

NAYARANNA GOULARTE PEREIRA

**BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL COMO ALTERNATIVA PARA
REDUZIR IMPUREZAS E EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia de Energia

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2023**

Dedico este trabalho à minha família,
minha orientadora e meus amigos que
sempre me apoiaram em todo o período da
minha graduação.

P436b Pereira, Nayaranna Goularte

Beneficiamento do carvão mineral como alternativa para reduzir impurezas e emissões de poluentes atmosféricos / Nayaranna Goularte Pereira.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2023.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Carvão mineral . 2. Beneficiamento a seco. 3. Transição energética. 4. impactos ambientais. 5. Combustão . I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

NAYARANNA GOULARTE PEREIRA

**BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL COMO ALTERNATIVA PARA
REDUZIR IMPUREZAS E EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Msc. Daniele Ferreira Lopes
URCAMP

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2023, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES, Usuário Externo**, em 18/12/2023, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 14:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1328472** e o código CRC **5A850818**.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

RESUMO

A região carbonífera gaúcha é uma das maiores produtoras de carvão mineral para fins energéticos no Brasil. No entanto, no âmbito da descarbonização do setor elétrico, este recurso energético requer o uso de tecnologias que visem a redução das emissões dos poluentes decorrentes da queima minimizando, dessa forma, os impactos ambientais tais como a poluição do ar, do solo e da água, a degradação das áreas mineradas e o impacto na saúde dos trabalhadores e da população local. O fomento ao uso de fontes energéticas menos poluidoras ou renováveis é uma importante demanda regional e contribui para a Transição Energética Justa (TEJ). Com base nestes aspectos, neste estudo estudou-se a possibilidade de usar o beneficiamento a seco no carvão da Jazida da Companhia Riograndense de Mineração de Candiota-RS tendo em vista a redução de impurezas. A metodologia consistiu em: i. descrever uma planta de beneficiamento; ii. Realizar uma análise quantitativa da influência do beneficiamento na composição do carvão mineral; iii. Com base na composição do carvão mineral ROM e beneficiado, comparar as emissões de gases de combustão, estimar as temperaturas de chama e a influência do excesso de ar nas emissões. Foi demonstrado que houve redução de impurezas como o enxofre e cinzas, redução da umidade e aumento do poder calorífico após o beneficiamento. Consequentemente, a temperatura da chama aumenta e, assim, possibilitar que menos combustível seja utilizado para gerar a mesma quantidade de MWh. Devido a redução de impurezas, houve redução nas emissões de Dióxido de enxofre (SO_x) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x). O excesso de ar influencia mais significativamente nas emissões de Dióxido de carbono (CO₂) e Monóxido de Carbono (CO). Concluiu-se que o beneficiamento é adequado e, como produto final, obtém-se um carvão com maior poder calorífico, menor teor de cinzas e de enxofre, resultando na redução de emissões de gases poluentes na atmosfera.

Palavras-chave: carvão mineral, beneficiamento a seco, transição energética, impactos ambientais, combustão.

ABSTRACT

The Rio Grande do Sul coal region is one of the largest producers of mineral coal for energy purposes in Brazil. However, in the context of decarbonizing the electricity sector, this energy resource requires the use of technologies aimed at reducing emissions of pollutants resulting from burning, thus minimizing environmental impacts such as air, soil and water pollution, degradation of mined areas and the impact on the health of workers and the local population. Encouraging the use of less polluting or renewable energy sources is an important regional demand and contributes to the Just Energy Transition (JET). Based on these aspects, this study investigated the possibility of using dry beneficiation on coal from the Companhia Riograndense de Mineração deposit in Candiota-RS, with a view to reducing impurities. The methodology consisted of: i. Describing a beneficiation plant; ii. Carrying out a quantitative analysis of the influence of beneficiation on the composition of mineral coal; iii. Based on the composition of ROM and beneficiated coal, comparing flue gas emissions, estimating flame temperatures and the influence of excess air on emissions. It was shown that there was a reduction in impurities such as sulphur and ash, a reduction in humidity and an increase in calorific value after beneficiation. As a result, the flame temperature rises, enabling less fuel to be used to generate the same amount of MWh. Due to the reduction in impurities, there was a reduction in SO_x and NO_x emissions. Excess air has a more significant influence on CO₂ and CO emissions. It was concluded that the processing is appropriate and, as a final product, coal is obtained with higher calorific value, lower ash and sulphur content, resulting in a reduction in emissions of polluting gases into the atmosphere.

Keywords: coal, dry processing, energy transition; environmental impacts; combustion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura guia da teoria de mudança das transições energéticas mundiais.....	18
Figura 2 - Consumo global de carvão no período de 2020-2023	24
Figura 3 - Composição química dos carvões minerais	30
Figura 4: Tipos de carvão, reservas e usos.	31
Figura 5 - Localização das principais jazidas de Carvão da Bacia do RS, SC e PR.	35
Figura 6 - Jazida de Candiota no Rio Grande do Sul	36
Figura 7 - Perfil Geológico das Camadas de Carvão na Jazida de Candiota na área da Mina Candiota.....	37
Figura 8: Esquema de uma planta em ciclo combinado	41
Figura 9: Esquema de uma planta IGCC de carvão.....	42
Figura 10: Combustor de Leito Fluidizado Circulante.....	44
Figura 11 - amostra de carvão bruto (ROM)	51
Figura 12 - amostra de carvão beneficiado.....	52
Figura 13 - Projeto modelo do sistema de beneficiamento	56
Figura 14: Mecanismo de separação das partículas.....	57
Figura 16 - Alterações na composição devido ao efeito do beneficiamento.	58
Figura 17 - Alterações no poder calorífico devido ao efeito do beneficiamento.	59
Figura 18 – Classificação do carvão segundo o percentual de cinzas	60
Figura 19 - Estimativa da redução de emissões em decorrência da redução do teor de impurezas do carvão bruto.....	64
Figura 20 - excesso de ar	64
Figura 21 - Recorte da figura 20.....	65
Figura 22 - Temperatura da chama com relação ao excesso de ar.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo global de carvão no período de 2020-2023 (Tonelada métrica)	23
Tabela 2: Reserva e produção mundial	25
Tabela 3 - Recursos de carvão mineral do Brasil.	33
Tabela 4 – Composição média (%) dos carvões.....	53
Tabela 5 - Composição aproximada do ar seco.....	54
Tabela 6 – Parâmetros do ar seco considerado neste estudo	54
Tabela 7 – Parâmetros do carvão ROM e beneficiado	61
Tabela 8 - Temperatura da chama.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.
CFC - Clorofluorocarboneto.
CCMI - Ciclo Combinado Misto a Gás.
CCS - Captura e Armazenamento de Carbono.
CGTEE - Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica.
CH₄ - Metano.
CO - Monóxido de Carbono.
CO₂ - Dióxido de carbono.
CRM - Companhia Riograndense de Mineração.
EPE - Empresa de Pesquisa Energética.
FGD - Dessulfurização dos Gases de Combustão.
Gcal - Gigacaloria.
H - Hidrogênio.
H₂ - Hidrogênio.
H₂O - Água.
H₂SO₄ - Ácido Sulfúrico.
IGCC - Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado.
MBTu - Milhões de Unidades Térmicas Britânicas.
MME - Ministério de Minas e Energia.
MWH - Megawatt-Hora.
N - Nitrogênio.
N₂ - Nitrogênio molecular.
N₂O - Óxido Nitroso.
NO - Óxido nítrico.
NO₂ - Dióxido de nitrogênio.
NO_x - Óxidos de Nitrogênio.
O₂ - Oxigênio molecular.
O₃ - Ozônio.
PCI - Poder Calorífico Inferior.
PFBC - Leito Fluidizado Pressurizado com Combustível.
PCS - Sistema de Controle de Poluição.
RC - Rendimento Calórico.

RS - Rio Grande do Sul.

ROM - Run-of-Mine - Carvão bruto, sem beneficiamento.

SO₂ - Dióxido de enxofre.

SO_x - Dióxido de enxofre.

TC - Tonelada Curta.

TEJ - Transição Energética Justa.

SUMÁRIO

RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. CONCEITOS GERAIS E REVISAO DE LITERATURA	17
3.2 Transição Energética	17
3.2.1 Transição Energética Justa	20
3.3 Carvão Mineral	22
3.2.2 Origem	27
3.2.3 Composição Química	28
3.2.4 Aplicações do carvão mineral	31
3.3 Carvão no Brasil	33
3.4. O Carvão de Candiota	38
3.5. Beneficiamento do Carvão Mineral	39
3.6. Tecnologias de combustão eficiente	40
3.6.1 Ciclo Combinado Integrado com Gaseificação	40
3.6.2 Combustão de Carvão Pulverizado	42
3.6.3 Combustão em Leito Fluidizado	43
3.6.4 Captura de carbono	45
3.6.4.1 Captura pós-combustão	46
3.6.4.2 Captura pré-combustão	46
3.7 Emissões em processos de combustão de carvão mineral	46
3.8 Controle de emissões em processos de combustão	48
3.8.1 Precipitadores eletrostáticos	48
3.8.2 Filtro de mangas	49
3.8.3 Dessulfurização dos gases	49
3.8.4 Sistemas de limpeza com gás quente	50
3.8.5 Lavadores úmidos	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1 Materiais	51
4.2 Métodos	52
4.2.1 Caracterização do carvão	53

4.2.2 Estequiometria da combustão	54
4.2.3 Estimativa da temperatura da chama	55
5. RESULTADOS DISCUSSÃO	56
5.1 Descrição da Planta de Beneficiamento	56
5.2 Análise quantitativa dos efeitos do beneficiamento sobre a composição do carvão mineral	58
5.3 Estequiometria da combustão	60
5.4 Estimativa da temperatura da chama	65
6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS	73

1. INTRODUÇÃO

O maior desafio da transição energética é a descarbonização da matriz. Apesar de contar com mais de 85% de geração hidrelétrica e com aumento da capacidade de geração a partir de fontes renováveis como a solar e a eólica, considerando-se a possibilidade de escassez hídrica e de intermitência, o Operador Nacional do Sistema Elétrico tem olhado com um novo viés a termoeletricidade (ONS) considerando a possibilidade desse tipo de geração como alternativa complementar ou para garantir a segurança energética como suporte a outras fontes (ONS, 2023).

Nesse sentido, o carvão mineral, apesar de ser um recurso energético potencialmente poluente, deve continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial, devido à disponibilidade de reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão (clean coal technologies). Essas características contribuem para livrar o abastecimento energético das limitações geopolítica ou de questões de segurança. Assim, o carvão apresenta potencial de contribuir, por exemplo, para aumento das taxas de eletrificação nos países em desenvolvimento e, nas regiões carboníferas, pode contribuir para geração de empregos e industrialização regional considerando-se, com esse viés, a Transição Energética Justa (PNE,2023).

Localizada no município de Candiota, a 400 km ao sul de Porto Alegre, a jazida de carvão mineral possui reservas de 1 bilhão de toneladas passíveis de mineração a céu aberto, em profundidades de até 50 metros (CRM, 2009)

Do ponto de vista técnico, o carvão de Candiota possui alto teor de cinzas, umidade e enxofre e baixo poder calorífico sendo classificado, segundo o rank, como sub-betuminoso C. (Pacheco, 2008)

Depois da mineração, o carvão é transportado para central térmica, onde é pulverizado e queimado em caldeiras. O baixo poder calorífico demanda um maior consumo de carvão para produção de energia. Um dos impactos decorrentes da queima de carvão é a formação de gases poluentes tais como o CO₂, os NO_x, e SO_x.

Considerando-se o tratado no acordo de Paris (2015), principal instrumento de cooperação internacional focado na redução de emissões de gases poluentes e na adaptação às mudanças climáticas no mundo, no que diz respeito às centrais térmicas, é preciso pensar e readequar tecnologias para minimizar os impactos decorrentes desse tipo de geração de energia (Sales, 2017).

Como alternativa para este panorama, têm-se os mecanismos de controle de emissões (Cosmo, 2020), o desenvolvimento de tecnologias de queima mais eficientes, tais como a queima em leito fluidizado (Souza, 2012) e o beneficiamento (Ribeiro, 2002). O beneficiamento será tratado neste trabalho.

O beneficiamento, em síntese, consiste na remoção de impurezas do carvão mineral, como o enxofre as cinzas e a umidade e aumentar o poder calorífico, para gerar a mesma quantidade de energia com menos combustível e, conseqüentemente, produzir menos poluentes (Souza, 2012).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a redução de contaminantes não carbonosos e o poder calorífico do carvão mineral bruto beneficiado.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever o sistema de beneficiamento a seco;
- Analisar quantitativamente a influência do beneficiamento na composição do carvão mineral e no poder calorífico.
- Estimar, em função da composição do carvão:
 - As emissões de CO, CO₂, SO₂, NO_x.
 - =A influência do excesso de ar nas emissões de CO, CO₂, NO_x.
 - Na temperatura teórica da chama.

3. CONCEITOS GERAIS E REVISAO DE LITERATURA

A revisão da literatura fala sobre transição energética, incluindo a transição energética justa. A seguir, sobre carvão mineral, beneficiamento, geração termelétrica a carvão e combustão.

3.2 Transição Energética

Nos últimos anos, têm ocorrido significativas transformações na matriz energética do mercado mundial, visando a sua transmissão para fontes mais limpas e renováveis, um processo globalmente reconhecido como transição energética. (INEEP, 2021)

De acordo com Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada- IPEA (2021), o sistema energético global foi historicamente construído em torno de fontes de energia fósseis, resultando em uma emissão significativa de CO₂ e outros gases de efeito estufa. As ações para reduzir as emissões de carbono e mitigar as mudanças climáticas estão agora centradas no desafio de reformular as fontes de energia dos países, isso requer iniciativas de políticas energéticas que promovam a adoção de fontes de energia mais limpas, como energias renováveis e gás natural.

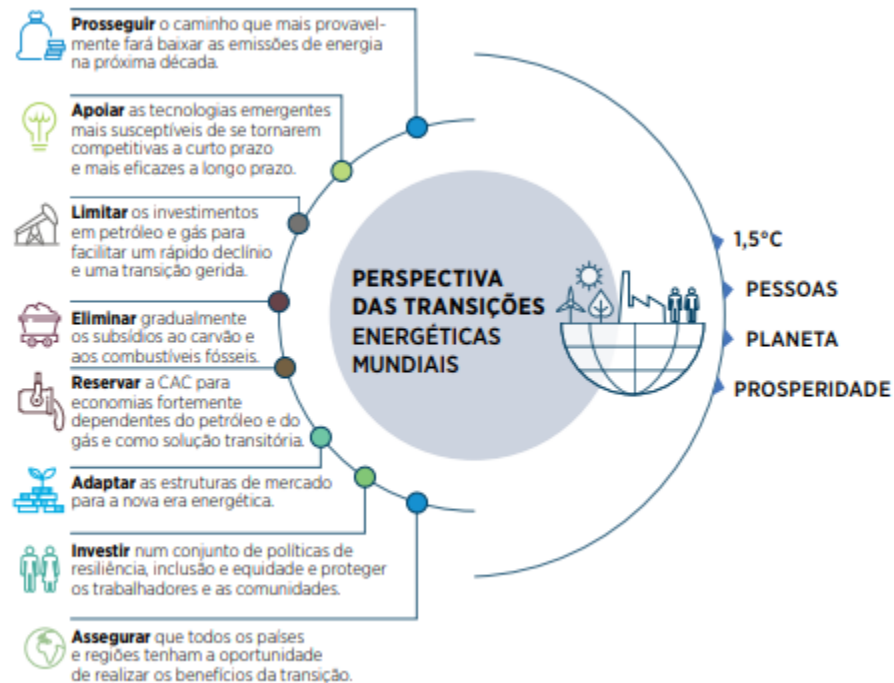
Segundo a Agência Internacional de Energia Renováveis (IRENA, 2021) o êxito da transmissão energética está intrinsecamente ligado à transformação completa do setor energético global, deixando de depender de fontes de energia fósseis e adotando fontes de energia com emissão zero de carbono até a segunda metade deste século, esse movimento visa a redução das emissões de dióxido de carbono provenientes da energia, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas e manter o aumento da temperatura global abaixo de 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais.

As perspectivas das transições energéticas mundiais da IRENA (2021) traçam um caminho em evolução para alcançar um futuro seguro para o clima, em linha com os objetivos do Acordo de Paris. O seu caminho para 1,5°C oferece um roteiro para acelerar a transição energética global, posicionando a eletrificação e a eficiência como principais impulsionadores da mudança, apoiados por energias renováveis, hidrogênio e biomassa sustentável.

Uma estratégia agressiva de eficiência energética, combinada com o aumento das energias renováveis para substituir os combustíveis fósseis, é o caminho mais realista para reduzir as emissões para metade até 2030. (p.2)

A Figura 1, apresentada abaixo, ilustra o esquema condutor da teoria de transformação nas mudanças globais de energia, a partir de uma perspectiva das transições energéticas mundiais.

Figura 1 - Estrutura guia da teoria de mudança das transições energéticas mundiais.



Fonte: Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), 2021. (p.12)

No entanto, a IRENA (2021) diz que a eliminação gradual dos combustíveis fósseis é um desafio complexo para os países altamente dependentes do carvão, especialmente quando se considera a necessidade de uma transição justa e equitativa para os trabalhadores e a comunidade afetada.

Com tudo, a descarbonização do setor energético exige ação imediata em escala global para acelerar a transição energética e cumprir os compromissos estabelecidos por países e regiões então a perspectivas das transições energéticas mundiais da IRENA delineiam uma trajetória em constante evolução para alcançar um futuro climaticamente seguro, alinhando com o objetivo dos Acordos de Paris.

De acordo com o IPEA (2021), no âmbito da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do acordo de Paris, o Brasil assumiu compromissos significativos de redução das emissões de CO₂ até 2025 e 2030. O país se comprometeu a reduzir as emissões em 37% em relação aos níveis de 2005 até 2025 e, como contribuição subsequente indicativa, a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030.

A estratégia adotada envolve uma abordagem flexível, indicando que a consecução desses objetivos pode ocorrer de várias maneiras, com diferentes contribuições dos diversos setores da economia. Com base nas projeções de crescimento da atividade econômica até 2030, o Brasil estabeleceu os seguintes compromissos para alcançar suas meta globais (EPE, 2016):

- Aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética em cerca de 18% até 2030, por meio da expansão de biocombustíveis.
- Elevar a participação de energias renováveis na matriz energética para 45%.
- Aumentar a participação de fontes renováveis diferentes da hídrica de 28% a 33% na matriz.
- Alcançar pelo menos 66% de participação da fonte hídrica na geração de eletricidade.
- Expandir o uso de energias renováveis diferentes da hídrica, especialmente solar, eólica e biomassa, para cerca de 23% no fornecimento de energia elétrica.
- Melhorar a eficiência no setor elétrico em 10%.

É importante ressaltar, ainda segundo IPEA (2021), que o Brasil já atingiu a meta voluntária de elevar a participação de energias renováveis na matriz para 45%. Isso se deve à significativa contribuição das fontes hídricas e dos derivados da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira. No entanto, o país enfrenta desafios de manter uma alta proporção de fontes renováveis no sistema energético, especialmente diante de restrições para a expansão de usinas hidrelétricas.

