos, material particulado	
Fontes Móveis	Veículos Automotores	Material particulado, monóxido de carbono, Óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e óxidos de enxofre
	Aviões e Barcos	Óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio
	Locomotivas	Ácidos orgânicos, hidrocarbonetos e aldeídos
Fontes Naturais		Material particulado - poeiras
		Gases - SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x , hidrocarbonetos
Reações Químicas		Poluentes secundários - O ₃ , aldeídos
		Ácidos orgânicos, nitratos orgânicos
		Aerossol fotoquímico, etc.

Fonte: Monteiro Júnior, 2008

3.4.5 Padrões de Qualidade do Ar

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão consultivo e resolutivo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente no Brasil. É de seu compromisso estabelecer regulamentos e critérios para o licenciamento de atividades provadas ou potencialmente poluidoras.

Os padrões de qualidade do ar (PQAr) são os níveis legais de concentração máximas permitidas de emissão de poluentes atmosféricos, definidos pelos órgãos reguladores. Os seus propósitos são de proteger a população e criar metas para orientar as propostas regionais de controle de poluição do ar.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar foram definidos pela Resolução CONAMA nº 3/1990, sendo de acordo com esta resolução divididos em padrões

primários e secundários. Os padrões primários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes que, excedidas, poderão acometer a saúde da população. Os padrões secundários são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito danoso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Segundo a resolução, os padrões de qualidade estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Padrões nacionais de qualidade do ar

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁴⁾	PADRÃO SECUNDÁRIO $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁴⁾	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas Totais em Suspensão	24 horas ⁽¹⁾	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA ⁽²⁾	80	60	
Dióxido de Enxofre	24 horas ⁽¹⁾	365	100	Pararosanilina
	MAA ⁽³⁾	80	40	
Monóxido de Carbono	1 hora ⁽¹⁾	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)	Infravermelho não dispersivo
	8 horas ⁽¹⁾	10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)	
Ozônio	1 hora ⁽¹⁾	160	160	Quimiluminescência
Fumaça	24 horas ⁽¹⁾	150	100	Refletância
	MAA ⁽³⁾	60	40	
Partículas Inaláveis	24 horas ⁽¹⁾	150	150	Separação Inercial/Filtração
	MAA ⁽³⁾	50	50	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora ⁽¹⁾	320	190	Quimiluminescência
	MAA ⁽³⁾	100	100	

Fonte: Adaptado de CONAMA, 1990

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

(2) Média geométrica anual (MGA).

(3) Média aritmética anual (MAA).

(4) A condição de referência para a concentração é de 25°C e pressão de 760 mmHg.

3.4.6 Tecnologias para Controle da Poluição

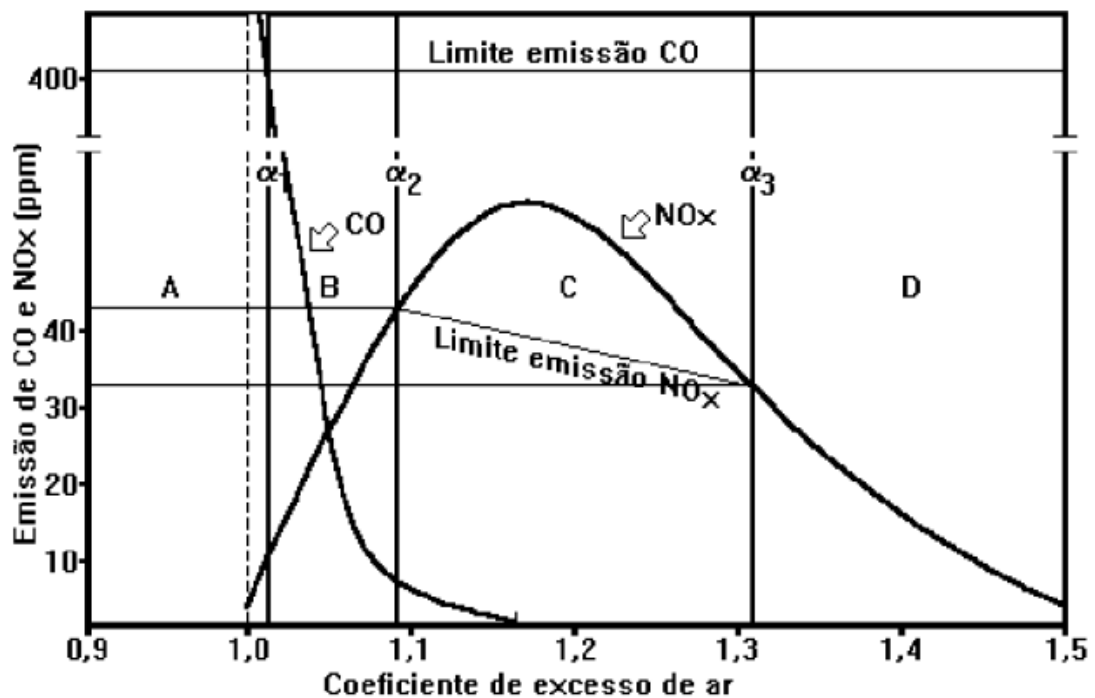
3.4.6.1 Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) resulta da combustão incompleta. Não somente contribui para a poluição atmosférica, como também representa uma perda de energia. Na presença de excesso de ar, a concentração de equilíbrio de CO em baixas temperaturas é desprezível, contudo, em temperaturas de chama, o equilíbrio favorece a presença de CO. A formação de monóxido de carbono está diretamente relacionada com a mistura do combustível e do ar à temperatura de combustão, esta

mistura tem que estar com a razão direcionada para o lado do ar, obtendo um excesso de ar que não se verifique emissões de CO nos gases de exaustão.

Pinheiro e Valle (1995) apresentam um gráfico (Figura 4) com os limites ótimos do excesso de ar levando em consideração as emissões de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Segundo os autores a dificuldade da análise e do controle do processo de combustão real é devido ao fato de que o coeficiente de excesso de ar afeta a eficiência e os níveis de emissão de maneiras diferentes e antagônicas. As curvas de emissão de NO_x e CO devem ser analisadas simultaneamente, pois a diminuição de um poluente pode levar ao aumento de formação do outro. Deve ser lembrado que, o teor de CO diminui rapidamente com o aumento do excesso de ar.

Figura 4 - Emissão de poluentes na combustão



Fonte: Pinheiro e Valle, 1995

A combustão com excesso de ar inferior a α_1 (faixa A), não é aceitável, porque o teor de CO nos produtos de combustão excede os limites. Com o excesso de ar entre α_1 e α_2 (faixa B), tem-se uma combustão quase completa e um baixo α . Esta faixa é ideal devido às baixas emissões de CO e NO_x, e à alta eficiência da combustão. Na faixa C, os níveis de emissão de NO_x excedem os limites da norma, e a operação

só é possível com equipamentos de tratamento dos gases efluentes. A eficiência da combustão é inferior à da faixa B, mas ainda é aceitável. Na faixa D, os níveis de emissão de CO e NO_x encontram-se dentro dos limites, mas a eficiência é baixa (Pinheiro e Valle, 1995).

3.4.6.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

O NO_x pode se formar na combustão via três mecanismos: térmico (thermal), combustível (fuel) e imediato (prompt), recebendo a denominação “NO_x térmico”, “NO_x combustível” e “NO_x imediato”, respectivamente (FILHO, 2016).

- NO_x térmico: se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do ar com oxigênio. Entre os parâmetros operacionais do processo, a temperatura é a que tem maior influência na sua formação. O NO_x é formado principalmente em regiões da câmara de combustão onde as temperaturas são superiores a aproximadamente 1370 °C (FILHO, 2016).
- NO_x combustível: se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do combustível com oxigênio. As maiores taxas de formação de NO_x são encontradas em regiões da câmara de combustão onde o teor de oxigênio é elevado. A queima de combustíveis com maior teor de nitrogênio tende a formar mais NO_x (FILHO, 2016).
- NO_x imediato: se forma pela reação do nitrogênio do ar com radicais hidrocarbônicos (CH₂, CH) formados no processo de combustão. Em processos convencionais que operam com quantidade de ar acima da estequiométrica, a formação de NO_x imediato não é significativa (FILHO, 2016).

