

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MAURICIO GRZECA**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE COMINUIÇÃO PARA COMBUSTÃO  
DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA**

**Caçapava do Sul  
2018**



**MAURICIO GRZECA**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE COMINUIÇÃO PARA COMBUSTÃO  
DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Orientador: Régis Sebben Paranhos

**Caçapava do Sul**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

Grzeca, Mauricio

ANÁLISE DO PROCESSO DE COMINUIÇÃO PARA COMBUSTÃO DO CARVÃO  
MINERAL DE CANDIOTA / Mauricio Grzeca.

80 p.

G895a

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM  
TECNOLOGIA MINERAL, 2018.

"Orientação: Régis Sebben Paranhos".

1. Tecnologia Mineral. I. Título.

**MAURICIO GRZECA**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE COMINUIÇÃO PARA COMBUSTÃO  
DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Área de concentração: Gestão Ambiental e Sustentabilidade na Mineração

Dissertação defendida e aprovada em: 28 de março de 2018.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Régis Sebben Paranhos  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Ana Rosa Costa Muniz  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Raul Oliveira Neto  
Minerar Consultoria e Projetos



## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o processo de cominuição do carvão mineral disponível na Mina de Candiota, Rio Grande do Sul, tornando-o apto para combustão em usinas termelétricas. O carvão está disponível em várias camadas, mas apenas duas delas são aptas ao uso termelétrico, ainda assim sendo classificadas como carvão de qualidade inferior a muito inferior em relação a seu grade. Foram realizadas análises imediatas diárias durante dois meses, assim como pesquisas em análises anuais realizadas nos últimos oito anos, encontrando os teores médios, em base seca, de 53,86% de cinzas, 21,44% de material volátil, 23,98% de carbono fixo, 1,44% de enxofre e poder calorífico superior de 2818,62 Kcal/kg. Após ser explotado da mina, o carvão passa pelos processos de britagem, moagem e classificação. A CRM possui dois britadores, que reduzem os blocos de carvão ao diâmetro máximo de 120 milímetros, enviando-os à usina termelétrica. Na CGTEE o carvão é novamente britado até atingir a granulometria de 30 milímetros, sendo encaminhado aos moinhos, que o reduzem a partículas de aproximadamente 0,074 milímetros, equivalente a medida passante na peneira de 200 mesh da série Tyler. Foi realizada uma comparação entre a energia elétrica gasta atualmente pelos moinhos e valores determinados por modelos empíricos, onde foi verificado que o consumo energético atual está 106% acima do valor teórico. Foram realizados ajustes nos equipamentos de classificação granulométrica das partículas, seguindo o ciclo PDCA. Análises granulométricas nos classificadores indicaram que a granulometria do carvão varia conforme o ajuste das aletas, porém com forte interferência de outros fatores, como o fluxo de ar de arraste de carvão. Devido a esta interferência, não foi possível criar um procedimento padronizado para ajuste das aletas. Percebeu-se que com a abertura das aletas e conseqüente aumento da granulometria, houve elevação da geração de energia elétrica, porém com elevação do percentual de carvão incombusto nas cinzas de 2,0% para 11%. Assim, sugere-se que o ajuste das aletas dos classificadores seja realizado buscando um equilíbrio entre geração de energia sem restrições e teor reduzido de incombustos nas cinzas.

Palavras-chave: aero separadores de carvão, granulometria, britadores, moinhos, geração termelétrica.