Conforme detalhado por Reis (2023), podem ser identificadas quatro iniciativas fundamentais para efetivar a transição energética. A primeira consiste em aumentar a eficiência energética, produzindo a mesma quantidade de riqueza com uma menor produção energética. A segunda envolve a substituição de fontes não renováveis por energias renováveis, reduzindo assim a participação de fontes renováveis que geram o efeito estufa, por energias menos intensivas em carbono, como as energias solar fotovoltaica, eólica e nuclear, além do desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono e armazenamento de energia. A terceira aborda a maior eletrificação da economia, promovendo a transição do uso de combustíveis fósseis para a utilização de eletricidade gerada por fontes com baixa intensidade de carbono. Por fim, a quarta e última iniciativa refere-se às medidas de adaptação do setor elétrico às novas condições climáticas impostas pelo aquecimento global.

3.2.1 Transição Energética Justa

O conceito de 'Transição Energética Justa', em escala global, surgiu a partir da década de 1980, tornando-se um catalisador significativo para promover empregos sustentáveis como parte da mudança de combustíveis fósseis para fontes renováveis. Este conceito aborda três dimensões fundamentais: justiça energética, que implica a aplicação dos direitos humanos em todas as fases do ciclo de vida da energia; justiça ambiental, que busca a igualdade no tratamento de todos os cidadãos, envolvendo-os nas decisões e implementação de leis ambientais; e justiça climática, que procura distribuir equitativamente os benefícios e os ônus das mudanças climáticas com base nos direitos humanos (McCauley e Heffron, 2018).

Teixeira (2023) citando Carvalho (2009), destaca que a Transição Energética Justa (TEJ) implica uma mudança de uma condição estritamente econômica e necessária para o desenvolvimento humano para uma nova fase em que o fator ambiental prevalece, representando um novo estado de sustentabilidade. Inicialmente proposto por McCauley e Heffron (2018) na década de 1980, o conceito de 'Transição Justa' a nível global serviu como impulsionador significativo para promover empregos sustentáveis durante a transição de combustíveis fósseis para fontes de energia mais limpas. A Alemanha foi pioneira nesse processo, seguida pela Espanha. Em 2000, a Alemanha implementou a Transição Energética ("Energiewende") com base na Lei de Energias Renováveis - "Erneuerbare Energien Gesetz" (EEG) - aprovada pelo Parlamento Alemão (HAAS, 2019).

No Brasil, a promulgação da Lei nº 14.299, em 5 de janeiro de 2022 (Anexo 1), marca oficialmente o início da transformação no cenário energético. Essa legislação modifica a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e a Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, introduzindo a subvenção econômica para as concessionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica de pequeno porte. Além disso, a referida Lei estabelece o Programa de Transição TEJ, com o propósito de impulsionar a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. Esse programa visa incentivar a diversificação da matriz energética, promover a eficiência energética e investir em projetos de energia renovável, reconversão profissional de trabalhadores do setor e fomentar a economia circular (BRASIL, 2022).

A lei Nº 18.330, promulgada em 2022 pelo Governo do estado de Santa Catarina, representa um marco legal significativo para o Estado, ao estabelecer as bases para a implementação de uma transição energética justa. A lei foi elaborada para enfrentar questões complexas relacionadas ao uso do carvão mineral, e a necessidade de equilibrar os imperativos econômicos com preocupações ambientais e sociais. A lei enuncia como principal

objetivo impulsionar o desenvolvimento econômico sustentável na região de Santa Catarina, proporcionando um caminho para a transição energética que respeite os limites do ambiente, enfatizando o uso responsável e racional dos recursos naturais, garantindo que as futuras gerações possam desfrutar dos mesmos benefícios, reconhecendo a importância da modernização da indústria do carvão, visando a exploração mais limpa do recurso, estimulando a pesquisa e inovação tecnológica relacionadas a transição energética e ao uso eficiente de recursos ambientais.

A exploração mineradora e a geração de energia desempenham um papel de extrema relevância do ponto de vista socioeconômico em certos municípios da Região Sul do Brasil com isso o ministério de Minas e Energia (MME) (2021) evidencie que ao longo do período de 1974 a 2017, cinco usinas termelétricas movidas a carvão mineral, com capacidade total de 478 MW, foram desativadas no estado do Rio Grande do Sul, da mesma forma é antecipado que outras instalações em Santa Catarina e Rio Grande do Sul enfrentam gradualmente o mesmo destino, devido a séries de razões, incluindo o término das concessões, o fim da sua vida útil e a inviabilidade comercial, especialmente com o encerramento do subsídio da conta de desenvolvimento energético (CDE) prevista para 2027. Uma vez que a indústria de mineração de carvão está intrinsecamente ligada à geração de energia térmica, a desativação das usinas afeta adversamente toda a cadeia produtiva do carvão, abrangendo desde a mineração e transporte até as usinas, a produção de cimento e outros usos industriais, resultando em um impacto econômico e imprevisíveis pernas que acarretam em impactos socioeconômicos significativos.

O MME (2021) ainda expõe um exemplo ilustrativo sobre a situação da região mineira de Santa Catarina, que possui uma dependência significativa da Usina Termelétrica - UTE Jorge Lacerda, com a capacidade de 857 MW. Caso essa usina não passe por modernizações, isso poderá ter consequências graves para a atividade econômica do estado, podendo até resultar em seu fechamento. Nesse cenário, o impacto econômico se estendia a cerca de 16 municípios, afetando a comunidade local, isso estava acontecendo no Paraná mas que graças a operação da mina e usina de figueira, que recentemente passaram por modernização, garantindo a continuidade dos empregos na cadeia produtiva da geração de energia a partir do carvão mineral.

Brose (2020) relata que a transição energética não é um fenômeno recente, ao longo da história, o avanço do capitalismo tem sido acompanhado por importantes transformações energéticas, como a transição da madeira para o carvão no século 19 e posteriormente do carvão para o petróleo no século 20, contudo, o conceito de transição energética vai além do

simples fechamento de usinas a carvão e da expansão de fontes de energia renovável, ela implica, fundamentalmente, uma mudança de paradigma no sistema elétrico.

3.3 Carvão Mineral

O carvão mineral é um tipo de combustível fóssil que se forma a partir da matéria orgânica de plantas que foi depositada em bacias sedimentares. Este processo ocorre ao longo de milhões de anos, quando a pressão e a temperatura agem sobre esses restos vegetais em um ambiente livre de contato com o ar, devido ao soterramento e à atividade geológica. Conforme o tempo geológico avança, esses resíduos vegetais passam por um processo de solidificação, perdem oxigênio e hidrogênio, e se enriquecem em carbono, em um fenômeno conhecido como carbonificação, ainda segundo Borba (2001),

Quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal foi submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação atingido, ou rank, e maior a qualidade do carvão. Os diversos estágios de carbonificação, do menor para o maior rank, são dados pelo esquema: turfa → sapropelito → linhito → carvão sub-betuminoso → carvão betuminoso → antracito. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito. (p. 1)

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2007), apesar de ser um combustível com potencial poluente, está destinado a manter um papel significativo como fonte de energia em escala global. Isso se deve a disponibilidade de vastas reservas geograficamente distribuídas em todo o mundo e ao desenvolvimento de tecnologias de carvão mais limpas. Portanto, o carvão possui um considerável potencial para contribuir para várias áreas, como o aumento das taxas de eletrificação em nações em desenvolvimento, a redução dos níveis de pobreza, o estímulo à industrialização e a promoção da melhoria da qualidade de vida.

Ainda pelo viés da EPE, no Balanço Energético Nacional de 2022 (BEN, 2022) (p.17) “O carvão utilizado é o carvão vapor, predominantemente de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A demanda de carvão vapor para este uso final aumentou 48% em relação ao ano anterior.”

O consumo mundial de carvão, em 2021, registrou um aumento em relação aos níveis de 2019, aproximando-se de seu máximo histórico e contribuindo significativamente para o maior incremento anual absoluto nas emissões globais de CO₂ provenientes da energia. A

utilização de carvão na geração de energia elétrica aumentou 7% em comparação com o ano anterior, totalizando 5.350 Mt. O crescimento na produção industrial também impulsionou o consumo de carvão em setores não relacionados à energia, apresentando um aumento de cerca de 3% (IEA, 2022).

A Tabela 1 e a Figura 2 ilustram o consumo global de carvão (em milhões de toneladas) de 2020 a 2022, incluindo a estimativa para o ano de 2023.

Tabela 1 - Consumo global de carvão no período de 2020-2023 (Tonelada métrica)

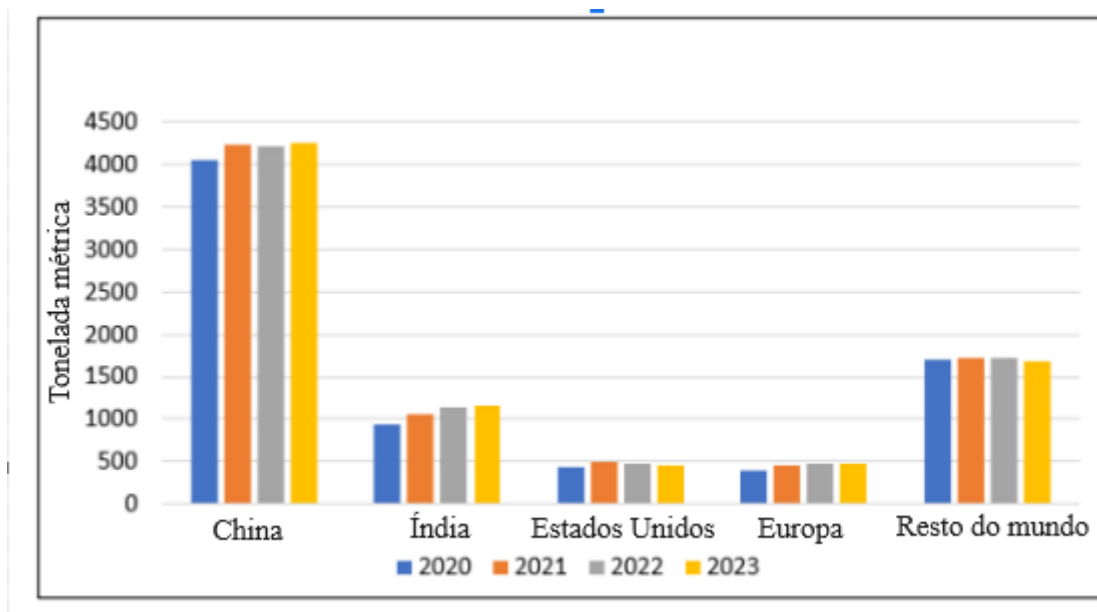
Países	2020	2021	Diferença 2020x2021	%	2022	Diferença 2021x2022	%	2023	Diferença 2022x2023	%
China	4.045	4.230	185	4,57	4.209	-21	-0,50	4.252	43	1,02
Índia	936	1.053	117	12,50	1.130	77	7,31	1.160	30	2,65
Estados Unidos	430	495	65	15,12	478	-17	-3,43	459	-19	3,97
Europa	392	447	55	14,03	476	29	6,49	472	-4	0,84
Resto mundo	1.707	1.722	15	0,88	1.714	-8	-0,46	1.690	-24	1,40
Total	7.510	7.947	437	5,82	8.007	60	0,76	8.033	26	0,32

Fonte: Adaptado de AIE (2022)

Os dados apresentados na Tabela 1 e na Figura 2 indicam que o consumo de carvão mineral na China registrou um aumento de 185 Mt, equivalente a 4,57%, de 2020 para 2021. No período subsequente, houve uma redução de 4.209 Mt, representando uma queda de -0,5% de 2021 para 2022. Projeta-se um aumento de 1,02%, resultando em um consumo de 4.252 Mt de carvão mineral de 2022 para 2023. É relevante destacar que, no período de 2020 a 2023, a China consumiu mais carvão do que todos os outros países combinados (IEA, 2022).

No que diz respeito à Índia, os dados da Tabela 1 revelam que o consumo de carvão mineral apresentou um aumento expressivo de 12,5% entre 2020 e 2021, atingindo a marca de 1.053 Mt. Posteriormente, houve uma diminuição para 7,31%, equivalente a 1.101 Mt, ao final de 2022. Para 2023, a estimativa sugere uma queda mais moderada, de 2,65%, totalizando um consumo de 1.160 Mt de carvão mineral (IEA, 2022).

Figura 2 - Consumo global de carvão no período de 2020-2023



Fonte: Adaptado de AIE (2022)

Para os Estados Unidos, no biênio de 2020 a 2021, registrou-se um consumo de carvão mineral significativamente menor em comparação com outros países no mesmo período, com um acréscimo de 65 Mt. Em 2022, observou-se uma redução de -3,43%, e as projeções para 2023 indicam uma queda de -3,97%, estimando um consumo de 459 Mt, conforme detalhado na Tabela 2 (IEA, 2022).

No caso da União Europeia, o consumo de carvão mineral aumentou em 55 Mt de 2020 para 2021, representando um incremento de 14,03%. Contudo, de 2021 para 2022, o aumento no consumo foi mais modesto, atingindo apenas 6,49%, enquanto as estimativas para 2023 apontam para uma queda de 0,84%, totalizando 472 Mt (IEA, 2022).

Para os demais países, excluindo China, Índia, Estados Unidos e União Europeia, observa-se que o consumo de carvão mineral foi de 1.707 Mt em 2020 e aumentou para 1.722 Mt em 2021, representando um acréscimo de 15 Mt, o que equivale a um incremento percentual de 0,88%. No ano de 2022, o consumo foi de 1.714 Mt, e as estimativas para 2023 indicam uma queda significativa de 24 Mt, resultando em um consumo previsto de 1.690 Mt, refletindo um percentual negativo de -1,49% (IEA, 2022).

3.2.1 Reserva

Com relação a reserva de carvão mineral a EPE (2007) citando o International Energy Outlook 2005 (EIA/DOE, 2005),

O carvão é o combustível fóssil com maior disponibilidade no mundo. Suas reservas totalizam 1 trilhão de toneladas, quantidade suficiente para suprir o consumo nos níveis atuais por 190 anos. Além disso, ao contrário do que ocorre com o petróleo e com o gás natural, as reservas de carvão apresentam uma distribuição geográfica no mundo muito mais equitativa, sendo que 75 países possuem reservas expressivas (p. 15)

O que relata o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2013) a produção global de carvão mineral não registrou um aumento significativo em comparação com o ano anterior 2012, conforme pode ser visto na Tabela 2. Cinco países experimentaram um crescimento na produção: Austrália (10,9%), Indonésia (9,1%), Brasil (11,7%), Canadá (4,0%) e China, que manteve níveis semelhantes aos de 2012, com um aumento de apenas 0,8%. Por outro lado, diversos países testemunharam uma redução na produção de carvão mineral, notavelmente os Estados Unidos, que registraram uma diminuição de (-3,2%). Isso ocorreu devido à transição para a produção de gás de xisto, que substituiu parcialmente a produção de carvão. Os principais produtores mundiais de carvão mineral em 2013 foram a China (46,6%), os Estados Unidos (11,3%), a Índia (7,7%) e a Austrália (6,1%).

Tabela 2: Reserva e produção mundial

Discriminação	Reservas (10 ⁶ t)		Produção (10 ⁶ t)	
	2023	2012	2013	%
Países				
Brasil	3.232	6,63	7,41	0,1
China	114.500	3.650,00	3.680,00	46,6
Estados unidos	237.295	922,06	892,64	11,3
Índia	60.600	605,84	605,13	7,7
Austrália	76.400	431,17	478,03	6,1
Indonésia	5.529	386,00	421,00	5,3
Rússia	157.010	354,80	347,10	4,4
África do Sul	30.156	260,03	256,70	3,3
Alemanha	40.699	196,17	190,27	2,4
Polônia	5.709	144,09	142,87	1,8
Cazaquistão	33.600	116,40	114,71	1,5
Ucrânia	33.873	88,20	88,20	1,1
Colômbia	6.746	89,20	85,50	1,1
Canadá	6.582	66,90	69,54	0,9
República Tcheca	1.100	54,10	48,98	0,0
Outros Países	47.907	471,79	468,40	0,1
Total	860.938	7.843	7.896,46	100

Fonte: Adaptado DNPM, 2013 (p.47)

Do volume de reservas (ANEEL,2008) evidencia-se que o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional. Mas o minério é pobre do

ponto de vista energético e não admite beneficiamento nem transporte, em função do elevado teor de impurezas. Isto faz com que sua utilização seja feita sem beneficiamento e na boca da mina.

As reservas conhecidas, composta por carvão sub-betuminoso, compreendem basicamente carvão coqueificável pobre e carvão energético pobre a médio. Ressalta-se que segundo informações da agência nacional de mineração, o Brasil possuía, em 2016, reserva de carvão mineral na ordem de 3.8 bilhões na região sul do país. (EPE,2022, p. 2)

Borba (2001) descreve a distribuição geográfica e geológica das reservas de carvão no Brasil da seguinte maneira,

com a jazida de Candiota, no sul do Rio Grande do Sul, possuindo cerca de 23% das reservas medidas oficiais do país (1.722.860.000 t) e 51% das provadas e prováveis (475.360.000 t). Candiota é a principal jazida carbonífera brasileira, não só em termos de reservas como também por possuir camadas de carvão de alta espessura e grande continuidade com pequena cobertura, o que proporciona uma lavra em larga escala de alta rentabilidade. A principal camada, que leva o nome da própria jazida, Candiota, tem cerca de 5 m de espessura em média, com aproximadamente 10 m de cobertura e uma área minerável de forma contínua a céu aberto calculada em torno de 4.400 ha com os últimos dados disponíveis. Em compensação, tem um carvão energético pobre, que não admite beneficiamento nem transporte, precisando ser usado na forma de ROM (Run-of-Mine, carvão bruto, sem beneficiamento) e na boca da mina. (p. 4)

Ainda segundo Borba (2001), Na região central do Rio Grande do Sul, a oeste de Porto Alegre, encontramos dez jazidas que, juntas, representam cerca de 39% das reservas medidas oficialmente de carvão no Brasil, totalizando 2.858.462.995 toneladas, além de abrigar 26% das reservas provadas e prováveis, com um total de 241.010.000 toneladas. No mesmo estado, existem as jazidas de Morungava-Chico Lomã e Santa Terezinha, entre Porto Alegre e o litoral, contribuindo com aproximadamente 16% das reservas medidas oficialmente no país, somando 1.181.447.055 toneladas. No entanto, essas jazidas são complexas, localizadas exclusivamente no subsolo, algumas delas atingindo profundidades de até 800 metros, e sofrem com a falta de infraestrutura mineira na região.

Em Santa Catarina, Borba (2001) destaca que o carvão ocorre na bacia Sul-Catarinense, indo de sul para norte do município de Araranguá ao de Lauro Müller, com cerca de 21% das reservas medidas oficiais brasileiras (1.525.021.083 t) e 22% das provadas e prováveis (201.921.000 t), As partes a céu aberto e de subsolo rasas já foram quase todas mineradas, de modo que há uma crescente dificuldade dessa jazida em manter um ritmo

intenso de lavra, com minas profundas e estruturalmente difíceis. Por fim, tem-se na região central do Paraná a pequena jazida de Figueira, com um carvão energético médio, representando apenas cerca de 1% das reservas medidas oficiais do país e das provadas e prováveis.

3.2.2 Origem

O carvão mineral, de origem fóssil, foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Sua aplicação na geração de vapor para movimentar as máquinas foi um dos pilares da Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII. Já no fim do século XIX, o vapor foi aproveitado na produção de energia elétrica. (ANEEL 2008)

Segundo Cosmo (2020) ao longo da história, a humanidade adotou várias fontes de energia, incluindo o uso de madeira e resíduos vegetais secos para a geração de calor, que era empregado tanto na preparação de alimentos quanto na proteção contra animais selvagens e o frio, e salienta que.