Assim, uma tecnologia que auxilia na redução da formação do NO_x são os queimadores Low-NO_x. Essa é a tecnologia mais comum de controle de NO_x, podendo não só serem aplicados em usinas novas de geração como também são facilmente adaptáveis em usinas existentes independente do combustível utilizado. Basicamente, estes queimadores inibem a formação de NO_x por meio do controle da mistura de ar e combustível. Estes queimadores possuem um bico para injetar a mistura ar/combustível e outros dois injetores para o ar, dando ao operador a possibilidade ajustar a proporção de ar e combustível de maneira sub-estequiométrica

na primeira zona de queima e fornecer excesso de oxigênio nas outras zonas. Desta forma, menos NO_x é formado visto que maiores e mais ramificadas chamas são criadas e menores temperaturas de pico são atingidas. Com isso, a eficiência de remoção fica entre 40-60% se comparado com queimadores antigos. Já os queimadores ultra-low NO_x chegam a reduzir 70% (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Outra forma de diminuir as emissões de NO_x está no tratamento dos gases. As tecnologias de tratamento dos gases de exaustão são necessárias quando uma alta eficiência de remoção é necessária por parte dos equipamentos de controle. A tecnologia mais avançada de tratamento de gases é redução catalítica seletiva (SCR). Nela, as espécies de NO_x são reduzidas por fim em N_2 gasoso. No catalisador, amônia, ureia, hidrogênio, monóxido de carbono e até mesmo ácido sulfídrico podem ser utilizados como gás de redução. Amônia anidra é o mais utilizado e mais efetivo para plantas de grande escala. Entretanto, devido sua alta toxicidade, recomenda-se o uso de amônia aquosa ou ureia em regiões de maior densidade populacional. Neste sistema, o gás redutor é injetado na saída do economizador e, ao entrar em contato com os gases de escape, reage com o NO produzindo nitrogênio (N_2) e água. A temperatura ideal de operação é entre 300 e 400°C e a eficiência de remoção chega à 80-90% (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

3.4.6.3 Óxidos de Enxofre (SO_x)

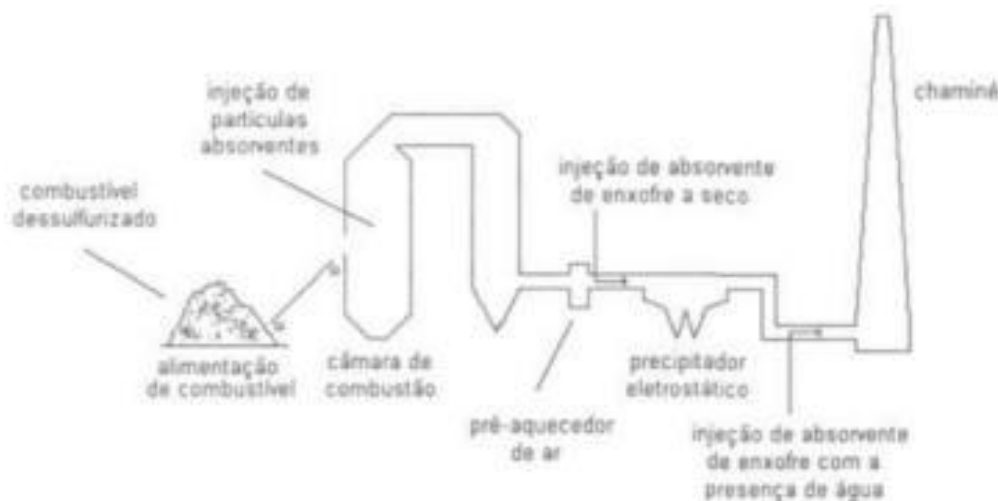
A combustão de combustíveis fósseis para aquecimento e geração de energia é a maior fonte de emissões de SO_x para o ambiente. O SO_x é bastante solúvel na água e, conseqüentemente, é facilmente evaporado e absorvido pelas vias respiratórias. O controle de óxidos de enxofre pode ser realizado através de várias tecnologias, sendo estas aplicáveis principalmente nas fases de combustão e de pós-combustão.

Conforme Carvalho Júnior e Lacava (2003), existe uma variedade muito grande de dispositivos para se reduzir e controlar a emissão de SO_2 . Ainda assim, esses dispositivos se encaixam nos três conceitos básicos de atuação para controle desse poluente:

- A prevenção de sua formação, retirando o enxofre do combustível antes da queima, processo conhecido como dessulfurização do combustível;
- A atuação no processo de combustão de tal forma que um material absorvente reduza o SO₂ formado ainda na câmara de combustão;
- A "limpeza" do gás após a combustão usando material absorvente, processo conhecido como dessulfurização dos produtos de queima.

Na Figura 5 é retratada de forma resumida esses processos.

Figura 5 - Técnicas de redução das emissões de enxofre aplicadas a uma planta Industrial



Fonte: Carvalho Júnior e Lacava, 2003

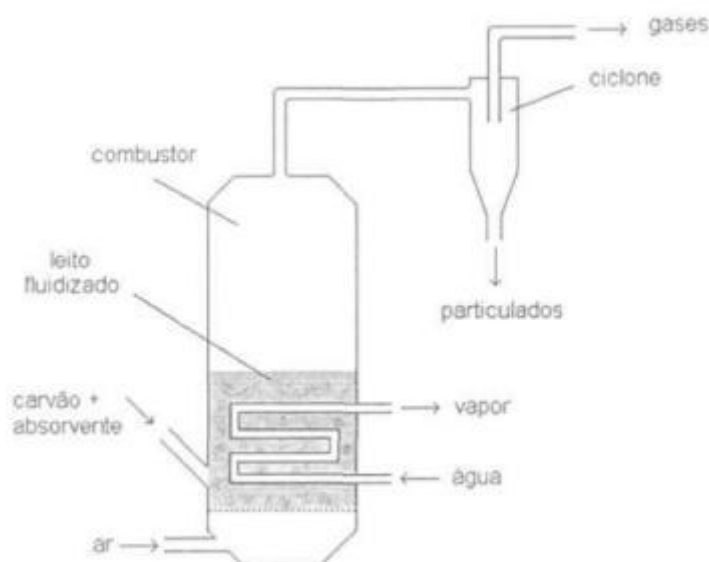
Para o caso de dessulfurização do carvão, inicialmente é necessário que este seja moído para que os cristais de pirita sejam liberados. Uma vez se apresentando em finas partículas, as diferenças de densidade, as características magnéticas, a condutividade, a absorção de umidade etc. entre a matriz orgânica e a pirita fica evidente, podendo então algumas dessas diferenças ser utilizadas para a separação (Carvalho Júnior e Lacava, 2003).

A dessulfurização do carvão ainda é um procedimento muito caro em comparação com a dessulfurização dos gases de combustão, especialmente pelo preparo do combustível e por sua eventual perda durante o processo de separação. No entanto, uma especial atenção vem sendo dada a essa técnica em razão do potencial de se reduzir à metade a emissão de SO₂ sem modificar o processo

industrial. O óleo residual pode ser dessulfurizado na própria refinaria por uma extensão de técnicas conhecidas, mas o custo dessas dessulfurização ainda é alto e, dependendo do mercado, o preço desse combustível pode torná-lo não competitivo (Carvalho Júnior e Lacava, 2003).

Outra técnica usada para reduzir a emissão de SO_2 consiste na alteração do processo de queima. Um combustor do tipo leito fluidizado representa um exemplo de processo modificado. Nesse caso, um material absorvente que pode ser cal, pedra calcária ou dolomita é injetado direto na câmara de leito fluidizado onde o carvão é queimado. A Figura 6 apresenta um combustor de leito fluidizado. Para que o processo de dessulfurização em um combustor de leito fluidizado seja apropriado, é necessário um controle operacional correto que evite o processo de desativar a reação de remoção decorrente da temperatura elevada. Apesar disso, esse controle é mais fácil nesse tipo de combustor do que nos de processo de queima convencional, pois há uma distribuição de temperatura mais uniforme na região de combustão.

Figura 6 - Combustor de leito fluidizado



Fonte: Carvalho Júnior e Lacava, 2003

A forma mais barata de administrar a emissão de SO_2 em uma câmara de combustão convencional seria a injeção do absorvente junto com os reagentes. O calcário injetado reage com o SO_2 e o particulado seco formado é recolhido na

sequência junto com a fuligem em um precipitador eletrostático. Na prática, essa técnica só é eficiente quando utilizada em queimadores projetados para minimizar a emissão de NO_x através do estagiamento da combustão.

Além da dessulfurização do combustível e do controle do processo de combustão, há no mercado uma quantidade relevante de sistemas de dessulfurização dos gases de combustão. A maior parte dos processos desenvolvidos envolve a lavagem dos produtos de combustão com um agente absorvente líquido ou gasoso que contém cal, pedra calcária ou cinza alcalina.

3.4.6.4 Material Particulado (MP)

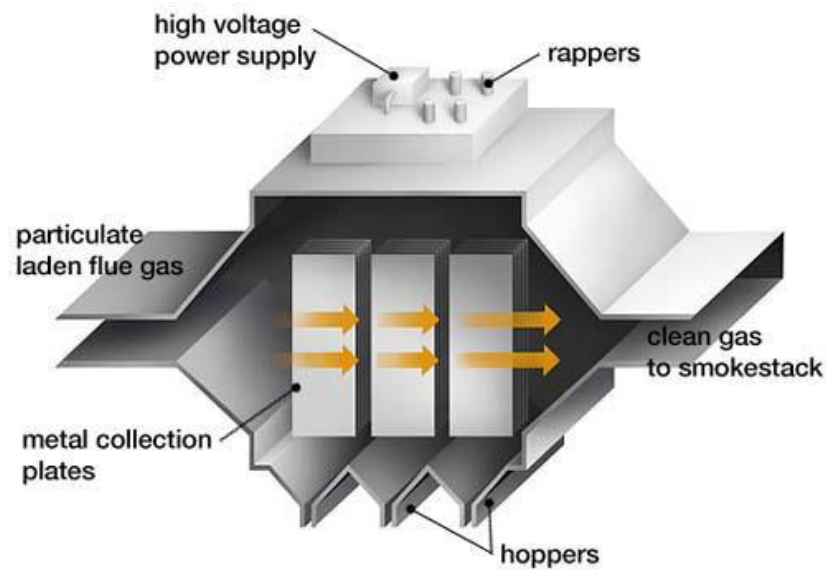
As partículas estão entre os poluentes que apresentam maiores riscos ao meio ambiente. Elas atacam os pulmões, aumentam as taxas de reação na atmosfera, reduzem a visibilidade e alteram os níveis de radiação solar que atinge o solo. Por este último fato, as partículas alteram a temperatura do solo e influenciam o crescimento das plantas (Carvalho Júnior e Lacava, 2003).