## ABSTRACT

The following work has as a goal to analyze coal comminution process available at Mina de Candiota (mining site located at Candiota, Rio Grande do Sul, Brazil) making it suitable for combustion in thermoelectric power plants. Coal is available in many layers, however, only the top layer and the bottom are apt for thermal purposes, even though those layers are classified from low quality to very low quality in relation to your grade. Immediate analyzes were performed daily for two months, as well as researches in annual analyzes carried out in the last eight years, finding the average contents, on a dry basis, rates ash rates of 53,86%, volatile material 21,44%, fixed carbon 23,98%, Sulphur 1,44% and superior calorific power 2818,62 Kcal/kg. After exploited from the mining site, the coal suffers processes of crushing, milling and classification. CRM has two crushers that reduce the coal to a maximum diameter of 120 millimeters, sending them to the thermoelectric power plant. At CGTEE, the coal is once again crushed until it reaches a granulometry of 30 millimeters, then it is sent to the milling machines which reduce the coal to, approximately, 0,074 millimeters particles size, equivalent to the 200 Tyler series mesh sieve size. A comparison was made between the electric energy currently spent by the mills and values determined by empirical models, where it was verified that the current energy consumption is 106% above the theoretical value. Adjustments on particles granulometry classification equipment were performed accordingly to PDCA cycle. Granulometry analysis at the classification machines showed that the coal granulometry varies accordingly to the fins adjustments, however with strong interference of other factors, as coal drag airflow for instance. Due to this interference, a standard procedure for fins adjustments could not be created. It was noticed that with the fins opening and therefore a granulometry rise, there was a boost on electrical energy generation, however, with a following rise on the ratio of unburned coal on the ashes from 2,0% to 11%. Therefore, classification machine fins adjustment is suggested seeking for a balance between unrestricted energy generation and the reduced ratio of unburned coal on ashes.

Keywords: coal aero separators, granulometry, crushers, mills, thermoelectric generation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de carbonificação, responsável pela formação do carvão.....	21
Figura 2 - Perfil da distribuição de camadas de carvão em Candiota/RS.....	23
Figura 3 - Fluxograma de todo o processo desde a exploração na mina até a geração de energia elétrica .....	24
Figura 4 - Fluxograma detalhado do processo de cominuição (britagem e moagem) no complexo termelétrico .....	25
Figura 5 - Fotos externa e interna da peneira de carvão.....	25
Figura 6 - Fotos externa e interna do britador de carvão.....	26
Figura 7 - Vistas lateral (à esquerda) e superior (à direita) de um aero separador de duplo cone.....	27
Figura 8 - Alavancas (a esquerda) para ajuste das aletas do aero separador (à direita). .....	27
Figura 9 - Imagem da câmara de combustão de uma caldeira em funcionamento. ..	28
Figura 10 - Representação gráfica da distribuição granulométrica de um material particulado.....	31
Figura 11 - Representação dos corpos moedores em movimento de rolamento. ....	41
Figura 12 - Representação dos corpos moedores em movimento de cascadeamento. .....	42
Figura 13 - Representação corpos moedores caindo sobre a blindagem do moinho. .....	42
Figura 14 - Disposição dos Moinhos, com seus silos de alimentação com seus equipamentos auxiliares.....	51
Figura 15 - Operador realizando a coleta de amostras de carvão pulverizado. ....	53
Figura 16 - Amostrador de carvão pulverizado confeccionado para a pesquisa. ....	54
Figura 17 - Amostras de carvão nos recipientes para serem encaminhados para a estufa.....	55
Figura 18 - Plataforma vibratória no processo de peneiramento das amostras de carvão.....	56
Figura 19 - Processo de pesagem das amostras de carvão retidas nas peneiras ....	56
Figura 20 - Desenho da vista lateral do moinho de carvão, indicando suas entradas e saídas de carvão, ar e corpos moedores. ....	63

Figura 21 - Tela de supervisão operacional de um moinho de carvão. ....	64
Figura 22 - Parte interna de um moinho, mostrando os corpos moedores, blindagens do moinho e blocos que não foram moídos .....	65
Figura 23 - Polpa retirada do moinho, com carvão, corpos moedores e pedras calcárias que não foram moídas .....	66
Figura 24 - Blocos de carvão com tamanho acima da especificação de alimentação do moinho. ....	68
Figura 25 - Impurezas nas aletas do classificador (à esquerda), comparado com um classificador limpo (à direita). ....	69
Figura 26 - Gráfico da granulometria média após cada ajuste no classificador B1. .	70
Figura 27 - Movimentação das alavancas para ajuste das aletas dos classificadores. ....	71
Figura 28 - Gráfico da oscilação de potência do gerador de energia elétrica. ....	72
Figura 29 - Ponto de coleta de cinza leve proveniente da fornalha, indicando cinzas com coloração escura, com alto teor de carvão incombusto. ....	72
Figura 30 - Gráfico da granulometria média após cada ajuste no classificador A2. .	73
Figura 31 - Cabeçalho do RTO elaborado baseado neste trabalho.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estágios de Britagem, com suas RR e granulometrias. ....	38
Tabela 2 - Quadro resumo da metodologia.....	47
Tabela 3 - Exemplo de tabela utilizado para anotar o percentual retido da amostra nas peneiras.....	57
Tabela 4 - Valores percentuais da análise imediata no carvão. ....	59
Tabela 5 - Resultados das análises imediatas do carvão nos últimos anos.....	60