Com a evolução da história, o ser humano foi desenvolvendo mecanismos mais sofisticados de trabalho e que necessitavam cada vez mais de fontes de energia altamente potenciais, como os potenciais de geração de calor dos combustíveis fósseis, neste cenário, um dos primeiros e principais combustíveis a ser utilizado foi o carvão mineral. No contexto histórico este combustível aquece muitas casas europeias durante a Idade Média. (p. 1)

De acordo com o SIECESC (2016 apud Cosmo, 2020, p. 3) “O carvão mineral foi uma das primeiras fontes de energia utilizada em larga escala. Na história mais recente, o carvão pode ter sido conhecido pelos chineses muito antes de Cristo. Na Europa ele passou a ser consumido na idade média (395-1430), como durante a queima do carvão ocorre a emissão de gases com forte odor, acredita-se que o mesmo foi proibido em alguns lugares e só voltou a ser utilizado no século XVIII.”

Durante a Revolução Industrial Inglesa, o carvão desempenhou um papel fundamental na transição energética. O inventor inglês James Watt utilizou o carvão como fonte de energia para aquecer a água e gerar vapor, que impulsionava motores, substituindo a força de trabalho humana e animal. O carvão foi amplamente empregado como fonte de energia para máquinas, locomotivas e na geração de energia elétrica (SIECESC, 2016, citado por Cosmo, 2020, p. 3).

Além disso, entre 1900 e 1950, especialmente durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial, o consumo de carvão mineral experimentou um aumento significativo, apesar de

uma queda em 1930. Na década de 50, com a descoberta de vastas reservas de petróleo e gás, houve uma redução global no consumo de carvão. No entanto, a crise do petróleo, gerada por conflitos no Oriente Médio, resultou em um novo aumento na demanda por carvão (SIECESC, 2016, mencionado por Cosmo 2020, p. 3).

Conforme relatório da EPE de 2007, baseado nas informações de Gomes et al. (1998):

“A história do carvão fóssil no Brasil teve início em 1795, quando técnicos ingleses, que estavam envolvidos na construção de ferrovias na região do Baixo Jacuí, no Rio Grande do Sul, descobriram a existência desse recurso”. Em 1801, surgiram os primeiros relatos sobre a presença de carvão na região de Candiota, próxima à fronteira com o Uruguai, também graças ao trabalho dos ingleses. A atividade de mineração de carvão na região começou na segunda metade do século passado, conduzida ainda por trabalhadores ingleses, alguns dos quais migraram para a região do Baixo Jacuí. O imperador Dom Pedro II visitou o Rio Grande do Sul e inaugurou uma mina de carvão em Arroio dos Ratos, que foi batizada como "Princesa Isabel".

3.2.3 Composição Química

De acordo com a pesquisa de Pacheco (2008), os carvões não se apresentam como substâncias homogêneas, mas são compostos por diversos constituintes conhecidos como macerais. Estes macerais exibem uma ampla variação em sua composição química e propriedades físicas, mas não possuem uma estrutura cristalina. Em contraste, os minerais inorgânicos possuem uma composição química bem definida e apresentam uma estrutura cristalina. Em carvões de baixo grau de metamorfismo, os macerais podem ser classificados em diferentes tipos e variedades, permitindo uma subdivisão mais detalhada das partículas de carvão.

Pacheco, (2008) também observa que, na atualidade, os macerais são classificados em três grupos distintos: vitrinita, liptinita e inertinita. Em casos de carvões com baixo teor de matéria orgânica, a humanita é utilizada em substituição à vitrinita, sendo combinada com uma ampla variedade de macerais e submacerais identificáveis. As propriedades físicas e químicas dos macerais, incluindo sua composição elementar, teor de umidade, dureza, densidade e características petrográficas, apresentam notáveis variações. Essas discrepâncias nas propriedades químicas e físicas, como destaca Pacheco, têm um impacto significativo no desempenho tecnológico dos macerais.

Conforme observações feitas por Cosmo (2020) citando (Borba, 2001; SIECESC, 2016; Moderna Plus, 2016),

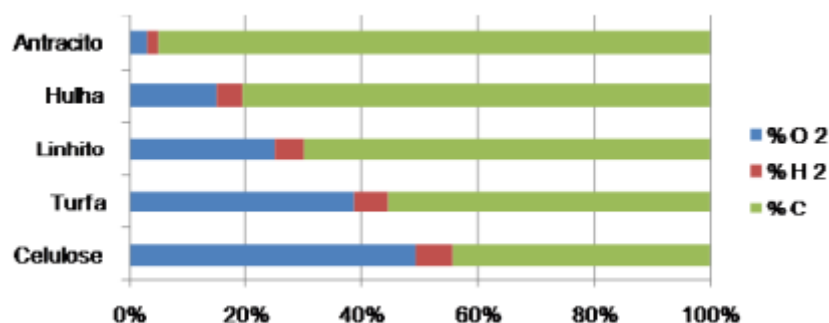
O carvão mineral é constituído principalmente por carbono, e o componente principal responsável pela elevada percentagem de carbono em sua composição é a madeira, que compõe certa de metade do teor de carbono. Além disso, a madeira é composta por aproximadamente 50% de carbono, 44% de oxigênio, 5% de hidrogênio e 1% de outros compostos. (p.1)

Além disso, destacam que essas condições levaram o carvão a desenvolver composições de carbono diversas, as quais variam de acordo com o período de formação e a quantidade de material vegetal presente na fonte original. Essa diversidade de fatores resultou na existência de depósitos de carvão com uma ampla gama de teores de carbono, dando origem a diferentes categorias de carvão, que por sua vez são indicativas de sua qualidade. Entre as principais categorias de carvão, encontram-se a turfa, o linhito, a hulha (também conhecida como carvão betuminoso), o antracito e o grafite. Muitos especialistas argumentam que o linhito representa o estágio mínimo de maturação do carvão para seu uso prático.

Com relação ao rank do carvão mineral, Pacheco, (2008. p.22) mencionando (Gammidge, 2001; Correia da Silva et al, 1987), descreve “O rank de um carvão se refere ao grau de coalificação suportado pela matéria orgânica, sendo calculado pelo conteúdo da mistura, da energia específica, da refletância da vitrinita ou da matéria volátil, estes são parâmetros do rank” (p.22)

Conforme relatado pela Agência Nacional de Mineral (ANM) (2021), o carvão mineral é predominantemente composto por carbono, embora contenham outras substâncias em sua composição, como enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio. O teor de carbono assume um papel fundamental, pois ele é o fator determinante da maturidade geológica desse mineral, conhecida como "rank", ou seja, o estágio de carbonificação alcançado em sua evolução. Propriedades como umidade, poder calorífico, teores de carbono e hidrogênio, assim como a fluorescência, são características que permitem estimar o rank, visto que o aumento da carbonificação aumenta a refletividade e reduz os níveis de hidrogênio e matérias voláteis. Por isso, o desenvolvimento desse combustível é categorizado em quatro distintas etapas, sendo a turfa a fase inicial, caracterizada por um teor de carbono reduzido, seguida pelo linhito, a hulha e, por fim, o antracito, em conformidade com o rank, em uma progressão crescente de maturidade geológica, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Composição química dos carvões minerais



Fonte: DNPM, 2013. p.53

No que diz respeito à turfa, Cosmo (2020), com base em (Crossetti, 2006), ressalta que a qualidade de depósitos de carvão mineral é influenciada pela pressão e temperatura durante sua formação, os quais afetam diretamente sua maturidade orgânica. A turfa é identificada como o estágio primordial do carvão mineral, notável por seu baixo teor de carbono, evoluindo posteriormente para o linhito, ambos reconhecidos por sua baixa maturidade orgânica.

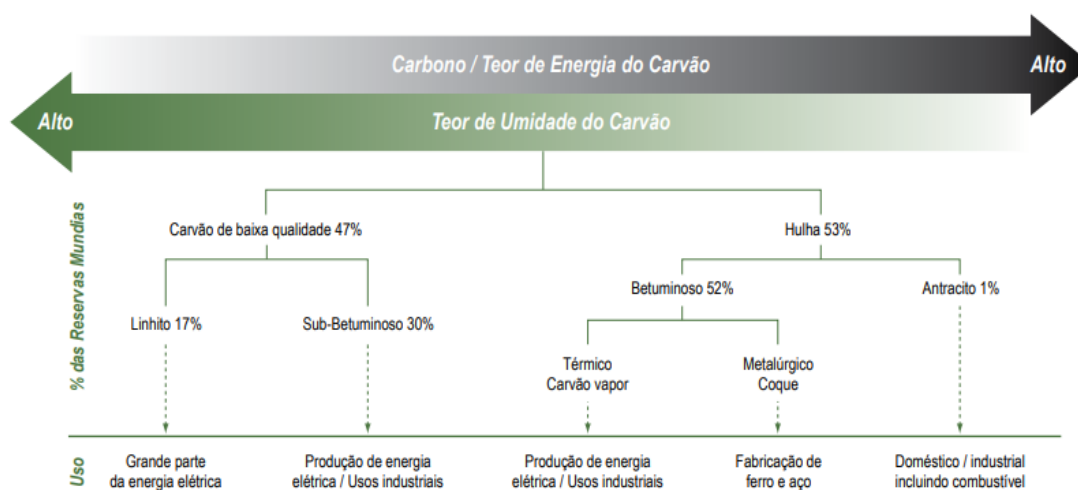
Em relação ao linhito, Cosmo, (2020), com respaldo em (DNPM, 2016), destaca que sua presença próxima à superfície facilita a extração, tornando-o um recurso de baixo custo. Devido à rápida deterioração, baixo poder calorífico e tendência à combustão espontânea, o linhito é primariamente empregado na geração de eletricidade. É notável como o único tipo de carvão estritamente biológico e fóssil, originado a partir de matéria orgânica vegetal.

No contexto da hulha, Cosmo, (2020), referindo-se a (Branco, 2013; Kawa, 2014), descreve-a como um tipo de carvão mineral ou carvão natural, formado ao longo de milhões de anos pela fossilização de madeira soterrada. A hulha apresenta elevados teores de carbono e contém betume em sua composição. Ela desempenha um papel crucial em duas aplicações principais: como carvão energético em usinas termelétricas, devido ao seu teor de cinzas, e como carvão metalúrgico, adequado para a produção de coque. A hulha é considerada a variedade mais pura e amplamente utilizada de carvão mineral.

Por último, ainda de acordo com Cosmo, (2020), com base em (Legner, 2012; Cano 2016), destaca o antracito, caracterizado por sua combustão lenta e, portanto, mais apropriado para uso doméstico. Devido à sua baixa presença de impurezas e elevado teor de carbono, é o tipo de carvão com a maior proporção de carbono. Sua aplicação inclui o tratamento de água, onde atua como um filtro eficaz, retendo impurezas, com uma vida útil de aproximadamente três anos.

Conforme ilustrado na figura 4 por ANEEL (2008), 53% das reservas globais de carvão mineral consistem em carvão de alto teor de carbono (hulha), enquanto os 47% restantes são compostos por carvão de baixo teor de carbono. A produção e o consumo em escala mundial concentram-se nas categorias intermediárias, ou seja, os tipos de carvão betuminoso/sub-betuminoso e linhito. O primeiro, caracterizado por seu maior valor térmico, é objeto de comércio internacional. Por sua vez, o linhito é empregado principalmente na geração local de energia termelétrica.

Figura 4: Tipos de carvão, reservas e usos.



Fonte: Aneel (2008) P.19

3.2.4 Aplicações do carvão mineral

O Ministério de Minas e Energia (2021) aborda as aplicações do carvão mineral no contexto brasileiro.

O carvão mineral no Brasil possui duas principais aplicações: como combustível para geração de energia elétrica e industrial (indústria de cimento, papel e celulose, cerâmica, química, etc.); e como termo redutor na siderurgia para produção de coque, coque de fundição, ferro-gusa e aço. (p.14)

Nos dias de hoje, de acordo com a ANEEL (2008) a aplicação primordial do carvão mineral globalmente é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Em segundo plano, encontramos sua aplicação industrial voltada para a produção de calor, ou seja, energia térmica necessária para os diversos processos produtivos, tais como secagem de produtos, fabricação de cerâmicas e vidros, entre outros. Um desenvolvimento natural dessa

atividade, que tem experimentado expansão, é a cogeração ou a utilização do vapor produzido nos processos industriais para gerar eletricidade adicional.

Cosmo 2020 citando (SIECESC, 2016) explica que “Cerca de 70% do aço e ferro produzidos pelas indústrias utilizam um tipo de carvão especial na sua produção, o carvão metalúrgico, principal combustível para o alto forno, neste processo são fundidos o minério de ferro e o aço. Estes produtos são utilizados na construção de carros, pontes, edifícios, casas e etc. No Brasil não há produção de carvão metalúrgico, as indústrias importam de países produtores como EUA, China, Austrália e Polônia. Do gás produzido do carvão pode se obter fertilizantes, amônia, combustíveis líquidos, lubrificantes, combustíveis para aviação, diesel, metanol e etc. (p. 6)”.

De acordo com informações fornecidas pela ANEEL (2016), a utilização do carvão mineral em processos energéticos envolve as seguintes etapas resumidas: inicialmente, o carvão é extraído do solo, fragmentado e armazenado em silos. Posteriormente, é transportado para a usina, onde passa por um novo processo de armazenamento. Nessa fase, ele é transformado em pó, o que proporciona um melhor aproveitamento térmico quando é introduzido nas fornalhas das caldeiras. A queima do carvão nas fornalhas gera calor, que é então transferido para a água que circula pelos tubos envolvendo a fornalha. A energia térmica, ou calor, presente no vapor resultante é convertida em energia mecânica, ou cinética, que impulsiona a turbina conectada ao gerador de energia elétrica. Esse processo é fundamental para a produção de eletricidade a partir do carvão mineral.

Cosmo, (2020) aponta, com base em SIECESC (2016), que o carvão mineral, durante seu processo de formação, pode originar produtos de interesse na agricultura. Por exemplo, a partir do gás gerado, é possível obter fertilizantes à base de amônia. Além disso, durante o processo de queima, uma das técnicas empregadas para remover o enxofre e purificar os gases gerados consiste na adição de calcário moído ao carvão, resultando na absorção do enxofre pelo calcário e na produção de gesso. Também é mencionado que o lavador de gases com amônia gera o sulfato de amônia como subproduto.

Outra aplicação agrícola relevante do carvão é o uso das cinzas resultantes de sua queima como fertilizante e corretivo de acidez do solo. Estudos indicam que essas cinzas podem aumentar a resistência de algumas plantas a doenças, como a antracnose do feijão (Cosmo, 2020; Martins et al., 2001).

No entanto, ressalta-se que o principal aproveitamento dos resíduos de carvão mineral é na produção de fertilizantes à base de sulfato de amônia, como a ureia. Essa aplicação contribui para uma gestão mais eficaz dos resíduos, resultando na redução dos custos de

produção de fertilizantes e estimulando sua fabricação na região Sul do Brasil. Além disso, essa prática ajuda a diminuir a dependência brasileira das importações de fertilizantes (Cosmo, 2020; Zancan, 2008).

3.3 Carvão no Brasil

Segundo informações da ANEEL (2016), as reservas de carvão mineral no Brasil consistem predominantemente nos tipos linhito e sub-betuminoso. As maiores concentrações dessas reservas estão localizadas nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, enquanto as reservas de menor porte são encontradas no Paraná e em São Paulo. Apesar de ocupar o décimo lugar no ranking mundial de reservas, o total de reservas brasileiras alcança aproximadamente 7 bilhões de toneladas, o que equivale a menos de 1% das reservas globais desse recurso. A Associação Brasileira do Carvão Mineral (ABCM) estima que as reservas conhecidas seriam capazes de gerar cerca de 17 mil megawatts (MW) de energia atualmente.

Sobre os recursos brasileiros conhecidos atualmente, “São de 32 bilhões de toneladas de carvão, com um poder calorífico médio de 2.500 kcal/kg (ROM), representam um potencial de abastecimento elétrico de 18.600 MW durante cem anos de operação.” (MME, 2021, p. 34). A Tabela 3 exibe informações planejadas sobre os recursos de carvão minerais encontrados no Brasil.

Tabela 3 - Recursos de carvão mineral do Brasil.

Estado	Jazida	Recursos (10⁶ t)	% do Brasil
RS	Candiota	12.278	89,25
	Santa Terezinha	4.283	
	Morungava/Chico	3.128	
	Loma		
	Charqueadas	2.993	
	Leão	2.439	
	Iruí	1.666	
	Capané	1.023	
	Outras	994	
	SOMA	28.804	
SC	Sul-Catarinense	3.363	10,41
PR	Diversas	104	0,32
SP	Diversas	8	0,02
Total		32.279	100,00

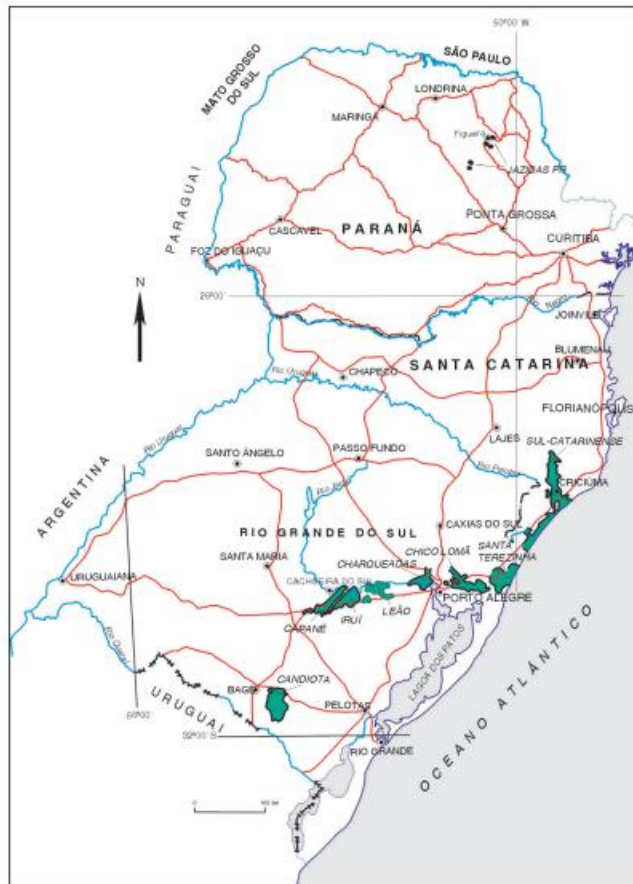
Fonte: Adaptado de CPRM, 2003.

A utilização econômica de carvões que possuem baixo poder calorífico e elevados teores de cinzas e enxofre, como é o caso no contexto brasileiro, direciona-se para operações que envolvem o uso do carvão mineral em seu estado bruto. Nesse cenário, a implementação de tecnologias de queima limpa é destacada, pois elas resultam na redução dos custos relacionados ao manuseio do carvão e às medidas de proteção ambiental. Além disso, tais tecnologias proporcionam rendimentos térmicos mais elevados em todo o processo (MME, 2021)

As reservas de carvão no Brasil totalizam aproximadamente 32 bilhões de toneladas, segundo CPRM (2003). Deste total, cerca de 28 bilhões de toneladas (representando 89%) estão localizados no estado do Rio Grande do Sul, enquanto Santa Catarina detém 3,3 bilhões de toneladas (equivalente a 10%). Por outro lado, o Paraná possui reservas de carvão da ordem de 103 milhões de toneladas, correspondendo a 0,3% do total, enquanto o estado de São Paulo detém uma quantidade significativamente menor, com apenas 8,5 milhões de toneladas.