Devido aos inúmeros riscos causados pela presença de material particulado nos gases de exaustão de uma instalação de geração de vapor, faz-se necessário a instalação de equipamentos que complementem o processo, subtraindo parte ou todos os elementos nocivos, possibilitando o funcionamento da instalação sob os aspectos ambientais de emissão. Alguns destes serão descritos abaixo.

- **Precipitadores Eletroestáticos:**

Os precipitadores eletroestáticos aplicam cargas elétricas para separar partículas dos fluxos de gás. Uma elevada queda de pressão é estabelecida entre os eletrodos, fazendo com que as partículas que passam por este campo elétrico adquiram carga. As partículas eletricamente carregadas são atraídas e coletadas nas placas eletrificadas com cargas opostas e o gás limpo flui pelo equipamento. Periodicamente, as placas devem ser limpas sacudindo as placas para que a camada de poeira acumulada seja removida. A poeira é coletada em containers no fundo do dispositivo (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Figura 7 - Precipitador eletroestático



Fonte: Biofuels Academy, 2022

Os parâmetros de operação que influenciam no desempenho destes equipamentos incluem a carga mássica das cinzas, distribuição granulométrica, resistividade elétrica das cinzas, além da voltagem e da corrente aplicadas. Outros fatores que determinam a eficiência de remoção dos precipitadores são a área da placa coletora e a velocidade do gás. A eficiência de remoção fica entre 94,8-99,5% dependendo das especificidades do material particulado (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

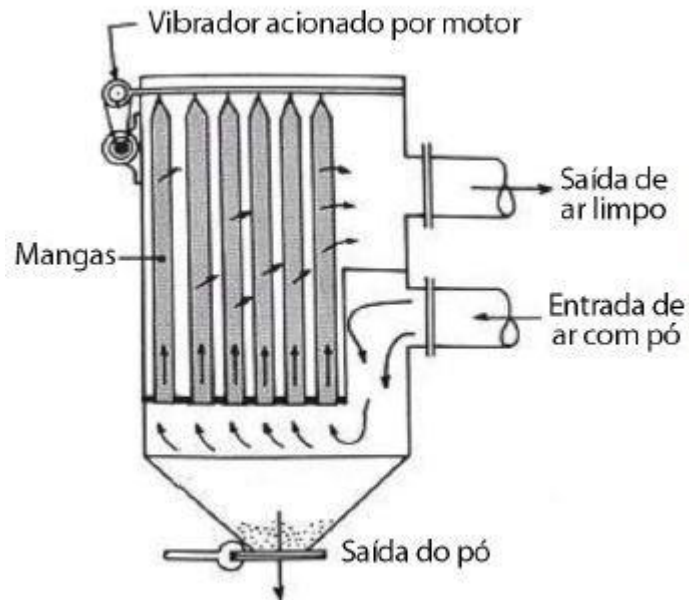
- Filtro de Mangas:

Os filtros de manga operam considerando-se os mesmos princípios dos aspiradores de pó residenciais. O fluxo de ar carregado com partículas de poeira é forçado por uma bolsa de pano. Com a passagem do fluxo através do pano, a poeira acumula neste pano, criando um fluxo de ar limpo. A poeira é periodicamente removida do pano sacudindo-o ou aplicando uma corrente de ar no sentido reverso do anteriormente aplicado (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

A eficiência de remoção de particulados através de filtros de manga depende das características das partículas (distribuição granulométrica e propriedades físicas) e do regime de operação (perda de carga, relação ar/pano, sequência de limpezas, intervalos entre limpezas, métodos e intensidade de limpeza) podendo chegar a 99,8-99,9%. Esses filtros podem ser de diversos materiais

(algodão, poliéster, papel, etc.), os quais são selecionados de acordo com a aplicação (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Figura 8 - Separador com filtros de mangas do tipo vibrador

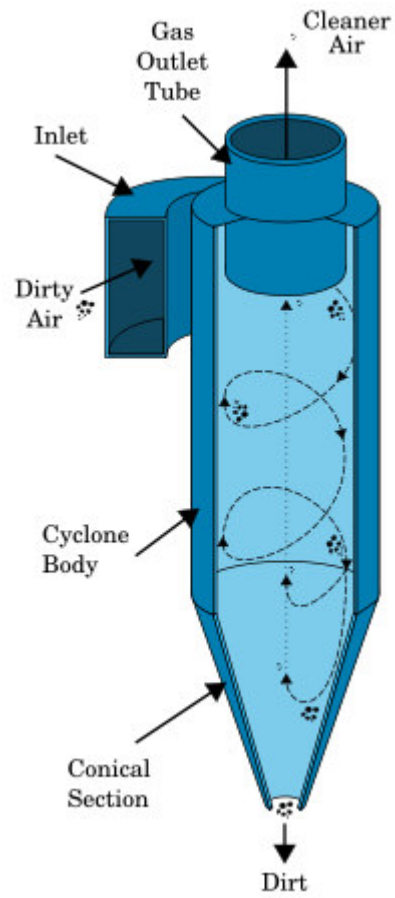


Fonte: Rocha e Ceron, 2022

- **Ciclone:**

Um separador centrífugo ou ciclone é mostrado na Figura 9. Os produtos de combustão entram tangencialmente, e a força centrífuga atira as partículas na parede cilíndrica onde, então, estas partículas escorregam para a parte inferior em que são coletadas. O movimento dos gases para dentro e para fora do dispositivo é mostrado pelas espirais. Um ciclone, em geral, remove partículas maiores que 10 μm (Carvalho Júnior e Lacava, 2003).

Figura 9 - Ciclone simples



Fonte: Biofuels Academy, 2022

4 METODOLOGIA

A termodinâmica sozinha não consegue determinar quais espécies estarão nos produtos de combustão. Contudo, assumindo-se um dado conjunto de constituintes nos produtos, a termodinâmica pode determinar as proporções de cada espécie que existe na mistura em equilíbrio. Para determinar as frações molares de cada componente nos produtos da combustão primeiramente precisa-se assumir um dado conjunto de produtos como dito acima. No presente trabalho assumiu-se os seguintes componentes: CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, NO, NO₂ e SO₂. Para os cálculos adotou-se a composição elementar do combustível representada abaixo na Tabela 6 em base úmida e livre de cinzas e a composição do comburente (ar) foi adotada como 20,95% de oxigênio e 79,05% de nitrogênio.

Tabela 6 – Composição do combustível referência*

C	H	O	N	S	Umidade	Cinzas
61,90%	4,19%	11,38%	1,24%	0,47%	15,43%	5,40%

Fonte: Autoria própria, 2022

Nota: Carvão Betuminoso Alto Volátil C (ASTM) de origem Colombiana

4.1 Aquisição de Dados

O processo de aquisição de dados visou a captação dos dados operacionais reais relacionados à queima do carvão na caldeira e seus produtos gasosos. Com isso, na usina existe um sistema de atribuição específico para centrais termelétricas, o KKS. Esse sistema identifica plantas, partes da planta, equipamentos e itens de equipamentos, além de identificar os medidores de pressão, temperatura, vazão mássica, vibração, dentre outros. Para adquirir os dados reais, foi necessário descobrir cada “KKS medidor” de vazão mássica dos equipamentos.

Para a escolha da faixa de tempo usada para adquirir os dados de operação, considerou-se um período com baixa variação na geração de energia nominal (entre 350 MW e 360 MW para cada usina geradora). Por indicação de um Supervisor de Operação, foi feita essa análise e o período escolhido foi do dia 02/02/21, 17/02/21, 11/06/21 e 11/07/21 sempre de 00 horas até 00 horas do dia seguinte, considerando a coleta de dados a cada minuto. Após encontrar a identificação dos medidores e

determinar o período de tempo a ser utilizado, usou-se um software chamado PI System que, a partir dos medidores, faz a aquisição de dados e insere diretamente em uma planilha no software Microsoft Excel. O total de pontos entre entradas e saídas foi de 109440, sendo 19 medidores.

4.2 Combustão sem excesso de ar

Nesse tópico serão feitas as deduções referentes à combustão do carvão com a necessidade teórica de ar, ou seja, sem excesso de ar. É de conhecimento que para ocorrer reações de combustão é necessária a presença de oxigênio. O oxigênio para combustão pode ser obtido do ar atmosférico, porém, o ar atmosférico não contém apenas oxigênio. Para melhor entendimento da composição do ar atmosférico seco a Tabela 7 apresenta a fração molar de cada componente contido no ar:

Tabela 7 - Composição aproximada do ar seco

Componente	Fração Molar (%)
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de carbono	0,03
Neônio, Hélio, Metano, outros	0,01

Fonte: Moran et al, 2013

Porém, como dito anteriormente, para facilitar os cálculos de combustão do carvão serão utilizadas algumas simplificações adotadas. Todos os componentes do ar seco, que não o oxigênio, serão agrupados com o nitrogênio. Sendo assim, considera-se que o ar tem 20,95 % de oxigênio e 79,05 % de nitrogênio. Também será admitido que o nitrogênio presente no ar de combustão não participa da reação química, sendo assim, é considerado como inerte. A Tabela 8 representa os parâmetros do ar seco que serão considerados nos cálculos de combustão. A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 8, toda vez que for mencionado ar subentende-se ar seco composto de oxigênio e nitrogênio com suas respectivas frações molares.

Tabela 8 - Parâmetros do Ar seco considerado nesse estudo

Componente	Fração Molar [mol i/mol Ar]	Massa molecular [g/mol]	Número de mols [mol]	Fração Mássica [kg i/kg Ar]
O ₂	0,2095	32	0,0072	0,2304
N ₂	0,7905	28,01	0,0274	0,7674
Ar	1	28,84		

Fonte: Autoria própria, 2022

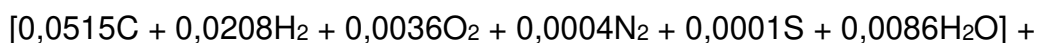
Para executar os cálculos da combustão do carvão, será considerada a composição do carvão apresentada na Tabela 6. A Tabela 9 representa a fração mássica do carvão, a massa molecular de cada componente e o número de mols de cada componente presente no carvão.

Tabela 9 - Parâmetros químicos do carvão

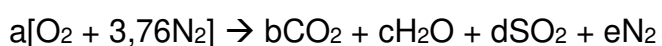
Composição Carvão	Fração mássica [kg i/kg carvão]	Massa Molar [kg/kmol]	Número de mols [kmol]	Fração molar [kmol i/kmol carvão]
Umidade	0,1543	18,02	0,0086	0,101
Cinzas	0,0540	-	-	-
Enxofre	0,0047	32,06	0,0001	0,002
Carbono	0,6190	12,01	0,0515	0,606
Hidrogênio	0,0419	2,016	0,0208	0,244
Nitrogênio	0,0124	28	0,0004	0,005
Oxigênio	0,1138	32	0,0036	0,042
Total	1		0,0850	1

Fonte: Autoria própria, 2022

Os cálculos demonstrados na Tabela 9 foram realizados considerando 1 kg de carvão, sendo assim, a fração mássica do elemento é igual à massa do elemento. Como pode ser visto na Tabela 9, não foi considerada a massa molecular da cinza, visto que sua composição é complexa de ser estimada. Com base na Tabela 9 pode-se montar a equação química de combustão do carvão sem excesso de ar e considerando a sua combustão completa, é expressa por:



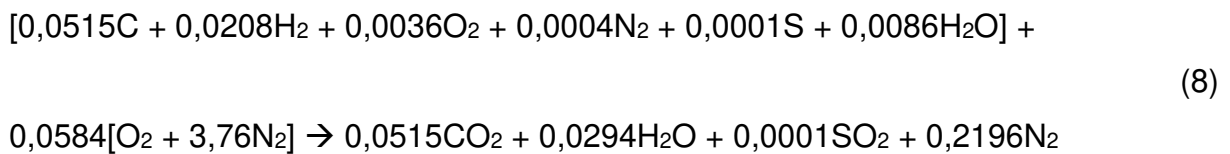
(7)



Para o cálculo da quantidade de ar teórico necessária para a combustão completa do carvão e os produtos da combustão é necessário aplicar o princípio da conservação de massa para a determinação dos coeficientes da Equação (7). Aplicando o princípio da conservação de massa obtêm-se:

$$\begin{array}{ll}
 \text{C} & b = 0,0515 \\
 \text{H}_2 & c = 0,0208 + 0,0086 = 0,0294 \\
 \text{S} & d = 0,0001 \\
 \text{O} & 2b + c + 2d = 0,0072 + 0,0086 + 2a \\
 \text{N} & e = 3,76a
 \end{array}$$

Resolvendo as equações da conservação da massa mostradas anteriormente obtêm-se $a = 0,0584$ e $e = 0,2196$ e substituindo os coeficientes na Equação (7) obtêm-se a equação química da combustão do carvão balanceada:



O coeficiente 0,0584 antes do termo $[\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2]$ na Equação (8) é o número de kmols do oxigênio no ar de combustão e não a quantidade de ar. A quantidade teórica de ar de combustão são 0,0584 kmols de oxigênio somados ao produto de $(0,0584 \times 3,76)$ kmols de nitrogênio, o que fornece 0,2779 kmols de ar. Para obter a razão molar de ar/combustível basta realizar a divisão de 0,2779 kmols de ar por 0,0850 kmols de carvão onde se obtêm uma razão de 3,2694 kmols de ar por kmol de carvão.

Além disso, os cálculos do ar teórico podem ser realizados de outra forma, de modo que os dados sejam compreendidos no ambiente industrial. Ou seja, os gases serão calculados em medida volumétrica (Nm^3) e não molar.

Assim, a Tabela 10 abaixo mostra os cálculos da quantidade estequiométrica de oxigênio necessária para queimar os elementos que constituem o carvão.

Tabela 10 - Cálculo do O₂ requerido para a reação de combustão estequiométrica do carvão exemplo

Composição Carvão	Massa (kg)	O₂ requerido (Nm³)^{1,2}
Umidade	0,1543	NA
Cinzas	0,0540	-
Enxofre	0,0047	$0,0047 \times 22,386 / 32,06 = 0,0033$
Carbono	0,6190	$0,6190 \times 22,386 / 12,01 = 1,1538$
Hidrogênio	0,0419	$0,0419 \times 22,386 / 4,032 = 0,2326$
Nitrogênio	0,0124	NA
Oxigênio	0,1138	$- 0,1138 / 1,309 = - 0,0869$
Soma		1,3028

Fonte: Autoria própria, 2022

Notas:

NA - Não aplicável.

¹ - 22,386 dm³ é o volume ocupado por 1 mol de qualquer gás nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

² - 1,309 kg/m³ é a densidade do oxigênio gás a 101,325 kPa e 25°C.

Sabendo que em base volumétrica (ou molar) o ar seco apresenta 20,95% de oxigênio, sendo possível determinar o volume de ar teórico requerido para a combustão estequiométrica de 1kg de carvão.

$$Ar\ Teórico = \frac{1,3028}{0,2095} = 6,2184\ Nm^3 \text{ de ar seco para a queima de 1 kg de carvão}$$

Tendo por base este valor e considerando as reações elementares de oxidação, torna-se possível efetuar o cálculo dos produtos de combustão (em base volumétrica) conforme a tabela abaixo.

Tabela 11 - Cálculo da composição (em volume) dos gases de combustão para a reação de combustão estequiométrica do carvão exemplo

Composição Carvão	Massa (kg)	Produtos (Nm³)^{3,4}
Umidade	0,1543	H ₂ O: 0,1543 / 997,07 = 0,0001
Cinzas	0,0540	NA
Enxofre	0,0047	SO ₂ : 0,0047 x 22,386 / 32,06 = 0,0033
Carbono	0,6190	CO ₂ : 0,6190 x 22,386 / 12,01 = 1,1538
Hidrogênio	0,0419	H ₂ O: 0,0419 x 22,386 / 4,032 = 0,2326
Nitrogênio	0,0124	N ₂ : 6,2184 x 0,7905 = 4,9156
Oxigênio	0,1138	NA

Fonte: Autoria própria, 2022

Notas:

³ - Este cálculo assume um papel inerte da umidade e das cinzas do carvão no processo de combustão.

⁴ - 997,07 kg/m³ é a densidade da água gasosa a 101,325 kPa e 25°C.

4.3 Combustão com excesso de ar

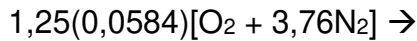
Idealmente na combustão deveria apenas ser fornecido a quantidade de ar estritamente necessária para proporcionar a combustão completa do combustível. No entanto, do ponto de vista prático e tecnológico, no interior da fornalha, a mistura entre o combustível e o ar não é perfeita o que resulta em uma combustão pobre e incompleta. Sendo assim, é necessário fornecer uma quantidade de ar maior, denominada excesso de ar.

Nesse exemplo, serão fixadas algumas condições para fins de cálculos dos novos gases que surgem na combustão com excesso de ar.