A Figura 5 ilustra o mapa que destaca a localização das principais jazidas de carvão na Bacia dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, indicadas em verde.

Figura 5 - Localização das principais jazidas de Carvão da Bacia do RS, SC e PR.

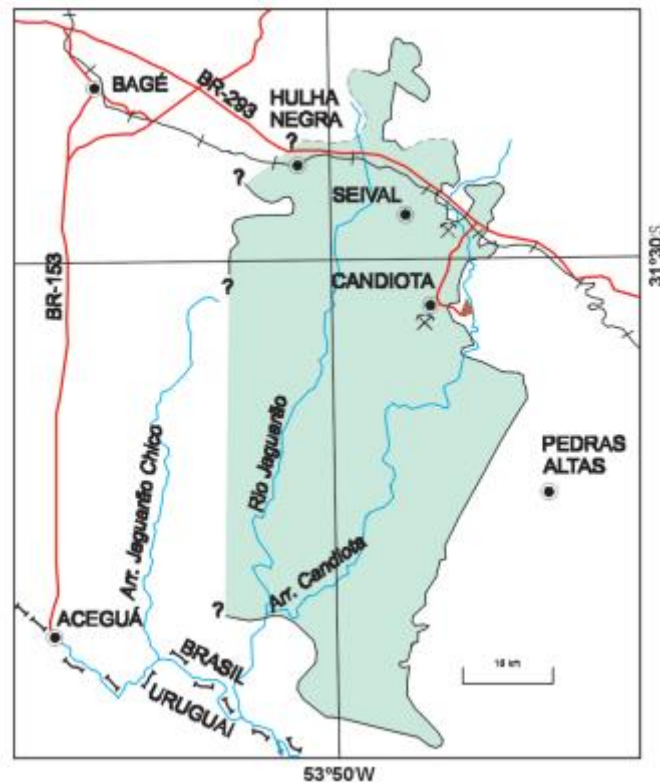


Fonte: Gomes, A. J. P., Cruz, P. R., Borges, L. P. CPRM, (2003) (apud Süffert (1997) e Aboarrage e Lopes (1986) p.580

Com relação a Jazida de Candiota, Figura 6, a CPRM (2003) menciona que é a maior jazida de carvão do país, com cerca de 38% (12 bilhões de toneladas) dos recursos totais brasileiros,

A área delimitada é da ordem de 2.000 km², com 17 camadas, das quais a camada Candiota é a mais importante. A espessura média da camada total é de 4,5 m, localmente ultrapassando os seis metros. É a única em lavra e responde por 63% dos recursos da jazida. Junto com as camadas Candiota Inferior 1 e 2 (CI1 e CI2), contém 90% das reservas. (p. 10)

Figura 6 - Jazida de Candiota no Rio Grande do Sul

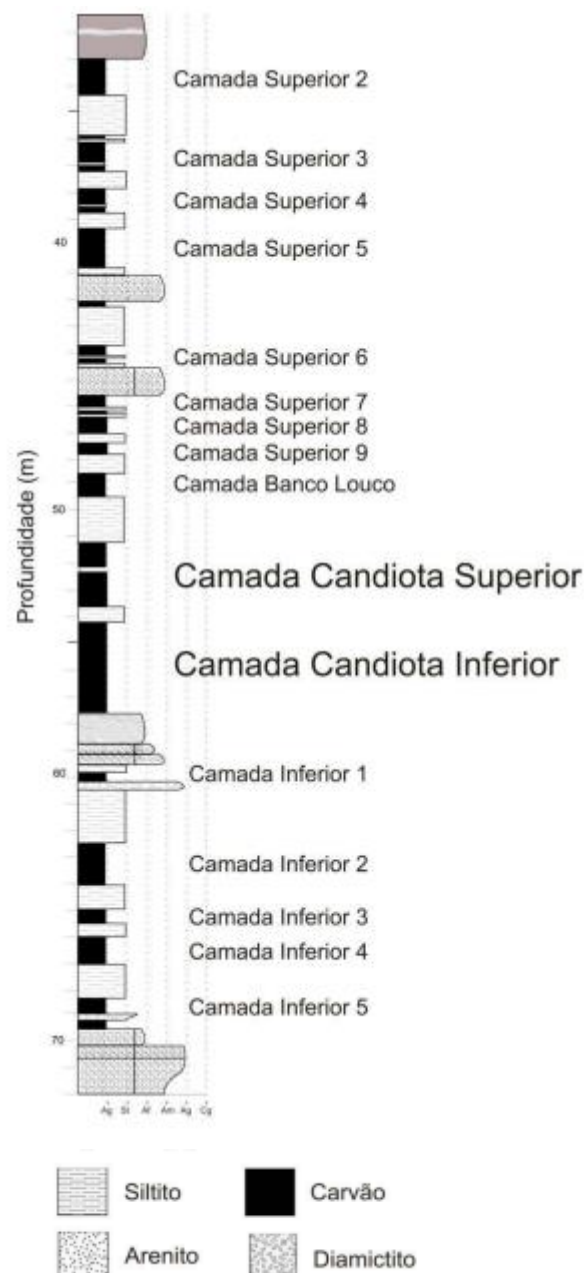


Fonte: Gomes, A. J. P., Cruz, P. R., Borges, L. P. CPRM, 2003, p.587 apud (Süffert, 1997)

De acordo EPE (2007), com referências de (Gomes et al.,2003), a camada de carvão apresenta uma espessura média de 4,5 metros e uma cobertura inferior a 50 metros, tornando-a adequada para mineração a céu aberto. Essas características conferem à jazida uma atratividade econômica. No entanto, é importante notar que o carvão bruto extraído dessa jazida tem teores elevados de cinzas, variando entre 51% e 54%, bem como de enxofre, que atinge cerca de 1%. Essas composições resultam em rendimentos de combustível relativamente baixos, situando-se entre 30% e 52%.

A Figura 7 mostra o perfil geológico detalhado das camadas de carvão na Jazida de Candiota, especificamente na área da Mina Candiota.

Figura 7 - Perfil Geológico das Camadas de Carvão na Jazida de Candiota na área da Mina Candiota



Fonte: Lunkes (2010).

Formam-se até 17 estratos de carvão, classificados como camadas inferiores 1-5, camada Candiota inferior, camada Candiota superior, camada Banco Louco e camadas superiores 1-9. Ocasionalmente, podem ocorrer camadas menores sem continuidade lateral, conhecidas como camadas leito. A disposição principal das camadas de carvão na jazida de

Candiota é ilustrada na Figura 7, utilizando dados do furo F-371 da malha MVII da Companhia Rio-Grandense de Mineração.(Lunkes, 2010).

A Companhia Riograndense de Mineração (CRM) explora dois bancos de carvão, a Camada Candiota inferior e a Camada Candiota superior, cada um com aproximadamente 2 metros de espessura, intercalados por uma camada de argilito de 80 cm (Pacheco, 2008).

Estima-se que o intervalo das camadas inferiores 1 a inferior 5, localizado abaixo das camadas Candiota superior e Candiota inferior, abrange uma área de aproximadamente 32 km² com espessura cumulativa de até m (Holz e Kalkreuth, 2004). Ainda segundo Lunkes (2010) devido à prática de recuperação do terreno durante a exploração das camadas de carvão de Candiota, que envolve a reposição de parte da cobertura retirada e da cobertura vegetal, as camadas superiores e inferiores não estão sendo aproveitadas, resultando em uma redução drástica nas reservas totais do depósito.

3.4. O Carvão de Candiota

De acordo com Pacheco (2008) o carvão mineral de Candiota tem as seguintes características “o teor de cinzas do carvão ROM é de ordem de 50% para Camada Superior e 52% para camada inferior; o teor de enxofre total fica em torno de 2,0%, sendo que menos de 0,9% corresponde a enxofre orgânico. O enxofre sulfático apresenta valores baixos de 0,3%.” (p.12)

O baixo poder calorífico tem como consequência um maior consumo do energético para a produção de energia elétrica. Em relação ao padrão norte-americano para especificação de caldeiras a vapor (6.210 kcal/kg), pode-se dizer que se gasta praticamente o dobro da quantidade de carvão de Candiota para produzir a mesma quantidade de energia elétrica. (EPE, 2007., 119)

Ainda de acordo com os estudos de Pacheco (2008), após a extração, o carvão é submetido a um processo de cominuição para atingir um tamanho de partícula de -100 mm em uma instalação de britagem pertencente à própria CRM. Posteriormente, é transportado para a usina termoeletrica, onde é pulverizado e queimado em caldeiras com as seguintes características: (1) uma grande quantidade de finos, com teores elevados de cinzas; (2) uma baixa liberação da matéria orgânica; (3) o teor de enxofre total do carvão é baixo em frações granulométricas menores, indicando a liberação de pirita sob a forma de nódulos; e (4) uma alta porosidade, o que torna inviável o uso de água em seu beneficiamento.

O carvão extraído da Mina de Candiota, segundo o CPRM (2003), possui uma das mais baixas tarifas de energia no cenário global. Em setembro de 2000, o sistema elétrico

desembolsou aproximadamente US\$9 por tonelada (R\$16,13 por tonelada) para adquirir o carvão energético tipo CE-3300 de Candiota, que era destinado ao abastecimento da usina termoelétrica. A esse preço, o custo equivale a cerca de US\$2,7 por gigacaloria (Gcal) ou a US\$0,688 por milhão de unidades térmicas britânicas (MBtu) (onde 1 MBtu é igual a 0,252 quilocalorias).

3.5. Beneficiamento do Carvão Mineral

A finalidade do processo de beneficiamento é alcançada por meio da separação do material com base em suas características físicas. De acordo com o MME (2007) citando (Borges, 2004), as características essenciais do carvão bruto, necessárias para estabelecer um esquema de beneficiamento, incluem: i) O tamanho de britagem ideal; ii) As curvas granulométricas do carvão após o processo de britagem; iii) As curvas de lavabilidade para cada fração granulométrica acima de 0,5mm; iv) Estudos sobre a degradação do carvão.

Conforme a CPRM (2003, p. 22) “ O sistema de beneficiamento do carvão conta com britadores, jigues, ciclones, mesas concentradoras e flotação.” E ainda explica que o termo "grade" é frequentemente utilizado para se referir de forma genérica às relações entre matéria orgânica e inorgânica presentes em uma camada de carvão, bem como para descrever as características da matéria inorgânica associada. A lavabilidade, representando a capacidade de separação entre a matéria orgânica e inorgânica por meio de processos de beneficiamento, como lavadores, jigues, separação densimétrica e centrifugação, é o parâmetro primordial da gradação dos carvões. A matéria inorgânica é essencialmente caracterizada pelos teores de cinzas e enxofre.

Conforme mencionado por Raposo (2023), a jigagem pode ser realizada tanto em meio úmido quanto em meio seco. No entanto, no contexto do processamento mineral, é comum utilizar jigues hidráulicos, considerados mais eficientes do que os jigues a seco (citados em Kumar & Kumar, 2018; Hughes, Roux e Campbell, 2019). Apesar disso, as preocupações crescentes relacionadas ao impacto ambiental do uso e gerenciamento da água em instalações de beneficiamento, juntamente com a ênfase nas questões de responsabilidade social e ambiental, têm impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis de processamento (conforme discutido por Sardana et al., 2020; Souza et al., 2022). Nesse contexto, as técnicas de jigagem a seco têm ganhado destaque devido à sua natureza ambientalmente amigável.

Quando se trata de beneficiamento a seco de carvão mineral, Pacheco (2008) apud (Lins, 1998),

É provavelmente o método gravimétrico de concentração mais complexo, por causa de suas contínuas variações hidrodinâmicas. Neste processo, a separação dos minerais de densidades diferentes é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo a estratificação de minerais. (p. 39)

3.6. Tecnologias de combustão eficiente

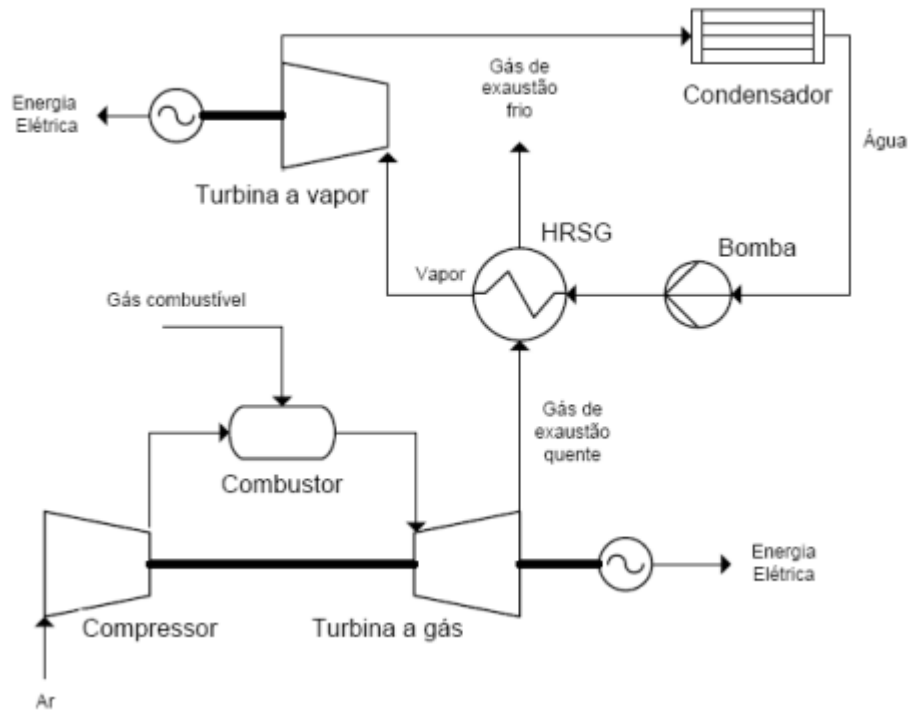
Segundo Oliveira (2022) citando (Carvalho Junior & Macquay, 2007) e (De las Obras-LoCERTALES et al., 2015), os processos de combustão desempenham um papel crucial na geração de energia para a sociedade. Nesses processos, o combustível reage com o oxidante, que geralmente é o ar atmosférico, liberando uma quantidade significativa de energia por meio de uma reação exotérmica. O ar atmosférico é composto, em volume, por aproximadamente 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases (como neônio, hélio, metano, etc.). No entanto, apenas o oxigênio (O₂) é o componente ativo no processo de combustão para a geração de calor. O nitrogênio (N₂), por sua vez, não participa ativamente no processo de combustão, sendo responsável pela formação de óxidos de nitrogênio (NO_x).

Ainda nas palavras de Oliveira (2022) a utilização de carvão mineral na produção de energia exige o emprego de tecnologias mais limpas para mitigar os impactos ambientais decorrentes das preocupações climáticas relacionadas aos gases de efeito estufa (CO₂) e poluentes como dióxido de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Por conseguinte, as principais tecnologias empregadas para a geração de energia a partir do carvão são: Combustão de carvão em leito fluidizado; Ciclo combinado integrado com gaseificação de carvão; e Processos que utilizam carvão pulverizado.

3.6.1 Ciclo Combinado Integrado com Gaseificação

O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada (IGCC - Integrated Gasification Combined Cycle) está evoluindo a partir da integração de duas tecnologias: a geração de energia em ciclo combinado e a gaseificação de combustíveis sólidos ou líquidos. A geração em ciclo combinado é conhecida por sua alta eficiência. O sistema é mostrado na Figura 8 (Hoffmann, 2010, citando Dolezal, 2001).

Figura 8: Esquema de uma planta em ciclo combinado

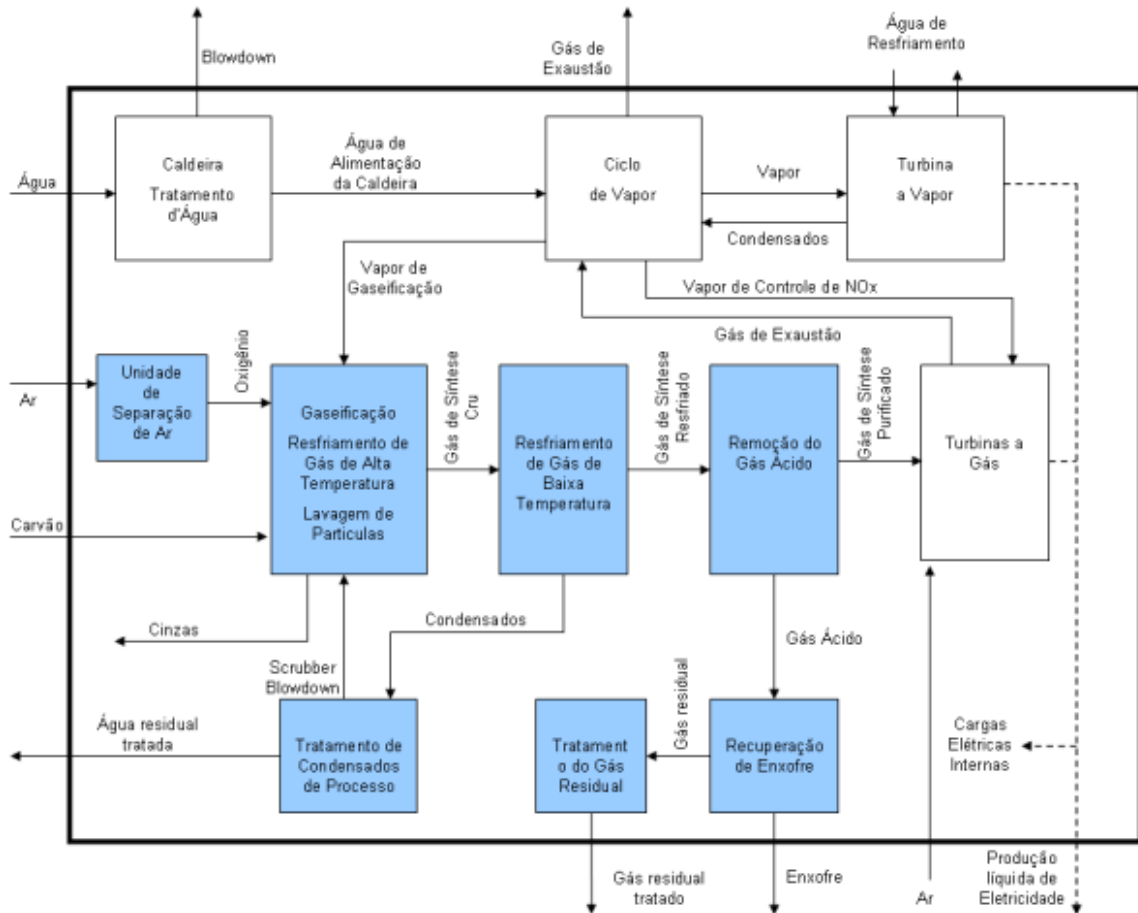


Fonte: Hoffmann, 2010

De acordo com Nunes (2022), citando (Magnus, Tavares e Salvaro, 2017), a gaseificação do carvão oferece a oportunidade de aproveitar a alta eficiência da tecnologia do ciclo combinado, enquanto utiliza um combustível com reservas significativas nos principais mercados consumidores, com preço baixo e estável. Além disso, a gaseificação não se limita ao uso do carvão, mas também se estende a vários outros combustíveis sólidos e líquidos de baixo valor, como biomassa, coque de petróleo e resíduos de refinaria.