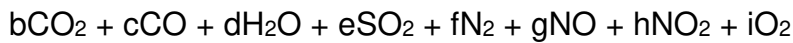
- Excesso de ar: 25%
- % de Queima do N₂: 5%
- % de Carbono nas cinzas: 10%
- Relação NO₂/NO: 0,05
- Relação CO/CO₂: 0,005

Utilizando a Equação (8) como referência acrescida das condições apresentadas acima, obtêm-se:

$$[0,90(0,0515)C + 0,0208H_2 + 0,0036O_2 + 0,0004N_2 + 0,0001S + 0,0086H_2O] +$$



(9)



Para o cálculo da quantidade de ar necessária para a combustão completa do carvão com excesso de ar e os produtos da combustão, é necessário aplicar o princípio da conservação de massa para a determinação dos coeficientes da Equação (9). Aplicando o princípio da conservação de massa obtêm-se:

$$C \quad b + c = 0,0463$$

$$c = 0,005b \rightarrow b = 0,0461, c = 0,0002$$

$$H_2 \quad d = 0,0280 + 0,0086 = 0,0366$$

$$S \quad e = 0,0001$$

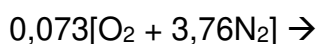
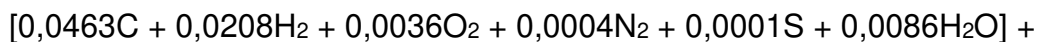
$$N \quad f = 0,95 \times [0,0004 + 0,073 \times 3,76] = 0,2611$$

$$g + h = 0,05 \times [0,0004 + 0,073 \times 3,76] = 0,0137$$

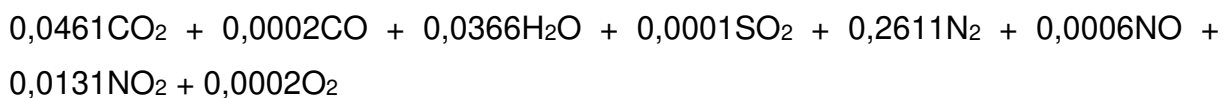
$$h = 0,05g \rightarrow h = 0,0006, g = 0,0131$$

$$O \quad 0,0072 + 0,0086 + 0,146 = 0,0922 + 0,0002 + 0,0366 + 0,0001 + 0,006 + 0,0262 + 2i \rightarrow i = 0,0002$$

Resolvida as equações da conservação de massa mostradas anteriormente e substituindo os coeficientes na Equação (9) obtêm-se a equação química da combustão do carvão com excesso de ar balanceada:



(10)



O coeficiente 0,073 antes do termo $[O_2 + 3,76N_2]$ na Equação (10) é o número de kmols do oxigênio no ar de combustão e não a quantidade de ar. A quantidade de ar de combustão com excesso de ar são 0,073 kmols de oxigênio somados ao produto de $(0,073 \times 3,76)$ kmols de nitrogênio, o que fornece 0,3475 kmols de ar. Para obter a razão molar de ar/combustível basta realizar a divisão de 0,3475 kmols de ar por

0,0850 kmols de carvão onde se obtêm uma razão de 4,0882 kmols de ar por kmols de bagaço.

4.4 Cálculos da concentração dos componentes dos gases de combustão

Após a realização dos cálculos estequiométricos da combustão do carvão é possível, de forma análoga, calcular os produtos da combustão em base volumétrica e além disso em base mássica para ao final calcular a composição dos gases de combustão, conforme é o acompanhamento das emissões nas indústrias.

Tabela 12 - Cálculo da composição (em volume) dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base úmida

Composição Carvão	Massa (kg)	Produtos (Nm ³)
Umidade	0,1543	H ₂ O: 0,1543 / 997,07 = 0,00015
Cinzas	0,0540	NA
Enxofre	0,0047	SO ₂ : 0,0047 x 22,386 / 32,06 = 0,0033
Carbono	0,6190	CO ₂ : (0,90 x 0,995) x (0,6190 x 22,386 / 12,01) = 1,0332
		CO: (0,90 x 0,005) x (0,6190 x 22,386 / 12,01) = 0,0052
Hidrogênio	0,0419	H ₂ O: 0,0419 x 22,386 / 4,032 = 0,2326
		NO: 0,05 x 0,95 x (0,0124 x 22,386 / 28) = 0,00047
Nitrogênio	0,0124	NO ₂ : 0,05 x 0,05 x (0,0124 x 22,386 / 28) = 0,00002
		N ₂ : 1,25 x 6,2184 x 0,7905 – (0,00047 + 0,00002) = 6,1440
Oxigênio	0,1138	O ₂ : 0,25 x 6,2184 x 0,2095 = 0,3257
Total	-	7,7446

Fonte: Autoria própria, 2022

Assim, tem-se que o volume total de gases em base úmida é $1,25 \times 6,2184 + 7,7446 = 15,5176 \text{ Nm}^3$ e em base seca é $1,25 \times 6,2184 + 7,5118 = 15,2848 \text{ Nm}^3$. Com isso, é calculado a concentração dos produtos da combustão (ênfase para os óxidos) diluídos com o ar, sendo:

$$\text{Concentração} = \frac{\text{massa do produto (mg)}}{\text{Volume Total (Nm}^3\text{)}} \quad (11)$$

Tabela 13 - Cálculo da composição (mássica) e concentração dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base úmida

Elementos	Massa (kg)	Produtos (mg)	Concentração (mg/Nm ³)
Umidade	0,1543	H ₂ O: 154,3x10 ³	9943,5
Enxofre	0,0047	SO ₂ : 9,4x10 ³	605,7
Carbono	0,6190	CO ₂ : 2032,5x10 ³ CO: 6,5x10 ³	130979,4 418,8
Hidrogênio	0,0419	H ₂ O: 374,1x10 ³	24108,6
Nitrogênio	0,0124	NO: 1,26x10 ³ NO ₂ : 0,1x10 ³	81,3 6,6
Oxigênio ⁵	0,1138	O ₂ : 426,3x10 ³	27473,7

Fonte: Autoria própria, 2022

Nota:

⁵ – O produto O₂ não é calculado sobre a massa de oxigênio advinda do carvão e sim pelo volume de ar em excesso utilizado no processo.

Tabela 14 - Cálculo da composição (mássica) e concentração dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base seca

Elementos	Massa (kg)	Produtos (mg)	Concentração (mg/Nm ³)
Enxofre	0,0047	SO ₂ : 9,4x10 ³	615,0
Carbono	0,6190	CO ₂ : 2032,5x10 ³ CO: 6,5x10 ³	132974,4 425,2
Nitrogênio	0,0124	NO: 1,26x10 ³ NO ₂ : 0,1x10 ³	82,6 6,7
Oxigênio	0,1138	O ₂ : 426,3x10 ³	27892,2

Fonte: Autoria própria, 2022

Além disso, segundo Carvalho e Lacava (2003), as concentrações dos poluentes são normalizadas em termos de concentrações corrigidas de O₂ (3%, 7% ou 12%). Essas correções padronizam os valores de emissão de fontes diferentes para a mesma base, permitindo comparação. A equação (12) vale para qualquer tipo de combustível e para quaisquer dos componentes dos produtos de combustão, ou seja, sendo X um componente genérico dos produtos de combustão, temos:

$$[X]_{Corr} = \frac{20,95 - [O_2]_{Corr}}{20,95 - [O_2]_{Real}} [X]_{Real} \quad (12)$$

Na prática, foi informado pelo operador da caldeira que os valores utilizados para $[O_2]_{Corr}$ e $[O_2]_{Real}$ são de 2% e 8,5%. Este último é uma média da concentração real da emissão de O_2 , visto que há entradas de ar no sistema de saída dos gases uma vez que ele não é hermeticamente fechado. Isso faz com que a concentração final de oxigênio seja de 2 a 4 vezes maior que a concentração calculada.

Também, é comum vermos as concentrações de O_2 e CO_2 em termos de porcentagem volumétrica, uma vez que seus valores são muito maiores que as demais concentrações dos outros produtos da combustão. Segundo Gomes (2006), as equações (13) e (14) mostram como é realizada essa transformação de unidades:

$$C \left(\frac{mg}{Nm^3} \right) = C(ppm) * \frac{M}{24,45} \quad (13)$$

$$C(\%) = \frac{C(ppm)}{10^4} \quad (14)$$

onde $C(ppm)$ é a concentração do gás em ppm, M é a massa molar dos componentes e $C(\%)$ é a concentração em porcentagem volumétrica.

Com isso, calcula-se as concentrações finais dos gases de combustão provenientes da combustão do carvão.

Tabela 15 - Concentração final dos gases de combustão para a reação de combustão do carvão exemplo com ar em excesso em base seca

Produtos	Concentração (mg/Nm³)
SO _x	936,1
CO	647,2
NO _x	135,9
CO ₂	11,2%
O ₂ ⁶	8,1%

Fonte: Autoria própria, 2022

Nota:

⁶- Concentração de oxigênio calculada foi multiplicada por um fator de 2,5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos carvões

A qualidade do combustível deve ser ponderada quando pretende-se analisar as condições de funcionamento de um queimador. Arquitetado para operar com um fluxo adequado de combustível, um queimador pode ter falhas se o fluxo ou a composição do mesmo variar, danificando o equipamento e, possivelmente, emitindo uma maior quantidade de gases poluentes, além de reduções relevantes de energia no processo. As mudanças nas propriedades dos carvões queimados resultam em variações nas emissões da planta industrial.

Para avaliar-se as propriedades de um carvão mineral para a sua utilização como combustível na geração de vapor, é fundamental o conhecimento de suas características físico-químicas. A análise de uma amostra de carvão pode ser feita de duas maneiras. A primeira, conhecida como análise imediata, proporciona as porcentagens de carbono fixo, cinzas, matéria volátil e da umidade existentes no carvão. A segunda, denominada de análise elementar, fornece as porcentagens de carbono, enxofre, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio presentes no carvão (CUNHA, 2021).