O ciclo tem início com a gaseificação do carvão, que resulta na produção de um gás sintetizado (syngas) e vapor. O syngas passa por um processo de remoção de enxofre, mercúrio e partículas, e é direcionado para uma turbina a combustão que o utiliza como combustível. Os gases de exaustão da turbina a combustão, juntamente com o vapor gerado na gaseificação, passam por um recuperador de calor, que produz vapor para movimentar uma turbina acoplada a um gerador, completando assim o ciclo Nunes (2022), citando (Magnus, Tavares e Salvaro, 2017). A Figura 9 apresenta o esquema de uma planta de Gaseificação Integrada de Ciclo Combinado (IGCC) utilizando carvão.

Figura 9: Esquema de uma planta IGCC de carvão.



Fonte: Hoffmann, 2010

3.6.2 Combustão de Carvão Pulverizado

De acordo com a análise de Ribeiro, (2002), citando (JÜNTGEN, H., 1987), o carvão pulverizado tem se destacado como uma alternativa vantajosa para a geração de energia termelétrica. A combustão do carvão pulverizado ocorre em velocidades superiores à combustão em grelhas, sendo que o carvão é finamente pulverizado, apresentando granulometria inferior a 0,1 mm. As temperaturas alcançadas durante o processo são mais uniformes, o que facilita a construção de caldeiras de grandes dimensões.

Adicionalmente, segundo Nunes (2022), com referência a (Tolmasquim, 2016), após o beneficiamento e pulverização, o carvão é introduzido na caldeira pneumáticamente, juntamente com o ar de combustão (ar primário) por meio de bicos queimadores. Em determinados casos, o ar secundário e terciário também são utilizados. A temperatura de operação varia entre 1300 e 1500°C, com um tempo médio de permanência do combustível na

caldeira geralmente entre 2 e 5 segundos. Essa prática é adotada para uma ampla variedade de carvões, embora com restrições para carvões com altos teores de cinzas.

Nas palavras de Ribeiro, (2002), mencionando (Bazzo, 1995), os queimadores de carvão pulverizado são projetados para evitar o contato da chama com as paredes da fornalha e garantir uma mistura precisa com o ar de combustão. A utilização de carvão pulverizado exige cuidados especiais com a estabilidade da chama e sua preparação, envolvendo o uso de esteiras transportadoras, silos, moinhos e sistemas complementares de operação.

Além disso, a introdução do ar na queima do carvão pulverizado é frequentemente pré-aquecida pelos gases de combustão. Parte desse ar (ar primário) é desviada para transportar o pó de carvão do moinho para os queimadores, que são distribuídos de maneira adequada pelas paredes da fornalha. Naturalmente, a escolha por fornalhas de carvão pulverizado implica investimentos adicionais em equipamentos de moagem de carvão e remoção de cinzas arrastadas pelos gases de combustão, além de custos operacionais e de manutenção consideráveis para esses equipamentos, conforme Ribeiro, (2002). citando (Bazzo 1995).

Adicionalmente, Nunes (2022) observa que nos queimadores de baixo número de oxidação (NO_x), o excesso de ar é regulado de forma a promover a combustão o mais próximo possível da completa, permitindo a queima de todo o carbono contido no carvão com a mínima formação de NO_x , satisfazendo assim os requisitos ambientais para emissões de NO_x na atmosfera. Isso é alcançado pela redução da quantidade de ar introduzida na zona de combustão primária, criando um ambiente rico em combustível e deficiente em oxigênio. O 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 o sistema FGD (Flue Gas Desulphurization) após a combustão.

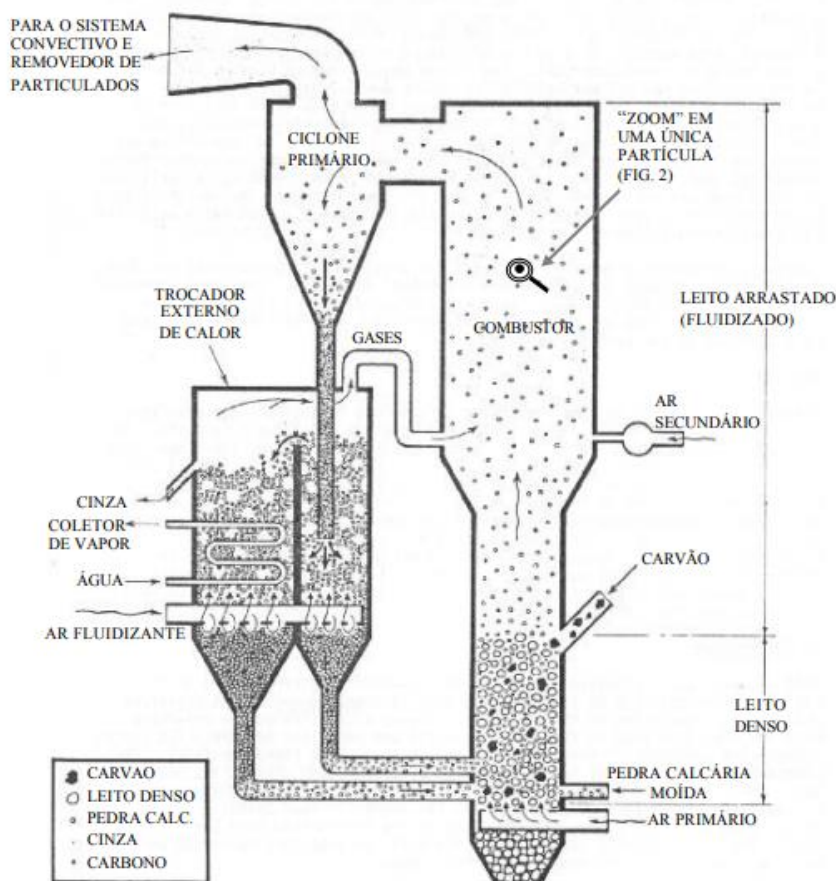
3.6.3 Combustão em Leito Fluidizado

Nunes (2022) discute que 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, normalmente ar. Esta tecnologia permite um contato eficiente entre as fases gás-sólido e opera a temperaturas mais baixas, em torno de 700-900 °C, o que possibilita a redução de gases de efeito estufa como os NO_x e os SO_x , além de possibilitar a utilização de carvões de baixo rank (Philippsen, 2018). O 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).

A Figura 10 ilustra o funcionamento de um Combustor de Leito Fluidizado Circulante.

Figura 10: Combustor de Leito Fluidizado Circulante



Fonte: Costa, V. J. (2002) citando (Nack et al, 1988)

Costa (2002) citando (Nack et al, 1988) destaca que o combustor de leito fluidizado circulante, um dispositivo amplamente utilizado na queima de carvão, é composto por dois leitos: um denso no fundo, formado por partículas de pedra calcária e cinza, e um fluidizado, geralmente de areia, que se encontra no topo. Enquanto as partículas do leito fluidizado circulam pelo combustor, ciclone primário e trocador de calor, o leito denso permanece no fundo, proporcionando uma eficaz mistura entre o combustível, a pedra calcária e o material circulante. A temperatura do combustível é controlada pelo retorno dos sólidos resfriados do trocador de calor, otimizando a reação de captura de enxofre. Os sólidos arrastados são queimados no combustível, separados no ciclone primário e resfriados no trocador de calor.

Para controlar a emissão de partículas, é necessário um dispositivo adicional, como um filtro ou precipitador eletrostático. O calor reciclado no trocador de calor permite aumentar o arraste do leito fluidizado, o que é útil em situações de reinício ou ignição. Este arranjo separa a combustão da transferência de calor, o que é benéfico para reduzir as emissões de NO_x. A fase de combustão requer uma fração estequiométrica de ar introduzida acima do leito denso após um balanço. Além disso, a separação dos dispositivos de combustão e transferência de calor melhora a eficiência do combustível.

3.6.4 Captura de carbono

O sequestro de carbono refere-se à captura das emissões gasosas provenientes das usinas termelétricas a carvão, seguida pelo armazenamento dessas emissões em reservatórios naturais presentes na crosta terrestre. Atualmente, a prática de armazenar CO₂ em reservatórios de petróleo e gás é amplamente favorecida, e há um considerável potencial para o armazenamento em aquíferos, uma área de pesquisa em andamento na Europa, nos Estados Unidos e no Japão.

Como resultado, no futuro, a localização das usinas pode ser determinada não apenas com base no tipo de combustível, disponibilidade de água para resfriamento ou demanda de energia, mas também em função das alternativas disponíveis para o armazenamento de CO₂ (Zancan, 2006).

As primeiras implementações em larga escala da captura de CO₂ remontam à década de 1970, nos Estados Unidos e no Canadá, impulsionadas principalmente pela necessidade de CO₂ para a Recuperação Avançada de Petróleo (EOR). Posteriormente, a Noruega também progrediu nesse campo, impulsionada por políticas governamentais que incluíam impostos sobre as emissões de CO₂. Durante os anos 2000, ocorreram avanços significativos no Canadá, Austrália, Estados Unidos e Arábia Saudita. No Brasil, a adoção desta tecnologia ocorreu mais tardiamente, em 2014, evidenciando a limitada experiência nacional nesse domínio (IEA, 2015; Tolmasquim, 2016).

Segunda IEA, (2015) atualmente, há 15 instalações em escala industrial distribuídas globalmente, que conseguem capturar anualmente 27 milhões de toneladas de CO₂.

Existem três tipos de captura aplicados à geração termelétrica, sendo estes a captura de pós-combustão, a captura de pré-combustão e a captura de oxi-combustão. Comumente, os processos de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) implementados nas tecnologias de geração de energia a carvão pulverizado (PC) e gaseificação integrada a ciclo combinado

(IGCC) são, respectivamente, de pós-combustão e pré-combustão (IEA, 2015), como será discutido a seguir.

3.6.4.1 Captura pós-combustão

A captura na pós-combustão é considerada um processo adicional à planta de geração de energia elétrica, assemelhando-se a outros tratamentos de gás presentes na planta, como a dessulfurização. Essa característica torna o processo de pós-combustão o mais amplamente utilizado para ser integrado em usinas já existentes, representando uma rota de captura com potencial de aplicação para a redução de CO₂ a curto e médio prazo (ROCHEDO, 2011).

Esse método de captura não causa alterações significativas no processo de geração, uma vez que o sistema começa com a entrada dos gases de pós-combustão. A absorção química do CO₂ ocorre por meio de aminas, que são então conduzidas para um reator de regeneração, onde são separadas em temperaturas entre 100 a 140 °C (IEA, 2013).

3.6.4.2 Captura pré-combustão

Geralmente empregados em instalações IGCC durante o processo de gaseificação do carvão, os sistemas de captura na pré-combustão, como o próprio nome sugere, realizam a captura do carbono antes de sua combustão (ROCHEDO, 2011).

Na etapa de gaseificação, o combustível passa por uma conversão para produzir syngas, composto principalmente por H₂, CO e CO₂. O método de pré-combustão busca remover o CO₂ do gás de síntese, direcionando a mistura rica em hidrogênio para ser queimada na turbina a gás. Para prevenir a formação de CO₂ pela queima do CO, é comum empregar processos como Sour Shift e Selexol, nos quais o monóxido de carbono reage com água, resultando na formação de dióxido de carbono e hidrogênio (IEA, 2013).

3.7 Emissões em processos de combustão de carvão mineral

Conforme EPE, (2007), um dos principais impactos socioambientais resultantes da operação de usinas termelétricas movidas a carvão mineral está relacionado à emissão de CO₂, um gás de efeito estufa (GEE).

Os gases de efeito estufa, provenientes de atividades humanas, têm sua origem principalmente na queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, em usinas termelétricas, indústrias, veículos em circulação, sistemas domésticos de aquecimento, bem como em práticas agropecuárias, lixões e aterros sanitários.

Gases como CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio troposférico (O₃) e clorofluorcarbonos (CFCs) têm capacidade de absorver a radiação infravermelha emitida quando a luz visível do sol incide sobre a Terra. Essa absorção impede que parte do calor seja dissipada de volta ao espaço, contribuindo para o aumento da temperatura na superfície terrestre.

De acordo com (HOSKYN et al apud LORA, 2002):, as principais ações relacionadas à redução das emissões de CO₂ incluem: Melhoria da eficiência e práticas de conservação energética; Substituição de combustíveis; Adoção de fontes de energia renovável; Implementação de processos de captura e armazenamento de CO₂.

Segundo a EPE, (2007), a queima de carvão, sem um controle ambientalmente protetor, não apenas contribui para o aumento do efeito estufa, mas também emite gases responsáveis pela formação de chuva ácida, principalmente o SO₂. Quando o SO₂ reage com o oxigênio e a água presente na atmosfera, ele se transforma em ácido sulfúrico (H₂SO₄), que precipita uma forma de chuva ácida. A situação se agrava quando ocorre uma sinergia entre o material particulado e o SO₂, pois o material particulado atua como um resultado na ocorrência que gera o H₂SO₄, facilitando e acelerando a formação da chuva ácida. Os NO_x também são recomendados para a chuva ácida, formando ácido nítrico (HNO₃) quando combinados com a água presente na atmosfera. O SO₂ e o NO_x podem causar danos tanto por meio da precipitação seca, que se depositam sobre a vegetação e estruturas (monumentos, prédios, etc.), quanto por meio da ocorrência abundante, distribuídas na chuva ou em vapores d'água atmosférica, a chuva ácida proveniente das termelétricas e do carvão mineral pode levar a alterações ambientais significativas, como corrosão de estruturas metálicas.

Outro aspecto significativo em relação às usinas termelétricas a carvão mineral diz respeito à produção de resíduos sólidos. Entre todas as termelétricas, as usinas movidas a carvão são as maiores geradoras de resíduos sólidos. Estes resíduos incluem cinzas leves ou secas, pesadas ou úmidas, e lama proveniente do sistema de dessulfuração de gases, quando esse sistema é empregado. Em menor escala, contêm os resíduos sólidos, os sedimentos provenientes do sistema de tratamento de efluentes líquidos e resíduos eventualmente resultantes do processo de preparação dos combustíveis (Medeiros, 2003).

As cinzas secas, devido às suas propriedades químicas, físicas e pozolânicas, encontram-se amplamente acessíveis na indústria de cimento, além de serem utilizadas na fabricação de cerâmicas, vidros e tintas (Santos, 2002). Quando uma quantidade de cinza seca não comercializada é específica, ela é convertida em cinza úmida e transportada para áreas específicas à deposição de cinzas (Medeiros, 2003). No Brasil, essas áreas são constituídas por aterros (bacias) ou pelas próprias cavas de mineração.

3.8 Controle de emissões em processos de combustão

3.8.1 Precipitadores eletrostáticos

Como aponta a EPE (2007) essa técnica opera removendo material particulado de correntes gasosas por meio da criação de um diferencial de tensão entre eletrodos. Ao passar pelos eletrodos, o gás contendo partículas é ionizado, resultando em cargas nas partículas. Essas partículas contidas são atraídas para o eletrodo de carga oposta, onde são removidas, permitindo que o gás se prossiga. Durante a operação, os eletrodos são limpos periodicamente para remover a camada de pó acumulada. A exceção é coletada e descartada de acordo com suas características. Amplamente utilizada em usinas termelétricas, essa técnica pode atingir eficiência superior a 99,5%.

As vantagens incluem alta eficiência na coleta de material particulado, consumo de energia relativamente baixo, coleta e disposição de resíduos a seco, baixa perda de carga (menos de 13 mmca), capacidade de operação contínua com mínima manutenção, custo de operação relativamente baixo, capacidade de trabalhar em condições de alta pressão e flexível, e operação eficaz em uma ampla faixa de temperaturas, incluindo altas temperaturas (até 700°C), além da capacidade de tratar altas vazões de maneira eficiente. (EPE, 2007)

Por outro lado ainda de acordo com (EPE, 2007), as especificações englobam custos elevados, sensibilidade a oscilações nas condições de corrente de gás, flexibilidade pouca nas faixas de operação, dificuldade na remoção de algumas partículas devido a propriedades resistivas extremas, necessidade de espaço específico para instalação, risco de explosão ao tratar gases ou partículas de combustíveis, exigências de precauções especiais para proteção contra os riscos de alta tensão e produção de ozônio pelo eletrodo negativo durante a ionização do gás, manutenção relativamente inovadora e personalizada, e incapacidade de controle das emissões de emissões gasosas.

3.8.2 Filtro de mangas

Para EPE (2007), essa técnica remove o pó de correntes de gás, passando-as por tecido poroso carregado de material particulado. As partículas formam uma torta com porosidade igual ou menor que a do tecido. Geralmente, essa torta é responsável pela filtração.

Em altas temperaturas (OECD/IEA, 2003) diz que, partículas transportadas em correntes de gás são retidas por múltiplos filtros de fibras sintéticas. Temperaturas acima de 300°C são comuns, sendo os filtros de manga aplicados em setores como a indústria pesada e mineração.

As vantagens, segundo EPE (2007), incluem altas taxas de remoção de material particulado, operação simples, capacidade de lidar com diversos pós, insensibilidade a flutuações na vazão de gás, coleta e disposição de resíduos a seco, ausência de risco de alta tensão e eficiência na coleta de fuligem e gases contaminantes. Os filtros podem ser configurados de várias maneiras para atender às necessidades da instalação.

As desvantagens englobam a necessidade de materiais refratários em locais de filtros com temperaturas acima de 300°C, requisitos especiais para tratamento de mangas em alguns casos riscam de incêndio ou explosão com altas concentrações de pó, custo de manutenção relativamente alto, redução da vida útil das mangas em condições específicas, incompatibilidade com gases úmidos, possíveis problemas com especificações específicas, necessidade de proteção respiratória durante a troca de mangas, destruição das mangas em altas temperaturas ou presença de produtos corrosivos, e a necessidade de um sistema paralelo para manter a operação constante durante a limpeza do filtro. (EPE, 2007)

3.8.3 Dessulfurização dos gases

A tecnologia de dessulfurização de gases (FGD - Flue Gas Desulfurisation) utiliza um reagente, comumente chamado de calcário, para extrair o SO₂ dos dutos de gás. Atualmente, o sistema FGD está presente em 27 países, proporcionando consideráveis reduções nas emissões, com eficiência de remoção que pode superar 99%. Os custos das unidades FGD têm experimentado uma queda significativa, sendo aproximadamente um terço do valor registrado na década de 70 (WCI, 2004).

3.8.4 Sistemas de limpeza com gás quente

Essa tecnologia é reconhecida por seu significativo potencial de aplicação em certas formas avançadas de geração de energia. Partículas no vapor de gás são capturadas à medida que o gás atravessa uma série de filtros porosos, como tubos, velas e outras configurações, operando em temperaturas entre 250 e 400°C. Muitas usinas de gaseificação integrada de ciclo combinado (IGCC) que queimam carvão são enviadas, para o tratamento de seus gases, cerâmica porosa ou unidades de filtros metálicos com gás quente (OCDE/IEA, 2003).

3.8.5 Lavadores úmidos

Uma ampla variedade de técnicas (espuma, filmes, colunas de spray, etc.) está disponível, a maioria delas baseada no uso de um líquido para capturar partículas de gás. Essas técnicas são extensivamente empregadas em aplicações na indústria de queima de carvão, e também são utilizadas em situações de alta temperatura e pressão, como em Gaseificação Integrada de Ciclo Combinado (IGCC) e combustão em leito fluidizado (PFBC). Em alguns casos, o controle de partículas pode ser combinado com a remoção de outras substâncias, como SO₂, HF e HCl (OECD/IEA, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Neste estudo, foram empregadas duas amostras distintas: uma correspondente ao carvão bruto (ROM), conforme ilustrado na Figura 11, e outra representativa do carvão beneficiado, como apresentado na Figura 12.