Para o presente trabalho foram usadas as composições de 8 carvões para a elaboração do modelo do balanço de massa e para os cálculos de efeito comparativo. Os resultados das caracterizações químicas realizadas pelos fornecedores desses carvões são apresentados na Tabela 16, dados esses que são recebidos previamente pela termelétrica em documentos chamados COA (Certificate of Analysis).

Tabela 16 - Análise elementar dos carvões

Carvão	C	H	O	N	S	Umidade	Cinzas
Carvão 1	61,80%	4,23%	11,11%	1,22%	0,41%	15,65%	5,59%
Carvão 2	61,90%	4,19%	11,38%	1,24%	0,47%	15,43%	5,40%
Carvão 3	61,80%	4,12%	11,02%	1,24%	0,48%	16,16%	5,23%
Carvão 4	61,20%	4,33%	11,66%	1,21%	0,39%	15,75%	5,42%
Carvão 5	61,80%	4,16%	11,05%	1,28%	0,50%	15,11%	6,07%
Carvão 6	63,62%	4,26%	9,19%	1,35%	0,68%	13,29%	7,61%
Carvão 7	60,00%	4,12%	10,66%	1,30%	0,83%	15,23%	7,87%
Carvão 8	63,34%	4,30%	9,25%	1,37%	0,70%	13,90%	7,14%

Fonte: Autoria própria, 2022

5.2 Verificação do modelo de combustão

Visando-se a apuração do modelo de balanço de massa proposto, foram coletados dados reais referentes à composição dos gases de combustão, os quais foram comparados com os dados calculados pelo modelo, conforme apresentado nas Tabelas 17 a 20.

Tabela 17 – Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 02/02/21 – Carvão 1

Emissões	Valor Calculado	Valor Medido
CO (mg/Nm³)	1246,98	1451,42
SO₂ (mg/Nm³)	911,46	928,95
NO_x (mg/Nm³)	269,01	319,81
CO₂ (%)	12,54	14,50
O₂ (%)	6,92	6,29

Fonte: Autoria própria, 2022

Tabela 18 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 17/02/21 – Carvão 2

Emissões	Valor Calculado	Valor Medido
CO (mg/Nm³)	1574,95	1654,01
SO₂ (mg/Nm³)	1145,02	1011,08
NO_x (mg/Nm³)	299,63	275,03
CO₂ (%)	13,75	13,36
O₂ (%)	7,04	7,85

Fonte: Autoria própria, 2022

Tabela 19 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 11/07/21 – Carvão 5

Emissões	Valor Calculado	Valor Medido
CO (mg/Nm³)	576,68	576,63
SO₂ (mg/Nm³)	1195,71	1038,46
NO_x (mg/Nm³)	303,61	334,77
CO₂ (%)	13,53	13,53
O₂ (%)	6,92	7,17

Fonte: Autoria própria, 2022

Tabela 20 - Composições médias calculadas e medidas dos gases de combustão no dia 11/06/21 – Carvão 4

Emissões	Valor Calculado	Valor Medido
CO (mg/Nm³)	671,71	666,30
SO₂ (mg/Nm³)	946,60	917,64
NO_x (mg/Nm³)	291,30	301,74
CO₂ (%)	13,59	13,54
O₂ (%)	7,58	7,35

Fonte: Autoria própria, 2022

Verifica-se pelas Tabelas 17 a 20 que houve uma boa concordância entre os valores calculados pelo modelo e os valores reais medidos. Alguns desvios nos valores das emissões de CO foram observados bem como para as emissões de NO_x,

com uma variação mínima de 0,8% a quase 16% entre os valores, considerando-se que a própria instabilidade do sistema real resulta em grandes desvios aparentes e que o modelo proposto não tem uma sensibilidade alta para essa instabilidade.

A partir disso, os resultados e discussões seguintes são baseados nos dados gerados pelo modelo de balanço

5.3 Influência da composição do carvão nas emissões de SO_x e NO_x

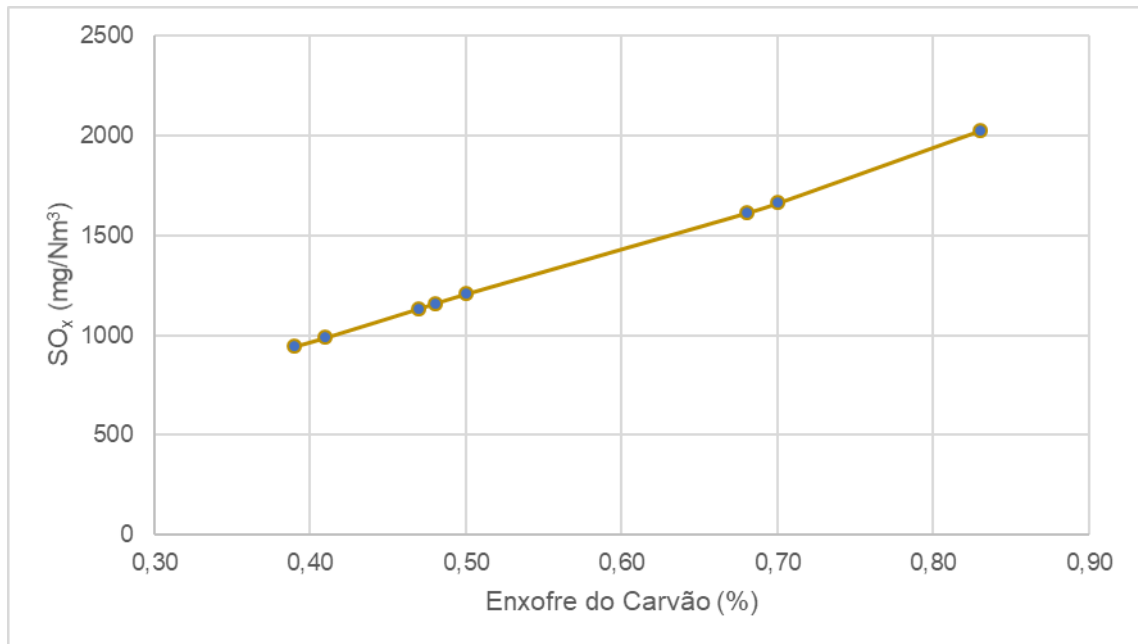
Entre as emissões oriundas da combustão do carvão encontram-se os óxidos de nitrogênio e os óxidos de enxofre, os quais refletem um real problema ambiental.

Partindo de vazões fixas de carvão e ar, analisou-se nos testes a interferência do teor de enxofre dos diferentes carvões na emissão de SO_x (majoritariamente SO₂), cujos resultados são apresentados na Tabela 21 e na Figura 10.

Tabela 21 - Atuação do teor de enxofre do carvão na emissão de SO_x

S Carvão (%)	SO _x (mg/Nm ³)
0,39	944,96
0,41	989,97
0,47	1135,39
0,48	1160,65
0,50	1208,22
0,68	1614,09
0,70	1663,52
0,83	2026,65

Fonte: Autoria própria, 2022

Figura 10 - Atuação do teor de enxofre do carvão na emissão de SO_x

Fonte: Aatoria própria, 2022

Verificou-se pela Figura 10 que a emissão de dióxido de enxofre aumenta com o aumento do teor de enxofre presente no carvão. Logo, a emissão desse poluente pode ser reduzida principalmente pelo controle do tipo de carvão como também pelo uso dos equipamentos dessulfurantes abordados anteriormente. Isso ratifica a importância do combustível utilizado nos problemas ambientais resultantes da combustão, os quais podem ser reduzidos pela utilização, por exemplo, de carvões de melhor qualidade ou com a utilização dos equipamentos mencionados na seção de Tecnologias para Controle da Poluição como o dessulfurador dos gases de combustão.

Em relação às emissões de óxido de nitrogênio, averiguou-se que quando o teor de nitrogênio do carvão aumenta, a quantidade de NO_x produzida também aumenta conforme a Tabela 22. No modelo preditivo de (Hachenberg, 2014) foram usados diferentes tipos de carvões e verificou que um aumento de até 2% no nitrogênio do carvão resultou em aproximadamente 50% a mais de NO_x sendo formado.