Figura 11 - amostra de carvão bruto (ROM)



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Figura 12 - amostra de carvão beneficiado



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

As amostras de carvão utilizadas neste estudo foram fornecidas pela Usina Termelétrica Ambar Energia, anteriormente conhecida como CGT Eletrosul, localizada na cidade de Candiota, RS. Esta usina apresenta uma potência instalada de 350 MW. O carvão utilizado é proveniente da Companhia Rio-grandense de Mineração (CRM), com uma produção diária de 5.000 toneladas, e da SSM Seival Sul Mineração, com uma produção diária de 1.500 toneladas.

4.2 Métodos

A metodologia adotada neste estudo engloba as seguintes fases:

- a. Coleta das amostras de carvão provenientes da Usina Termelétrica Ambar Energia;
- b. Descrição do processo de beneficiamento do carvão na planta industrial;
- c. Análise química quantitativa da composição do carvão mineral antes e após o beneficiamento;
- d. Estequiometria da combustão do carvão;

- e. Estimativa da temperatura da chama durante o processo de combustão;
- f. Análise da influência do excesso de ar na composição dos gases resultantes da combustão.

4.2.1 Caracterização do carvão

A Tabela 4 apresenta a composição percentual (%) das amostras de carvão obtidas da CRM. Em virtude da ausência de informações fornecidas pela empresa sobre os elementos Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N), foram utilizados os valores do estudo de Pacheco (2008), que abordou o mesmo processo de beneficiamento. Essas composições foram essenciais como referência para a realização do balanço de massa.

Tabela 4 – Composição média (%) dos carvões

Composição (%)									
Amostra de carvão	C (b.s.)	H (b.s.)	O (b.s.)	N (b.s.)	S (b.s.)	Umidade e	Cinzas (b.s.)	Poder Calorífico Superior - PCS (kcal kg ⁻¹) (b.s.)	Poder Calorífico Inferior - PCI (kcal kg ⁻¹) (b.s.)
Não beneficiado	27,16	2,37	9,01	0,61	2,19	16,78	52,23	3305	3185
Beneficiado	29,87	2,6	9,97	0,65	1,6	10,53	48,77	3545	3410

Fonte: Elaboração própria, 2023.

b.s. = base seca

4.2.2 Estequiometria da combustão

Para determinar as frações molares de cada componente nos produtos de combustão, considerou-se assumiu-se como produtos de combustão os seguintes componentes: CO₂, vapor d'água (H₂O), oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂). O oxigênio (O₂) utilizado na combustão é proveniente da atmosfera, cuja composição está detalhada na Tabela 5.

Tabela 5 - 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

Contudo, para fins de cálculos de combustão, considerou-se a composição de 79% de nitrogênio (N₂) e 21% de oxigênio (O₂) para o ar atmosférico. Também foi admitido que o nitrogênio (N₂) é inerte na reação. Os parâmetros do ar seco considerados neste estudo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do ar seco considerado neste estudo

Componente	Fração molar (moli/mol ar)	Massa molecular (gmol ⁻¹)
N ₂	0,21	32
O ₂	0,79	28,01
Ar	1	28,84

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Em condições ideais, a quantidade de ar é estequiométrica, ou seja, deveria ser fornecida a quantidade necessária à combustão completa do combustível. Contudo, na prática, na fornalha da caldeira a mistura entre o ar e o combustível não é ideal e isso resulta em uma combustão incompleta. Com isso, um excesso de ar é demandado. Aqui, foi utilizado um excesso de 25%

de ar e fixados os seguintes parâmetros relacionados aos produtos de combustão devido ao excesso. (Nunes de Oliveira, M., 2022)

Excesso de ar: 25%;

% de queima do N₂: 5%;

% de carbono nas cinzas: 10%;

Relação NO₂/NO: 0,05;

Relação CO/CO₂: 0,005.

Após a realização dos cálculos estequiométricos da combustão do carvão, foram determinados os percentuais dos produtos da combustão.

4.2.3 Estimativa da temperatura da chama

Havendo variação do poder calorífico, haverá também variação da energia térmica disponível para troca de calor. Por se tratar de um estudo comparativo, carvão não beneficiado – ROM e beneficiado, é possível calcular a temperatura de chama, considerando-se as condições de combustão constantes: quantidade de combustível e excesso de ar. Neste estudo o excesso de ar foi de 25%. Esta metodologia foi baseada no trabalho de (Pacheco, 2008). A Equação 1 representa o cálculo da estimativa teórica da temperatura da chama. Para valores reais de temperatura da chama, considera-se uma eficiência de 60%.

$$T_c = \frac{PCI}{MGU \times c_p} \quad (1)$$

Onde:

T_c = temperatura da chama [°C];

PCI = poder calorífico inferior [kcal kg⁻¹];

MGU = massa de gases úmidos [kg];

c_p = calor específico médio dos gases na temperatura da chama [kcal (kg°C)⁻¹] = 0,250956 kcal(kg°C)⁻¹

5. RESULTADOS DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da execução da metodologia descrita no item anterior.

5.1 Descrição da Planta de Beneficiamento

O componente central e crucial deste sistema de beneficiamento a seco do carvão é representado pela mesa vibratória com injeção de ar conforme Figura 13. Essa mesa é composta por um leito de separação, dispositivo de acionamento, estrutura giratória, placa de tela de borracha, além de um defletor dedicado para a descarga tanto do carvão limpo quanto dos rejeitos.

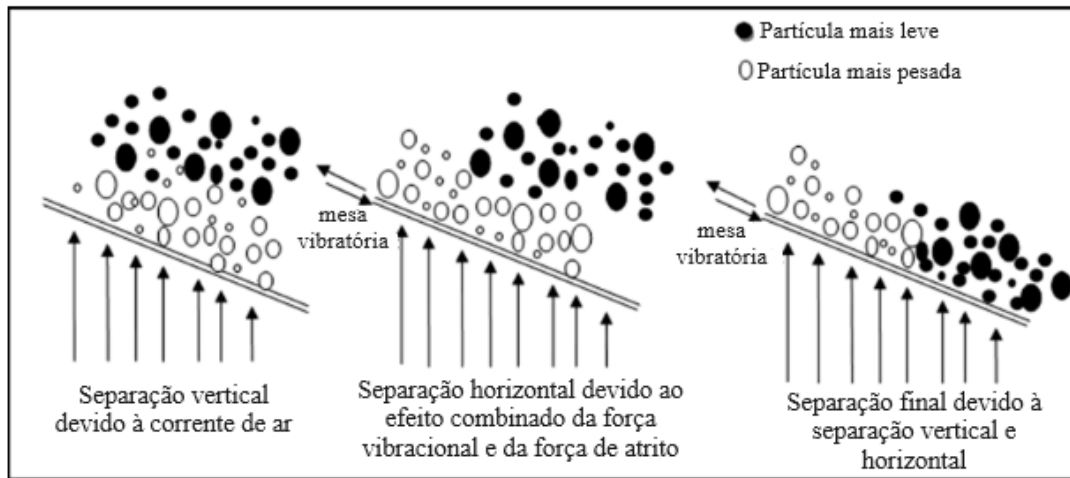
Figura 13 - Projeto modelo do sistema de beneficiamento



Fonte: Eletrobras CGTEE, 2019.

Por meio do alimentador, o carvão é introduzido em um leito de separação que apresenta um declive longitudinal e um declive transversal. Nesse leito, ocorre uma vibração linear, e estão distribuídas uniformemente ao redor do ar para permitir a entrada do fluxo de ar. Essa combinação de vibração e fluxo de ar provoca o afrouxamento e a estratificação do material no deck, resultando na dispersão do material. Dessa forma, as partículas mais densas tendem a migrar para a parte inferior, enquanto as partículas de menor densidade permanecem na superfície, como ilustrado na Figura 14.

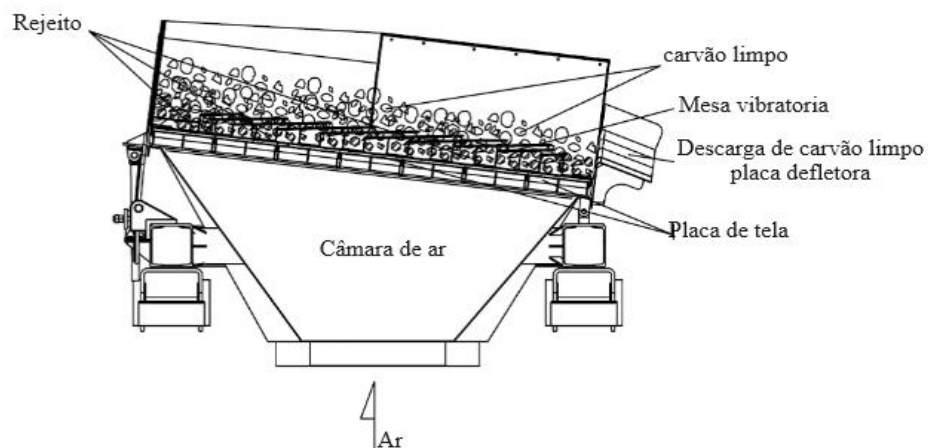
Figura 14: Mecanismo de separação das partículas



Fonte: Adaptado FX Type Dry Coal Cleaning System Operating Instruction Manual 2010/2011

Após a separação, devido à inclinação transversal do leito de separação, o material leve presente na camada superior é direcionado para as ranhuras subsequentes entre dois corrimões para uma nova etapa de limpeza. Posteriormente, o carvão limpo segue para a calha correspondente por meio do defletor de descarga, enquanto o material mais pesado, composto por rochas de alta densidade e pirita, desloca-se para a extremidade e é descarregado na calha de rejeito. O esquema desse mecanismo de separação é ilustrado na Figura 15.

Figura 15- Sistema de separação do carvão e rejeito.

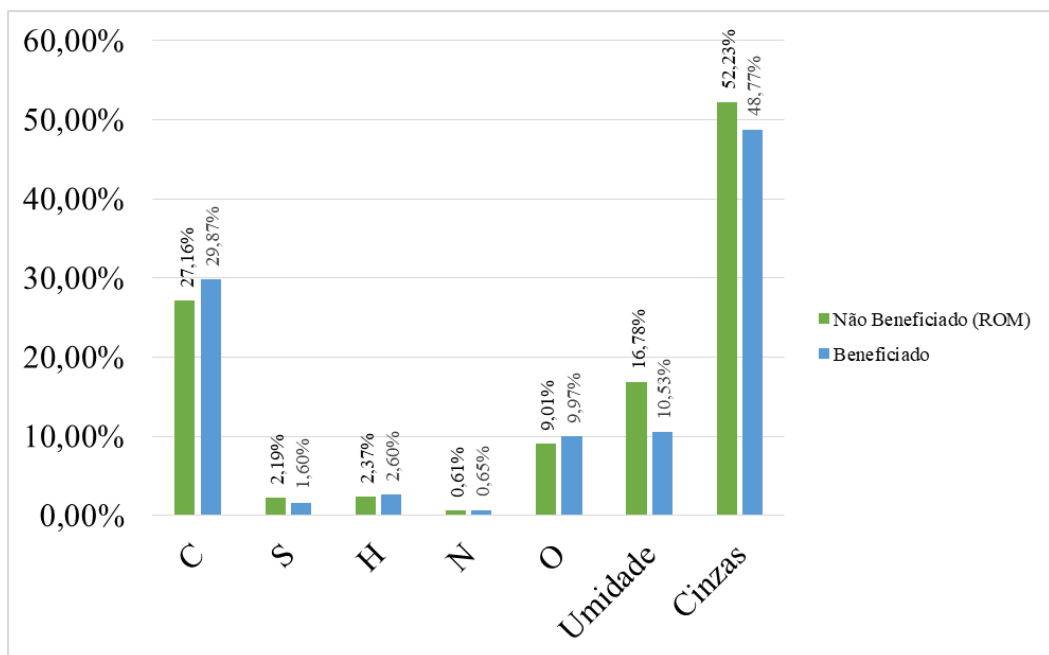


Fonte: TIANDI Science & Technology Co., Ltd., Tangshan Branch 2010/2011

5.2 Análise quantitativa dos efeitos do beneficiamento sobre a composição do carvão mineral

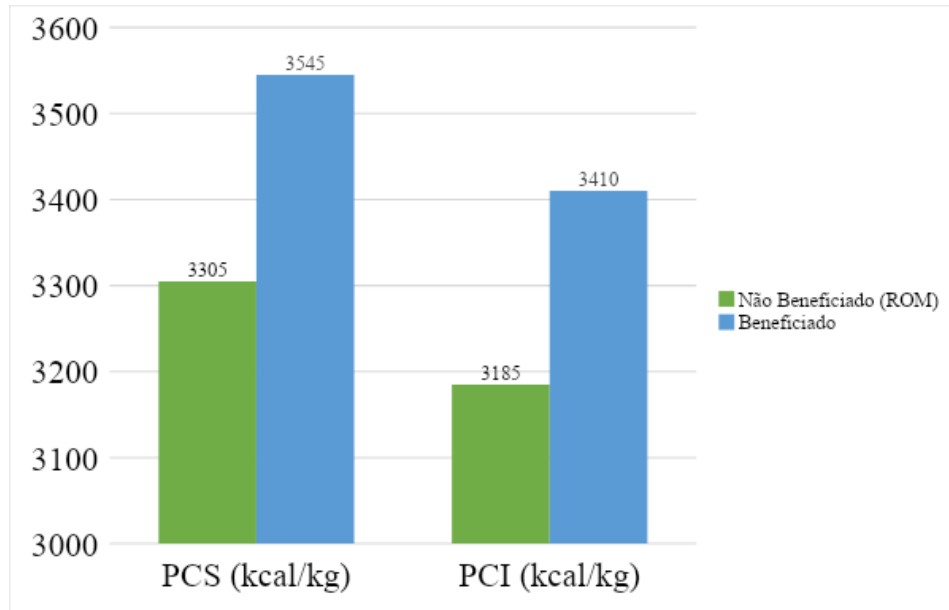
Com base nos dados de caracterização fornecidos na Tabela 5, foram realizados cálculos para determinar as alterações na composição devido ao efeito do beneficiamento. Essas variações são visualizadas nos gráficos apresentados nas Figuras 16 e 17, oferecendo uma análise detalhada das mudanças ocorridas.

Figura 16 - Alterações na composição devido ao efeito do beneficiamento.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

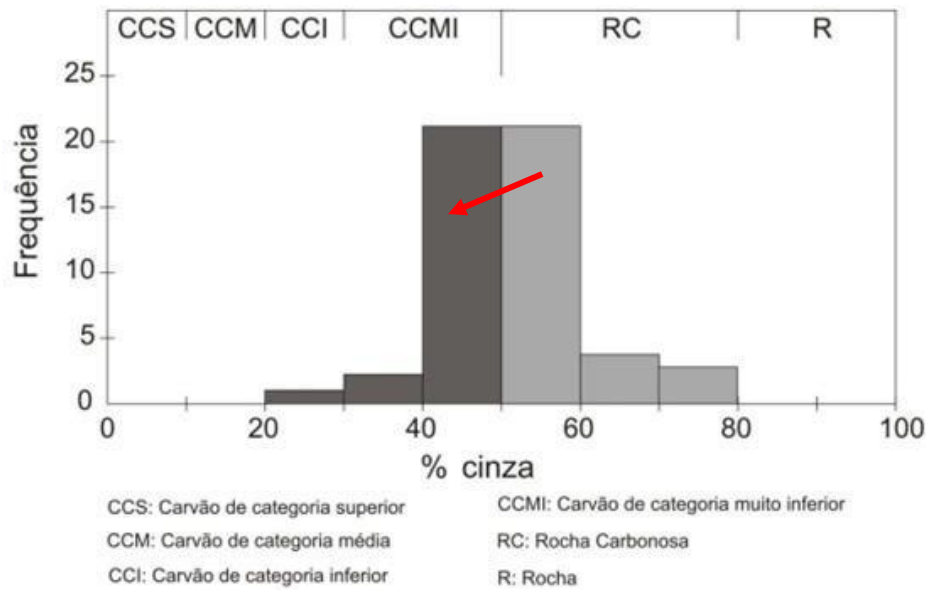
Figura 17 - Alterações no poder calorífico devido ao efeito do beneficiamento.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Analisando-se a Figura 17, percebe-se que aumento de cerca de 10% do percentual de carbono e reduções nos percentuais de enxofre total de (26%); umidade (37%) e de cinzas (6,6%). Além disso, o poder calorífico aumentou 7%. Essas variações são significativas no que diz respeito às emissões e ganho energético. Pelo aumento do poder calorífico, pode-se prever que é possível utilizar menos carvão para gerar a mesma quantidade de MWh. Com isso, haverá redução de CO₂, particulados e outros gases nocivos ao meio ambiente, tal como o SO₂. Com base nesses aspectos, pode-se afirmar que o beneficiamento foi efetivo na remoção de impurezas. Quanto ao teor de cinzas, com base na classificação da Comissão Econômica da Europa para as Nações Unidas, o carvão analisado neste estudo deixou de ser rochoso (RC) e passou a ser de categoria muito inferior (CCMI), conforme mostra a Figura 18.

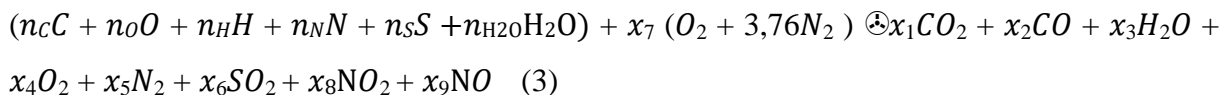
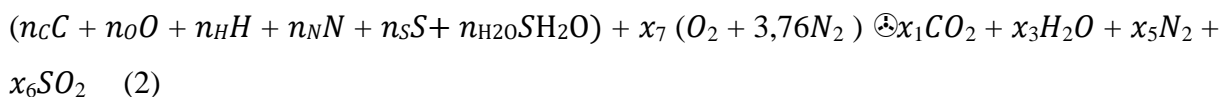
Figura 18 – Classificação do carvão segundo o percentual de cinzas



Fonte: Adaptado de International Classification of in-coal seam, 1998

5.3 Estequiometria da combustão

Para combustíveis sólidos, a reação química da combustão pode ser generalizada para a expressão dada na Equação 2, sem excesso de ar, e Equação 3 com excesso de ar. (Justi, R. S, 2019)



A relação ar combustível (A/C), expressa razão entre o número de mols de ar e o número de mols de combustível, pelo pode ser determinada pela Equação 4:

$$A/C = \frac{4,76 \times x_7}{(n_C + n_O + n_H + n_N + n_S + n_{H_2O})}$$

Onde: n_C ; n_O ; n_H ; n_N ; n_S e n_{H_2O} são, respectivamente, o número de mols de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e água. O coeficiente x_7 é o número de mols de ar, $O_2 + 3,76N_2$, na reação de combustão. O valor de 3,76 corresponde a razão entre os volumes de N_2 e O_2 no ar ($79/21 = 3,76$). Os coeficientes x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_8 , e x_9 correspondem ao número de mols de CO_2 ; CO ; H_2O ; O_2 ; N_2 ; SO_2 ; NO e NO_2 . Respectivamente, produtos da combustão.

Os cálculos estequiométricos foram realizados considerando-se como base de cálculo 1 kg de carvão. Não foi considerada a massa molecular da cinza, visto que sua composição é complexa de ser estimada.

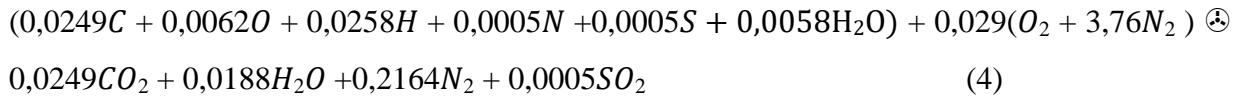
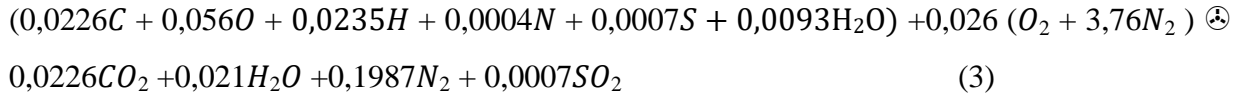
A Tabela 7 mostra as frações mássicas, as massas atômicas (ou moleculares), o número de mols e a fração molar dos constituintes do carvão ROM e beneficiado.

Tabela 7 – Parâmetros do carvão ROM e beneficiado

Carvão ROM				
Elemento	%	Fração mássica [kg/kg carvão]	Massa Atômica ou Molecular [kg/kmol]	número de mols (n_i) [kmol]
C (b.s.)	27,16	0,2716	12,01	0,0226
S (b.s.)	2,19	0,0219	32,06	0,0007
H (b.s.)	2,37	0,0237	1,007	0,0235
N (b.s.)	0,61	0,0061	14,0067	0,0004
O (b.s.)	9,01	0,0901	15,999	0,0056
Umidade (H_2O)	16,78	0,1678	18,02	0,0093
Cinzas (b.s.)	52,23	0,5223		
Carvão beneficiado				
C (b.s.)	29,87	0,2987	12,01	0,0249
S (b.s.)	1,6	0,0160	32,06	0,0005
H (b.s.)	2,6	0,0260	1,007	0,0258
N (b.s.)	0,65	0,0065	14,0067	0,0005
O (b.s.)	9,97	0,0997	15,999	0,0062
Umidade (H_2O)	10,53	0,1053	18,02	0,0058
Cinzas (b.s.)	48,77	0,4877		

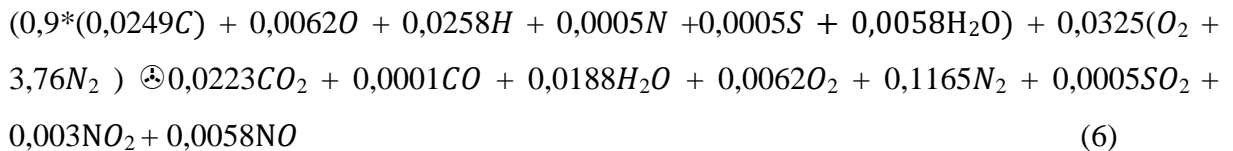
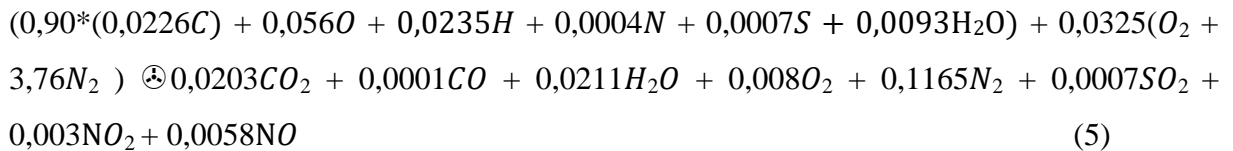
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Com base na Tabela 5 montou-se as reações de combustão do carvão, Equações 3 e 4, respectivamente para o carvão ROM e beneficiado sem o excesso de ar.



Da mesma forma, as Equações 5 e 6, representam as reações de combustão com excesso de 25% de ar, respectivamente para o carvão ROM e beneficiado, considerando-se as observações descritas na metodologia:

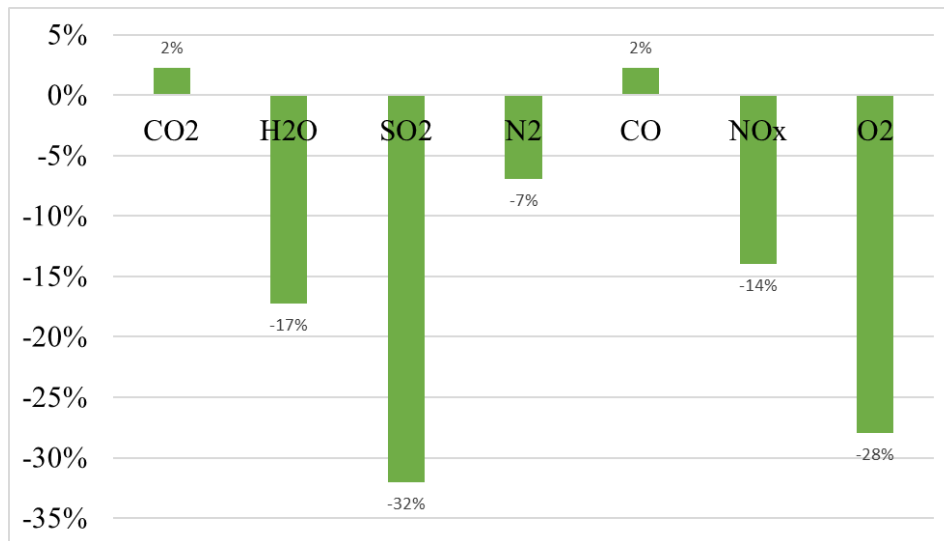
- Excesso de ar: 25%;
- % de Queima do N₂: 5%;
- % de Carbono nas cinzas: 10%;
- Relação NO₂/NO: 0,05;
- Relação CO/CO₂: 0,005.



As relações A/C calculadas foram iguais a 12,28:1 e 12:1 quilogramas de ar por quilogramas de combustível, para a combustão do carvão ROM e beneficiado, respectivamente. Ou seja, para uma mesma quantidade de ar, seria necessário menos combustível.

Considerando-se os resultados encontrados, devido à redução de 27% no teor de S devido ao beneficiamento, espera-se a mesma redução nas emissões de SO₂. Conforme mostrado pela estequiometria, há redução de 0,0007 kmol para 0,0005 kmol de SO₂. Em termos percentuais, em base seca, o percentual de SO₂ nos gases de emissão passou de 0,42% para 0,31%. Considerando-se que em 2022 foram emitidas 19,5 milhões de toneladas de gases de combustão em 71 Centrais Térmicas inventariadas pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2023) e, deste montante, 2,4 milhões de toneladas (12,1%), somente na Central Térmica que utiliza o carvão deste estudo, estimou-se, sem beneficiamento, que as emissões de SO₂ seria de 1 milhões de toneladas para queima do carvão sem beneficiamento e 0,74 milhões de toneladas pela queima do carvão beneficiado. Com essa visão, como houve aumento de cerca de 7% no PCS, pode-se considerar que haverá redução do consumo de combustível. Levando em conta essa relação, em termos percentuais, haveria a possibilidade de reduzir além do SO₂, as emissões de NO_x (NO+NO₂). Um ligeiro aumento nas emissões de CO₂ e CO, 2%, foi calculado em decorrência da maior concentração de carbono no carvão beneficiado. Contudo, estas emissões podem ser controladas pelos mecanismos abordados anteriormente. Isso ratifica a importância do beneficiamento do carvão mineral que contribui para minimizar a emissão de poluentes.

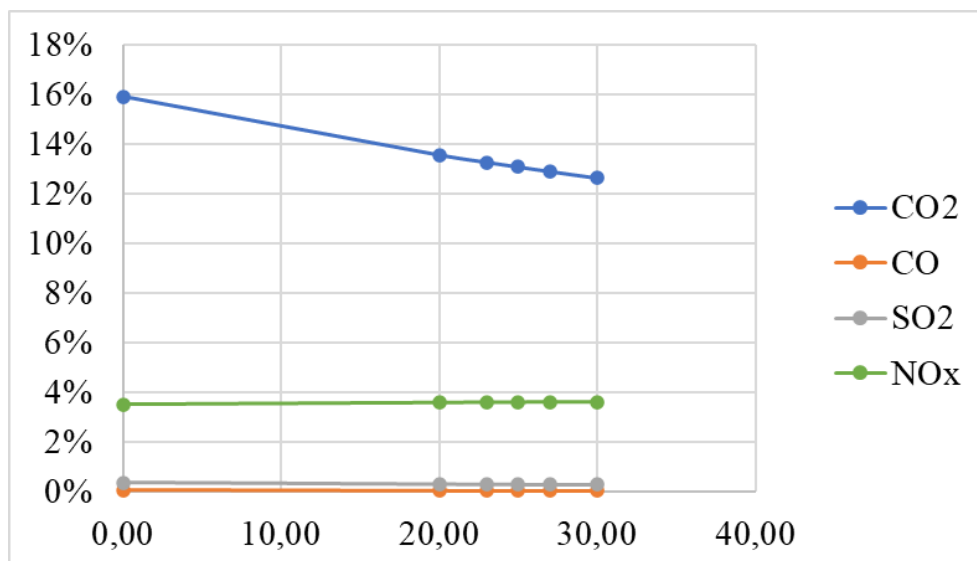
Figura 19 - Estimativa da redução de emissões em decorrência da redução do teor de impurezas do carvão bruto.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

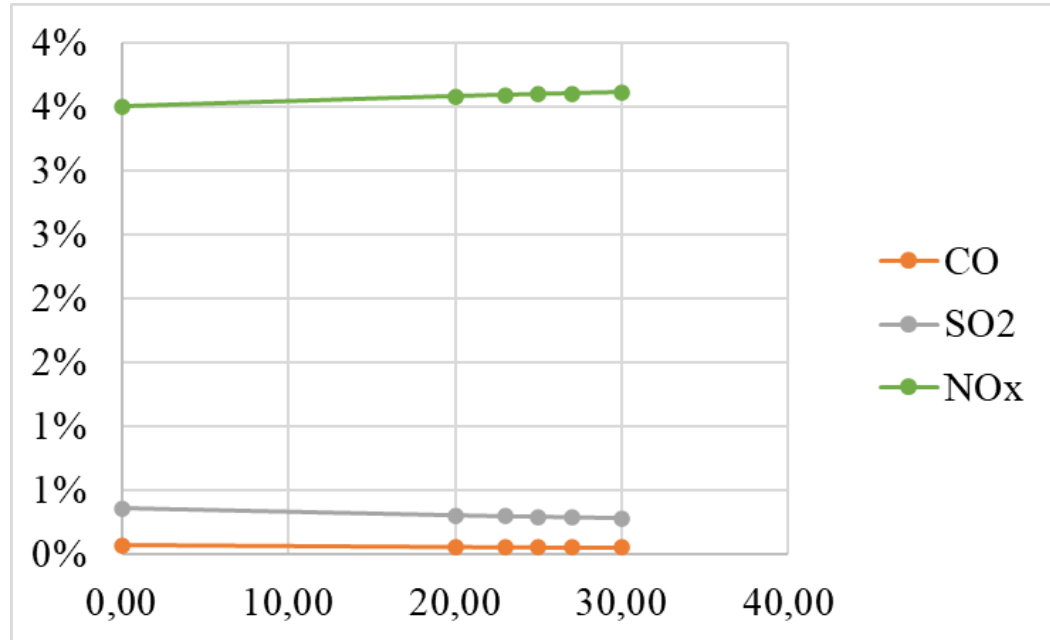
O excesso de ar também influencia nas emissões dos gases de combustão. Os resultados são mostrados na Figura 20. Percebe-se variação mais significativa nas emissões de CO₂. Nos demais gases a variação é pequena. É importante ressaltar que existem outras variáveis que podem influenciar na composição dos gases de combustão tais como a temperatura da chama, a limpeza dos queimadores, a eficiência na mistura do combustível, variações bruscas de carga.

Figura 20 - excesso de ar



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 21 - Recorte da figura 20.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

5.4 Estimativa da temperatura da chama

Os parâmetros para estimar a temperatura da chama são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Temperatura da chama.

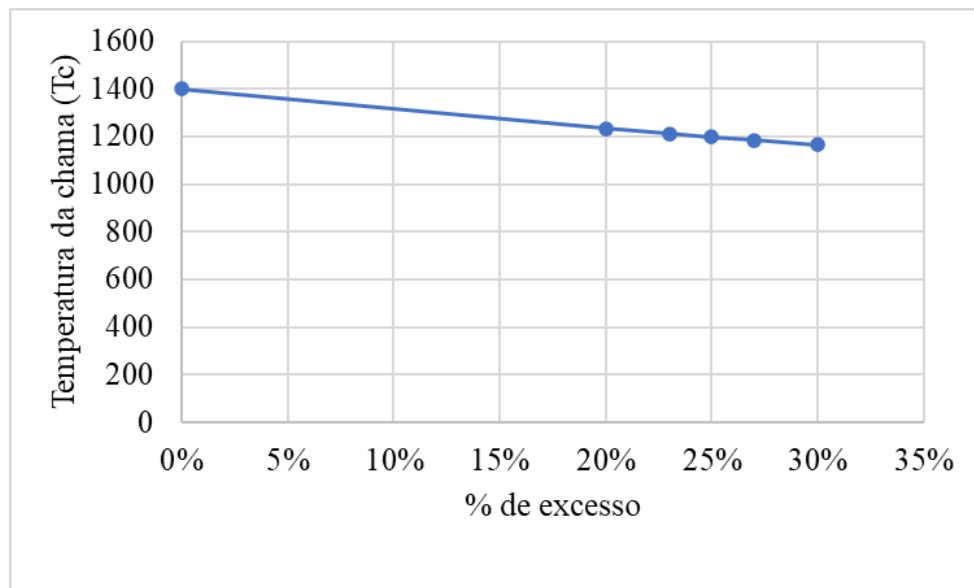
Componente	Massa Molecular [kg/kmol]	Carvão ROM		Carvão beneficiado	
		Número de mols [mol]	Massa [kg]	Número de mols [mol]	Massa [kg]
CO ₂	44,008	0,0203	0,892	0,0223	0,981
H ₂ O	18,013	0,0211	0,380	0,0188	0,338
SO ₂	64,058	0,0007	0,044	0,0005	0,032
N ₂	28,0134	0,1165	3,264	0,1165	3,264
CO	0,3984	0,0001	0,002	0,0001	0,003
NO	30,0057	0,0058	0,175	0,0058	0,175
NO ₂	46,0047	0,0003	0,013	0,0003	0,013

O ₂	31,998	0,0080	0,001	0,0062	0,001
Total			4,772		4,808
PCI [kcal/kg]		3185		3410	
T_c		1595°C		1695°C	

Fonte: Elaboração própria 2023.

Com aumento da temperatura da chama, pode-se inferir que também haverá aumento da transferência de calor em função da maior massa de gases formados e maior temperatura (Pacheco, 2008). Salienta-se que os valores apresentados acima tratam-se de uma simulação, partindo-se da substituição do combustível em um gerador de vapor, onde o combustível original é o carvão ROM e o substituto, o carvão beneficiado a seco. Da mesma forma que há influência na composição dos gases de combustão, a temperatura da chama também é influenciada pelo excesso de ar, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Temperatura da chama com relação ao excesso de ar.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Salienta-se que os valores apresentados acima são referentes a uma simulação partindo-se da suposição de troca de carvão ROM por carvão beneficiado. Contudo, pode-se afirmar que há ganho energético devido a queima do carvão beneficiado, pelo uso de uma menor quantidade do combustível para gerar a mesma quantidade de MWh. Com isso, haverá redução nas emissões de CO₂ e outros gases nocivos ao meio ambiente.

6. CONCLUSÃO

A preocupação com o meio ambiente é incentivadora para o avanço tecnológico e desenvolvimento de processos que possam contribuir para minimizar as emissões relacionadas ao setor energético.

Conforme objetivo proposto concluiu-se que:

- Foi possível compreender o sistema de beneficiamento a seco.
- O beneficiamento a seco reduz o teor de impurezas, tais como o enxofre e a cinzas e diminui a umidade do carvão ROM.
- Houve aumento do poder calorífico após o beneficiamento.
- Observou-se redução das emissões de SO₂ (32%) e NO_x (14%).
- O ligeiro aumento de 2% nas emissões de CO₂ e CO ocorreu devido ao aumento no percentual de carbono do carvão. Contudo, este fato é compensado pela redução da massa de carvão necessária para gerar o mesmo quantitativo energético.
- Com excesso de ar, ocorre redução das emissões de CO₂.
- A temperatura da chama é mais elevada após o beneficiamento, portanto haverá aumento na transferência de calor.

Por fim, pode-se afirmar que o beneficiamento é adequado e, como produto final, obtém-se um carvão com maior poder calorífico, menor teor de cinzas e de enxofre, resultando na redução de emissões de gases poluentes na atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas de energia elétrica do Brasil/Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008. p. 131 disponível: https://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso: 10 de setembro de 2023.

Borba, R. F. Carvão mineral. Em Balanço Mineral Brasileiro. (2001). Acesso em: 04 de setembro de 2023.

BROSE, M. E. Entre o Carvão e a Transição Energética: Oscilações na Política de Desenvolvimento do Rio Grande do Sul. *Desenvolvimento em Questão, [S. l.]*, v. 20, n. 58, p. e10592, 2022. DOI: 10.21527/2237-6453.2022.58.10592. Disponível em: <https://revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/10592>. Acesso em: 24 setembro. 2023.

Cosmo, B. M. N. Carvão mineral. *Revista Agronomia Brasileira*, e-ISSN 2594-6781, Volume 4, 2020. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratorioidematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202001.pdf>. Acesso: 23 de agosto de 2023.

Costa. Modelo matemático para combustão de carvão pulverizado e sua interação com água. 2002. 190p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2002. Dispositivo: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/83245/189809.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 23 de setembro de 2023.

CRM. Companhia Riograndense de Mineração. Disponível em: <http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral / Coordenadores Thiers Muniz

Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2013. disponível: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2013>. Acesso: 10 de setembro de 2023.

EPE. Gustavo Miranda de Magalhães Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020/ Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 14 de agosto de 2023.

Gomes, A. J. P. et al. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil/ CPRM, Brasília. 2003. Disponível: https://www.sgb.gov.br/publique/media/recursos_minerais/livro_geo_tec_rm/capXI_a.pdf. Acesso: 14 de setembro de 2023.

IRENA - Agência Internacional para as Energias Renováveis. Disponível em: www.irena.org/publications. Acesso em: 24 de agosto de 2023

Justi. Ferramenta Computacional para Cálculo de Rendimento Térmico de Geradores de Vapor. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, dezembro de 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/206496>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Leão, A geopolítica do petróleo e do gás natural no contexto da transição energética: um processo de transição justa? Texto para Discussão/ineep. 2021. Disponível em: https://ineep.org.br/wp-content/uploads/2022/10/td_n-30.pdf Acesso em: 24 de agosto de 2023

Losekann, L., Tavares, A. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. Texto para Discussão / IPEA. 2021. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10712/4/TD_2680.pdf Acesso em: 24 de agosto de 2023

LUNKES, M. K. O carvão das Camadas Superiores e Inferiores da Jazida de Candiota – RS: Uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28616/000771591.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

LUNKES, M. K. O carvão das Camadas Superiores e Inferiores da Jazida de Candiota – RS: Uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28616/000771591.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

LUNKES, M. K. O carvão das Camadas Superiores e Inferiores da Jazida de Candiota – RS: Uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28616/000771591.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030/Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília : MME : EPE, 2007. Disponível: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20\(Carv%C3%A3o%20Mineral\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica%20(Carv%C3%A3o%20Mineral).pdf). Acesso: 04 de setembro de 2023.

Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília : MME: EPE, 2020 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-523/05.06%20Carvao%20Mineral.pdf>. Acesso: 20 de setembro de 2023.

MME. Detalhamento do Programa para Uso Sustentável do Carvão Mineral Nacional. Portaria MME nº 540/2021. 2021. Disponível: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-detalhamento-do-programa-para-uso-sustentavel-do-carvao-mineral-nacional/programa-para-uso-sustentavel-do-carvao-mineral-nacional.pdf>. Acesso em: 07 de agosto de 2023

MME. Ministério de Minas e Energia – Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

MOURA, R. S. P. Avaliação da co-combustão de carvão run-of-mine e rejeito com biomassa em fornalha de leito fluidizado borbulhante em escala piloto. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade. Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/241091>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Oliveira, M. Estudo da influência da composição do carvão e dos requisitos operacionais na combustão em caldeiras usando balanço de massa. 2022. 68p. Trabalho de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Graduação em Engenharia Metalúrgica. 2022. Disponível: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64660/3/2022_tcc_mnoliveira.pdf. Acesso: 23 de setembro de 2023.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20230323-ONS-Ian%C3%A7a-o-Relat%C3%B3rio-Anual-2022.aspx>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20230323-ONS-Ian%C3%A7a-o-Relat%C3%B3rio-Anual-2022.aspx>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Pacheco, E. T. Estudo do Beneficiamento a Seco do Carvão da Mina de Candiota - RS. 2008. Disponível:<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14370/000664769.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 14 de setembro de 2023.

PNE. Plano Nacional de Energia 2033. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-.dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Reis. Fernando Simões dos. Mudanças climáticas e transição energética justa: reflexões sobre a atuação do TCU. 2023. Monografia (Especialização em Controle da Desestatização e da Regulação) – Instituto Serzedello Corrêa, Escola Superior do Tribunal de Contas da União, Brasília DF. 101 fl. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Ribeiro. Influência da qualidade do carvão e das condições operacionais no processo de combustão de uma usina termelétrica. 2002. 92p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. 2002. Disponível: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/83960>, Acesso: 23 de setembro de 2023.

Santa Catarina. Lei Nº 18.330, de 5 de janeiro de 2022. Institui a Política Estadual de Transição Energética Justa e o Polo de Transição Energética Justa do Sul do Estado de Santa Catarina. 2022. Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2022/18330_2022_lei.html. Acesso em: 07 de agosto de 2023

SHAHZAD B., S.; KASHIF M.; LAOONUAL, Y. Combustion and emission control strategies for partially-premixed charge compression ignition engines: A review. Fuel, v. 310, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121021463>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Souza, K. F. Caracterização das camadas superiores e inferiores da jazida de Candiota para estudos futuros de beneficiamento gravimétrico visando o uso energético. Porto Alegre. (2012). Disponível: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/56577/000859376.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 20 de setembro de 2023.

Teixeira, L. L. (2023). Análise e contribuições para uma Transição Energética Justa na Região Carbonífera do Estado de Santa Catarina. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/251116/PGES0060-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 de agosto de 2023

Weiler, J.; Schneider, I. Desenvolvimento de uma Rota Integrada para Obtenção de Produtos Comerciais a Partir de Rejeitos do Beneficiamento de Carvão Mineral. In: Anais do VI Congresso Brasileiro de Carvão Mineral – CBCM, 2021. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcm-2021/trabalhos/desenvolvimento-de-uma-rota-integrada-para-obtencao-de-produtos-comerciais-a-par?lang=pt-br>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

ANEXOS



BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL COMO ALTERNATIVA PARA REDUZIR IMPUREZAS E EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

NAYARANNA GOULARTE PEREIRA; SABRINA NEVES DA SILVA

RESUMO

A combustão desempenha um papel fundamental na geração de energia, sendo responsável por mais de 80% da energia consumida globalmente. Essa influência abrange diversos setores da sociedade, independentemente do nível de desenvolvimento em qualquer parte do mundo. No contexto brasileiro, estima-se que mais de 75% da energia utilizada no país seja gerada através da queima de carvão mineral, lenha, derivados de petróleo, carvão vegetal e biomassas, ou seja, por meio de processos de combustão. A região carbonífera gaúcha é uma das maiores produtoras de carvão mineral para fins energéticos no Brasil. No entanto, no âmbito da descarbonização do setor elétrico, este recurso energético requer o uso de tecnologias que visem a redução das emissões dos poluentes decorrentes da queima minimizando, dessa forma, os impactos ambientais tais como a poluição do ar, do solo e da água, a degradação das áreas mineradas e o impacto na saúde dos trabalhadores e da população local. O fomento ao uso de fontes energéticas menos poluidoras ou renováveis é uma demanda regional. Com base nestes aspectos, neste estudo avaliou-se o efeito do beneficiamento a seco no carvão bruto da Jazida de Candiota-RS tendo em vista a redução de impurezas. A metodologia consistiu em quantificar a redução de contaminantes não carbonoso, no percentual de umidade e de cinzas bem como no poder calorífico e nas emissões gasosas. Foi demonstrado que houve redução de impurezas como o enxofre e cinzas, redução da umidade e aumento do poder calorífico após o beneficiamento. Conseqüentemente é possível utilizar menos combustível para mesma quantidade de energia. Devido à redução de impurezas, houve redução nas emissões de SO_x e NO_x. Concluiu-se que o beneficiamento é adequado e, como produto final, obtém-se um carvão com maior poder calorífico, menor teor impurezas resultando na redução de emissões de gases poluentes na atmosfera.

Palavras-chave: carvão mineral; transição energética; beneficiamento; impacto ambientais

1 INTRODUÇÃO

O maior desafio da transição energética é a descarbonização da matriz. Apesar de contar com mais de 85% de geração hidrelétrica e com aumento da capacidade de geração a partir de fontes renováveis como a solar e a eólica, considerando-se a possibilidade de escassez hídrica e de intermitência, o Operador Nacional do Sistema Elétrico tem olhado com um novo viés a termoeletricidade (ONS) considerando a possibilidade desse tipo de geração como alternativa complementar ou para garantir a segurança energética como suporte a outras fontes (ONS, 2023).

Nesse sentido, o carvão mineral, apesar de ser um recurso energético potencialmente poluente, deve continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial, devido à disponibilidade reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão (*clean coal technologies*). Essas características, contribuem para livrar o abastecimento energético das limitações geopolíticas

ou de questões de segurança. Assim, o carvão apresenta potencial de contribuir, por exemplo, para aumento das taxas de eletrificação nos países em desenvolvimento e, nas regiões carboníferas, pode contribuir para geração de empregos e industrialização regional considerando-se, com esse viés, a Transição Energética Justa (PNE, 2023).

Localizada no município de Candiota, a 400 km ao sul de Porto Alegre, a jazida de carvão mineral possui reservas de 1 bilhão de toneladas passíveis de mineração a céu aberto, em profundidades de até 50 metros (CRM, 2009).

Do ponto de vista técnico, o carvão de Candiota possui alto teor de cinzas, umidade e enxofre e baixo poder calorífico sendo classificado, segundo o rank, como sub-betuminoso C (Lunkes, 2010).

Considerando-se o tratado no acordo de Paris (2015), principal instrumento de cooperação internacional focado na redução de emissões de gases poluentes e na adaptação às mudanças climáticas no mundo, no que diz respeito às centrais térmicas, é preciso pensar e readequar tecnologias para minimizar os impactos decorrentes desse tipo de geração de energia (MME, 2023).

Como alternativa para este panorama, têm-se os mecanismos de controle de emissões (Bobi; Kashif e Laoonual, 2022), o desenvolvimento de tecnologias de queima mais eficientes, tais como a queima em leito fluidizado (Moura, 2022) e o beneficiamento (Weiler e Schneider, 2021). O beneficiamento será tratado neste trabalho.

O beneficiamento, em síntese, consiste na remoção de impurezas do carvão mineral, como o enxofre as cinzas e a umidade e aumentar o poder calorífico, para gerar a mesma quantidade de energia com menos combustível e, conseqüentemente, produzir menos poluentes (Weiler e Schneider, 2021).

Neste trabalho pretende-se avaliar o efeito do beneficiamento do carvão mineral bruto na redução de contaminantes não carbonoso, no percentual de umidade e de cinzas bem como no poder calorífico e nas emissões gasosas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se duas amostras de carvão, bruto e beneficiado, fornecidos por uma mineradora da cidade de Candiota. A composição dos carvões é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos carvões.

Amostra de carvão	Composição (%)							Poder Calorífico Superior - PCS (kcal kg ⁻¹) (b.s.)	Poder Calorífico Inferior – PCI (kcal kg ⁻¹) (b.s.)
	C (b.s.)	H (b.s.)	O (b.s.)	N (b.s.)	S (b.s.)	Umidade	Cinzas (b.s.)		
Bruto	27,16	2,37	9,01	0,61	2,19	16,78	52,23	3305	3185
Beneficiado	29,87	2,6	9,97	0,65	1,6	10,53	48,77	3545	3410

Onde:

C: Carbono; H: hidrogênio; O: oxigênio; N: nitrogênio; S: enxofre.

b.s.: base seca

kcal kg⁻¹: l=quilocalorias por kilograma

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados de composição descritos na Tabela 1, foram realizados cálculos para determinar as variações de composição devido ao efeito do beneficiamento. Essas variações são visualizadas nos gráficos apresentados na Figura 1 (a-b), oferecendo uma análise detalhada das mudanças ocorridas.

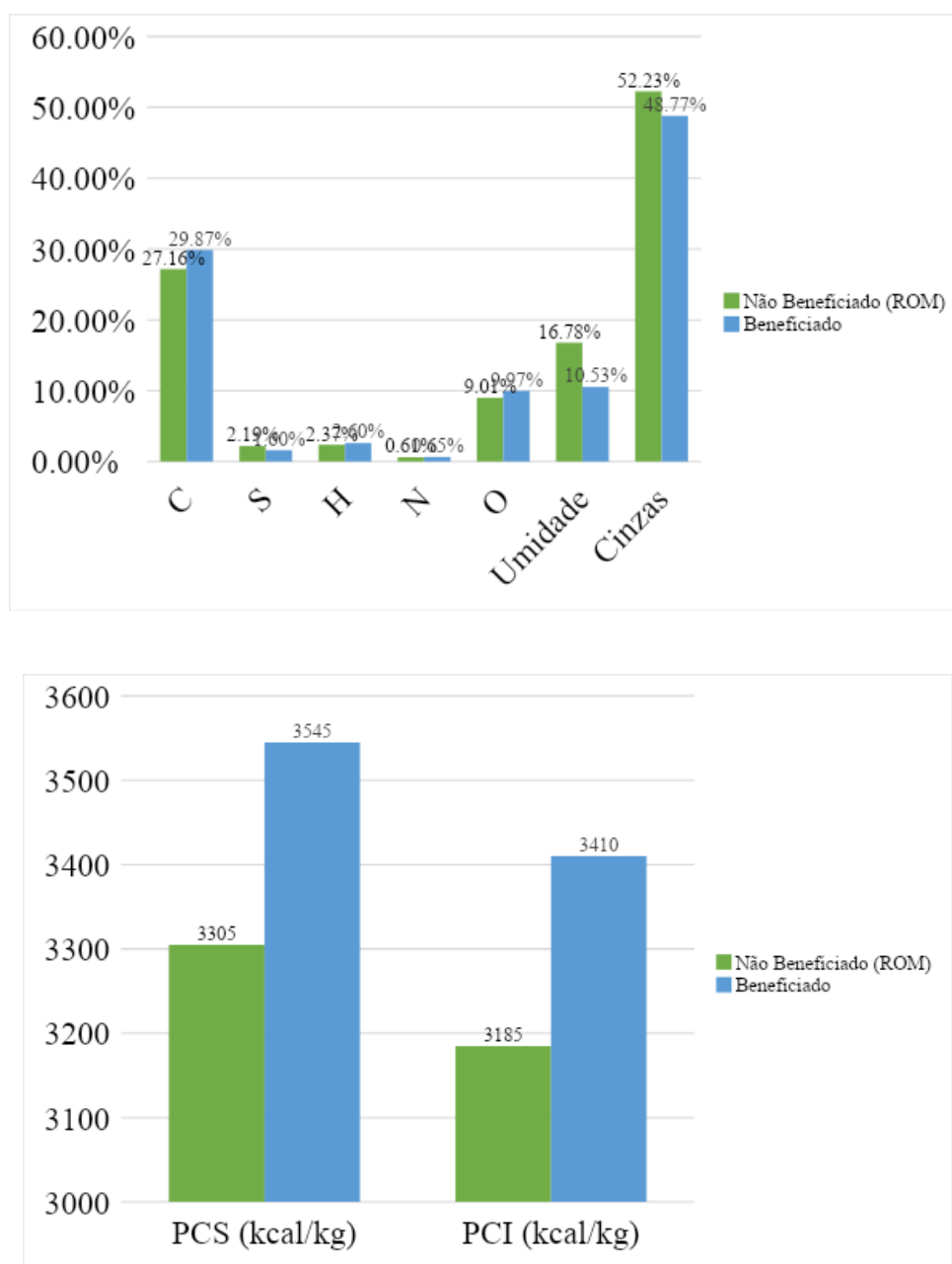


Figura 1 – Alterações na composição devido ao efeito do beneficiamento (a) Compostos químicos umidade e cinzas químicos e (b) Poder Calorífico.

Analisando-se a Figura 1, percebe-se que aumento de cerca de 10% do percentual de carbono e reduções nos percentuais de enxofre total de (26%); umidade (37%) e de cinzas (6,6%). Além disso, o poder calorífico aumentou 7%. Essas variações são significativas no que diz respeito às emissões e ganho energético. Pelo aumento do poder calorífico, pode-se prever que é possível utilizar menos carvão para gerar a mesma quantidade de MWh. Com isso, haverá redução de dióxido de carbono (CO_2) particulados e outros gases nocivos ao meio ambiente, tal como o dióxido de enxofre (SO_2). Com base nesses aspectos, pode-se afirmar que o beneficiamento foi efetivo na remoção de impurezas. Quanto ao teor de cinzas, com base na classificação da Comissão Econômica da Europa para as Nações Unidas, o carvão analisado neste estudo deixou de ser rochoso (RC) e passou a ser de categoria muito inferior (CCMI).

Com essa visão, como houve aumento de cerca de 7% no PCS, pode-se considerar que haverá redução do consumo de combustível. Levando em conta essa relação, em termos percentuais, haveria a possibilidade de reduzir além do SO_2 , as emissões de NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). Um ligeiro aumento nas emissões de CO_2 e CO , 2%, foi calculado em decorrência da maior concentração de carbono no carvão beneficiado. Contudo, estas emissões podem ser controladas pelos mecanismos abordados anteriormente. Os resultados são mostrados graficamente na Figura 2. Isso ratifica a importância do beneficiamento do carvão mineral que contribui para minimizar a emissão de poluentes.

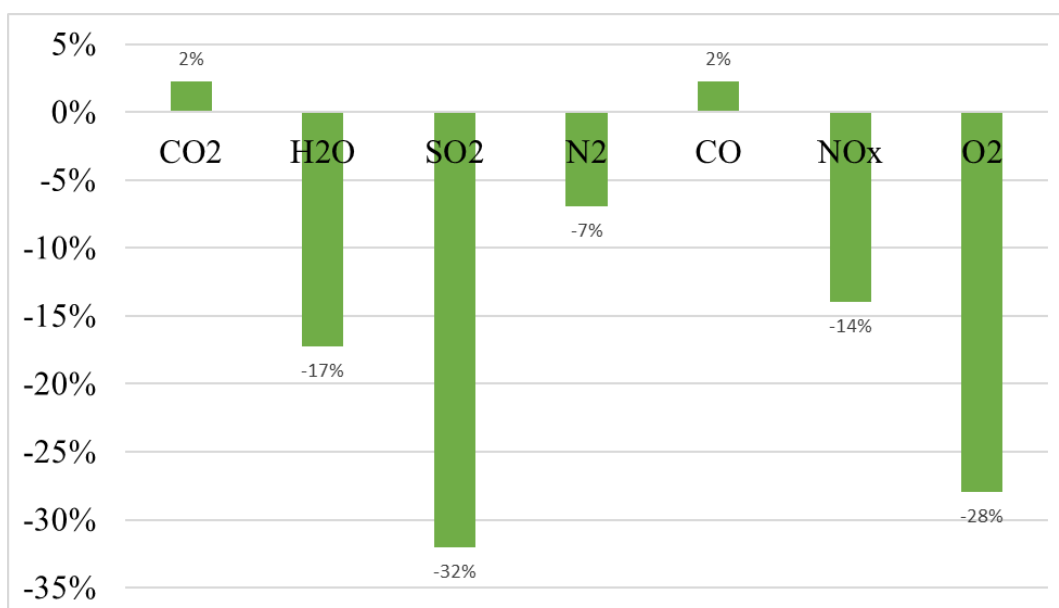


Figura 2 – Estimativa da redução de emissões em decorrência da redução do teor de impurezas do carvão bruto.

4 CONCLUSÃO

A preocupação com o meio ambiente é incentivadora para o avanço tecnológico e desenvolvimento de processos que possam contribuir para minimizar as emissões relacionadas ao setor energético. Conforme objetivos propostos concluiu-se que: i) o beneficiamento a seco reduz o teor de impurezas, tais como o enxofre e a cinzas e diminui a umidade do carvão bruto; ii) houve aumento do poder calorífico após o beneficiamento; iii) observou-se redução das emissões de SO₂ e NO_x; iv) o ligeiro aumento de 2% nas emissões de CO₂ e CO ocorreu devido ao aumento no percentual de carbono do carvão. Contudo, este fato é compensado pela redução da massa de carvão necessária para gerar o mesmo quantitativo energético.

REFERÊNCIAS

CRM. Companhia Riograndense de Mineração. Disponível em: <http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

LUNKES, M. K. O carvão das Camadas Superiores e Inferiores da Jazida de Candiota – RS: Uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28616/000771591.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20230323-ONS-Ian%C3%A7a-o-Relat%C3%B3rio-Anual-2022.aspx>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

LUNKES, M. K. O carvão das Camadas Superiores e Inferiores da Jazida de Candiota – RS: Uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28616/000771591.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia – Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

MOURA, R. S. P. Avaliação da co-combustão de carvão run-of-mine e rejeito com biomassa em fornalha de leito fluidizado borbulhante em escala piloto. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade. Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/241091>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

PNE. Plano Nacional de Energia 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-.dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

SHAHZAD B., S.; KASHIF M.; LAOONUAL, Y. Combustion and emission control strategies for partially-premixed charge compression ignition engines: A review. Fuel, v. 310, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121021463>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Weiler, J.; Schneider, I. Desenvolvimento de uma Rota Integrada para Obtenção de Produtos Comerciais a Partir de Rejeitos do Beneficiamento de Carvão Mineral. In: Anais do VI Congresso Brasileiro de Carvão Mineral – CBCM, 2021. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcm-2021/trabalhos/desenvolvimento-de-uma-rota-integrada-para-obtencao-de-produtos-comerciais-a-par?lang=pt-br>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.