Tabela 22 - Atuação do teor de nitrogênio do carvão na emissão de NOx

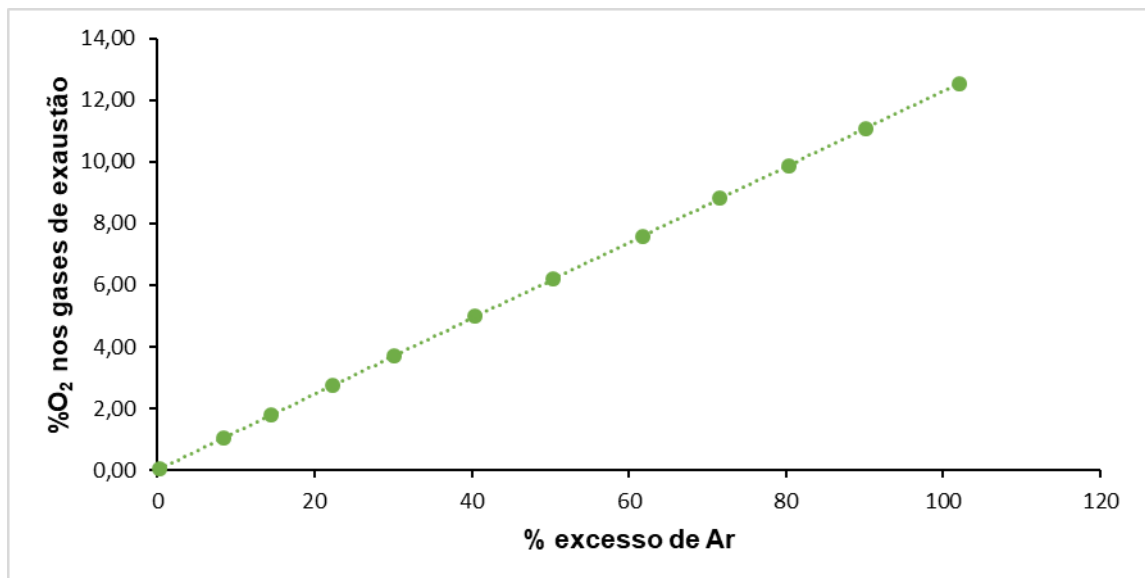
N Carvão (%)	NO _x (mg/Nm ³)
1,21	290,79
1,22	292,18
1,24	297,11
1,28	306,79
1,30	314,84
1,35	317,83
1,37	322,92

Fonte: Autoria própria, 2022

5.4 Influência do excesso de ar nas emissões dos gases de exaustão

Pela Figura 11 é possível observar a relação entre o percentual de excesso de ar e o percentual de oxigênio nos gases de exaustão. Quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior o percentual de excesso de ar, uma vez que quanto mais ar é injetado na combustão mais pobre é a mistura.

Figura 11 - Gráfico do % de excesso de O₂ nos gases de exaustão em função do % de excesso de ar para queima do carvão 4



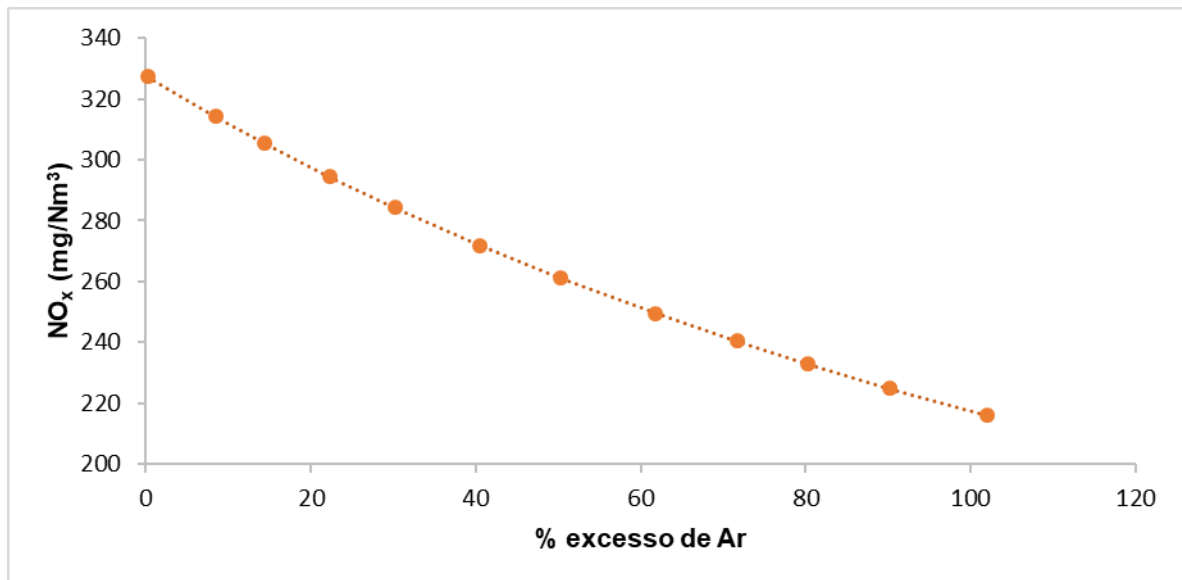
Fonte: Autoria própria, 2022

Já para as emissões de NO_x, os resultados são apresentados na Tabela 23 e Figura 12.

Tabela 23 - Influência do excesso de ar na emissão de NO_x para o carvão 4

% excesso de ar	% O ₂ nos gases de exaustão	NO _x (mg/Nm ³)
0,22	0,03	327,32
8,5	1,05	314,15
14,42	1,78	305,37
22,31	2,75	294,40
30,2	3,72	284,19
40,46	4,98	271,93
50,33	6,19	261,11
61,77	7,60	249,58
71,63	8,82	240,43
80,31	9,88	232,91
90,18	11,10	224,92
102,01	12,56	216,03

Fonte: Autoria própria, 2022

Figura 12 - Influência do excesso de ar na emissão de NO_x para o carvão 4

Fonte: Autoria própria, 2022

Nota-se pela Figura 12 que o aumento do excesso de ar utilizado na combustão de carvão pulverizado diminui a emissão de NO_x total na saída da caldeira. Constatase que uma variação de excesso de ar no intervalo de 20 a 40% resultou em uma diminuição no teor de NO_x de apenas 22,5 mg/Nm³ o que mostra que esta variável

exerce uma pequena interferência na formação de NO_x proveniente da queima de carvão pulverizado diferentemente da curva apresentada no gráfico da Figura 4 de Pinheiro e Valle (1995), onde há um aumento do teor de NO_x para a faixa entre 5 a 30% do excesso de ar e em seguida, diminui gradualmente conforme o aumento do excesso de ar. Isso provavelmente ocorre em função de que grande parte do NO_x total formado durante a combustão de carvão pulverizado é proveniente do NO_x combustível, sendo o NO_x térmico pouco significativo em temperaturas intermediárias (900 – 1300 °C) (FILHO, 2016). Logo, ao aumentar-se o excesso de ar, há uma diminuição na temperatura de chama e, conseqüentemente, uma redução do NO_x térmico, o qual sofre uma acentuada influência pela temperatura. Como o NO_x térmico encontra-se em pequena concentração, observa-se uma redução de somente 22,5 mg/Nm³ na emissão total de NO_x com o aumento de 20% no excesso de ar. Além disso, temperaturas menores também diminuem a velocidade das reações de combustão e, conseqüentemente, a conversão de nitrogênio do carvão a NO_x . No entanto, a redução de NO_x combustível não foi muito significativa pelo fato de este ser bem menos sensível à temperatura do que o NO_x térmico.

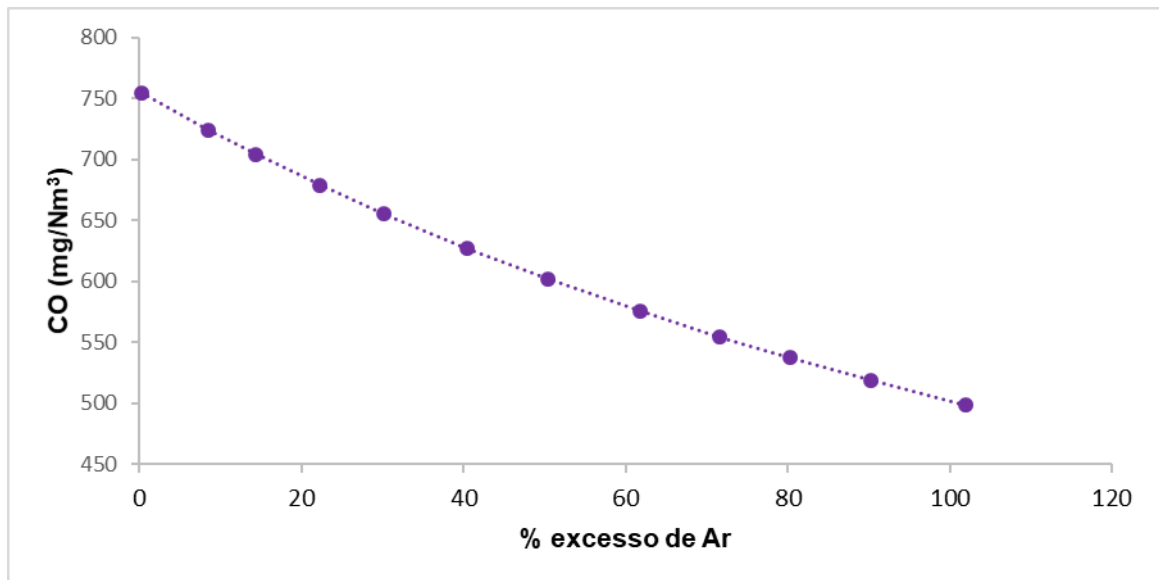
Para o CO, que é proveniente da combustão incompleta do carbono presente no combustível ou da reação de dissociação do CO_2 , observa-se pela Tabela 24 e Figura 13 que sua emissão, como esperado, diminui com a utilização de maiores valores de excesso de ar, ocorrendo formações significativas de CO quando se utiliza valores baixos de excesso de ar. Entretanto, essa diminuição da emissão também não apresenta o mesmo comportamento de queda expressiva apresentado no gráfico na Figura 4 de Pinheiro e Valle (1995), o que leva a cogitar em outros fatores (limpeza dos queimadores, eficiência na mistura do combustível, variações bruscas na carga) que possam influenciar na curva de emissão do CO uma vez que o seu teor não tem uma relação unívoca com o excesso de ar.

Tabela 24 - Influência do excesso de ar na emissão de CO para o carvão 4

% excesso de ar	% O₂ nos gases de exaustão	CO (mg/Nm³)
0,22	0,03	754,77
8,5	1,05	724,39
14,42	1,78	704,15
22,31	2,75	678,86
30,2	3,72	655,32
40,46	4,98	627,06
50,33	6,19	602,09
61,77	7,60	575,51
71,63	8,82	554,41
80,31	9,88	537,08
90,18	11,10	518,65
102,01	12,56	498,15

Fonte: Autoria própria, 2022

Figura 13 - Influência do excesso de ar na emissão de CO para o carvão 4



Fonte: Autoria própria, 2022

6 CONCLUSÃO

Conforme discutido, a preocupação com o meio ambiente é incentivadora para o avanço tecnológico e desenvolvimento de equipamentos avançados que podem controlar as emissões como mostrado nas seções anteriores. Este trabalho foi apresentado como um meio de facilitar a determinação das quantidades de poluentes gerados e também analisar diferentes condições de queima no processo de combustão.

Após as avaliações dos resultados é possível concluir que, comparando-se os resultados das análises dos gases de combustão medidos na planta industrial com os valores calculados pelo modelo de balança de massa proposto verificou-se uma boa concordância, tornando o mesmo uma ferramenta útil e válida para a simulação e análise de diferentes cenários no processo de combustão do carvão mineral. Isso demonstra a vital importância de modelos matemáticos no entendimento de processos como a combustão do carvão e que as pesquisas na área têm alcançado um razoável grau de maturidade, tanto que seu impacto nas aplicações industriais já é notável.

Com isso, a partir dos dados gerados pelo modelo, entende-se pela verificação do percentual de excesso de ar com relação ao percentual de oxigênio nos gases de exaustão que quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior o percentual de excesso de ar, visto que quanto mais ar é inserido na combustão mais pobre é a mistura. Além disso, foi possível analisar que com o crescimento do percentual de oxigênio nos gases de exaustão a emissão de NO_x decresce, porém com uma baixa variação no seu teor, o que demonstra que a variável excesso de ar exerce uma pequena influência na formação de NO_x proveniente da queima do carvão pulverizado.

Por outro lado, a emissão de CO apresentou o comportamento semelhante ao da emissão de NO_x pois quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão menor é a emissão de CO. Então quanto menor o percentual de oxigênio nos gases de exaustão para uma dada temperatura de chama, maior é a emissão de monóxido de carbono e conseqüentemente maior a perda de energia devido à combustão incompleta. Ademais é de se considerar que quanto menor o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior será a temperatura real de chama o que também favorece um aumento da dissociação e conseqüentemente um aumento na emissão de poluentes.

Na emissão de dióxido de enxofre (SO_2) observou-se que o que altera consideravelmente os níveis desse poluente nos gases é o percentual de enxofre do combustível. Assim quanto maior o percentual de enxofre presente no combustível maior a fração de emissão de dióxido de enxofre, o que é visto para o carvão 4, e quanto menor o percentual de enxofre no combustível menor a fração de dióxido de enxofre emitido pela combustão, o que é visto na combustão do carvão 7. Com isso, é possível reduzir a emissão de SO_2 com o controle do tipo de carvão e também com o uso de equipamentos dessulfurantes.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento do balanço de energia, determinando as perdas no processo e a eficiência de combustão.
- Verificação da dependência da formação do NO_x e CO em função da temperatura.
- Implementar a previsão de composição das cinzas e verificar os fatores que influenciam na formação.
- Implementar a co-combustão de carvão com outros resíduos avaliando a redução das emissões.

REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da Energia Elétrica do Brasil. 3ª Ed. Brasília: ANEEL, 2008.

ABCM - Associação Brasileira do Carvão Mineral. Carvão Mineral, c2021. Sobre o carvão. Disponível em:

<https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=6&i_area=4>.

Acesso em: 26 de Julho de 2021.

ABCM - Associação Brasileira do Carvão Mineral. Dados Estatísticos – Ano 2020, c2021. Sobre o carvão. Disponível em:

<https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=9&i_area=2>.

Acesso em: 09 de Setembro de 2021.

ANM - Agência Nacional de Mineração. Carvão Mineral. Disponível em:

<<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-2-carvao>>. Acesso em: 26 de Julho de

2021.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BP Energy Outlook. British Petroleum Energy Outlook. Disponível em:

<<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 29 de Julho de 2021.

BRAGA, A., PEREIRA, L. A. A., SALDIVA, P. H. N. Poluição e Seus Efeitos na Saúde Humana. In: Seminário sobre sustentabilidade na geração e uso de energia. Campinas - SP: UNICAMP, 2002. 20p. Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=1039>>. Acesso em 24 de Agosto de 2021.

CARVALHO, J. A, LACAVA, P. T. **Emissões em Processos de Combustão**. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

CARVALHO JUNIOR, J. ANDRADE DE; MACQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: UFSC, 2007.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 30 de Agosto de 2021.

CYCLONE SEPARATOR. **Biofuels Academy**, 2022. Disponível em: <<http://biofuelsacademy.org/index.html%3Fp=214.html>>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2022.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 03, Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, previstos no – PRONAR – Data da Legislação: 28/06/90 – Publicação DOU: 22/08/1990.

CORSINI, I., JANONE, L. Geração de energia por termelétricas em agosto bate recorde no Brasil. **CNN Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/geracao-de-energia-por-termeletricas-em-agosto-bate-recorde-historico-no-brasil/>>. Acesso em 20 de Janeiro de 2022.

CUNHA, MARCELO GREGORY. **Avaliação da co-combustão de carvão mineral com serragem de eucalipto em leito fluidizado borbulhante**. 2021. 85f. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

DE LAS OBRAS-LOSCERTALES, M. et al. **NO and N₂O emissions in oxy-fuel combustion of coal in a bubbling fluidized bed combustor**. Fuel, v. 150, p. 146–153, jun. 2015.

ELETROSTATIC PRECIPITATOR. **Biofuels Academy**, 2022. Disponível em: <<http://biofuelsacademy.org/index.html%3Fp=294.html>>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2022.

FILHO, R. V. Emissão de óxidos de enxofre (SO_x) na combustão industrial. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, p. 65–76, ago. 2020.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

GOMES, J. F. Métodos expeditos de estimativa da concentração de poluentes gasosos no interior de edifícios. **Revista Portuguesa de Pneumologia**, v. 12, n. 4, p. 447–453, 2006.

GONÇALVES FILHO, E. L. **Modelagem e simulação de calcinadores de hidróxido de alumínio em leito fluidizado**. 2012. 235 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

HACHENBERG, N. **Predictions of NO_x emissions in pulverized coal combustion**. 2014. 289f. Tese (Industrial Engineering, PhD), University of Louisville, Louisville, 2014.

LAGES, V. P. **Avaliação da Eficiência de Captura de SO₂ de Gases de Combustão de Carvão Usando Calcário Comercial**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2017.

MAGNUS, D. de M., TAVARES, A. A., SALVARO, P. V. **Análise Técnico-Econômica da Modernização do Parque Termelétrico a Carvão Mineral com Tecnologias de Baixas Emissões de CO₂**. In: Congresso Brasileiro do Carvão Mineral, 5., 2017, Criciúma. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CBCM2017-0041>>. Acesso em: 20 Setembro de 2021.

MONTEIRO JÚNIOR, O. C. **Estudo do Controle das Emissões de poluentes em Caldeira Aquatubular de alta pressão com Queimadores Convencionais, Abordagem da Eficiência Versus Custo do Dano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MORAN, M. J., et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 7^a ed., 2013.

PHILIPPSEN, C. G. **Modelagem e simulação fluidodinâmica aplicada à análise do desempenho da planta piloto semi-industrial de leito fluidizado em processos de combustão de carvão mineral com alto teor de cinzas**. 2018. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PINHEIRO, P. C. C., VALLE, R. M., **Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar**. In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 1995, Rio de Janeiro. Anais do II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Rio de Janeiro, RJ : ABIQUIM, 1995. v. 1. p. 157-162.

ROCHA, R. G., CERON, L. P., **Avaliação dos Filtros Manga em Indústria de Tintas**. Meio Filtrante, 2022. Disponível em: <<https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/1786/avaliacao-dos-filtros-manga-em-industria-de-tintas>>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2022.

ROCHEDO, P. R. R. **Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termelétricas a carvão: Retrofitting e CaptureReady**. 2011. 346 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, 2011.

SAMANIEGO, J. E. L. **Um estudo da combustão de carvão mineral CE4500 em reator de leito fluidizado borbulhante**. 2011. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SANTANA, E., CUNHA, K. B. da, FERREIRA, A. L., ZAMBONI, A. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Padrões de Qualidade do Ar: Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Matriz por Fonte e Combustível Final. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaWJlc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NmM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em 08 de Setembro de 2021.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia termelétrica: Gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TORREIRA. R. P. **Geradores de Vapor**. Editora Libris. São Paulo, 1995.

VISCONDI, G. DE F.; SILVA, A. F.; CUNHA, K. B. Geração termelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle. **IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente**, p. 38, nov. 2016.