## LISTA DE SIGLAS

5W2H	<i>what, who, how, why, when, how much, where</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CaO	Óxido de Cálcio
CFQ	Conselho Federal de Química
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HGI	<i>Hardgrove Grindability Index</i> , ou Índice de Moabilidade Hardgrove
NBR	Norma Brasileira
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PDCA	<i>plan, do, check, action</i>
ROM	<i>run of mine</i> , ou vindo da mina
RPM	rotações por minuto
RR	relação de redução
RTO	Relatório Técnico Operacional
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
WI	<i>work index</i> , ou índice de trabalho





## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
2 JUSTIFICATIVAS .....	18
3 OBJETIVOS .....	19
3.1 Objetivo geral .....	19
3.2 Objetivos específicos .....	20
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
4.1 O carvão.....	20
4.2 O carvão de Candiota .....	22
4.3 Fluxograma do processo da mineração a combustão do carvão .....	23
4.4 Geração de energia elétrica através do carvão.....	27
4.4.1 Ar, combustível e combustão.....	28
4.4.2 Gases e Cinzas.....	29
4.4.3 Ciclo térmico .....	30
5 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FRAGMENTAÇÃO .....	30
5.1 Operações Unitárias .....	30
5.2 Britagem.....	37
5.3 Moagem .....	39
5.4 Cominuição de Carvão.....	44
5.5 Classificação de partículas.....	45
6 METODOLOGIA.....	46
6.1 Caracterizar o carvão disponível na mina de Candiota .....	48
6.2 Análise da eficiência da cominuição .....	49
6.3 Ajuste de equipamentos, acompanhando as variações no processo.....	50
6.3.1 Coleta de amostras.....	53
6.3.2 Análise laboratorial .....	55

6.4	Elaboração de um relatório das condições encontradas .....	57
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
7.1	Caracterização do carvão.....	58
7.2	Equipamentos do processo de cominuição .....	60
7.2.1	Britagem.....	61
7.2.2	Moagem .....	62
7.3	Eficiência do processo.....	67
7.4	Ajustes no processo .....	69
7.5	Relato das informações encontradas .....	74
8	CONCLUSÕES.....	75
9	REFERÊNCIAS .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica no Brasil apresenta predomínio de usinas hidrelétricas. Nestas, é aproveitada a energia potencial das águas dos rios, através de turbo-geradores instalados em barragens. O carvão mineral está em quarto lugar, correspondendo a 4,2% da oferta de energia elétrica no Brasil (EPE, 2017).

A utilização do carvão em usinas termelétricas garante fornecimento de energia no sistema elétrico nacional independente de condições climáticas. A geração de energia elétrica através de hidrelétricas depende da quantidade e da distribuição adequada de chuvas nos leitos e afluentes dos rios. As recentes instalações de novas usinas eólicas e solares, apontadas como substitutas de usinas termelétricas, também dependem das condições climáticas de ventos e radiação solar, respectivamente.

Segundo Oliveira (2011), aproximadamente 38% do carvão disponível no Brasil está sob o solo do município de Candiota, Rio Grande do Sul. Para que este mineral seja aproveitado, encontram-se neste município as empresas Companhia Riograndense de Mineração (CRM) e Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), responsáveis por operar respectivamente a mina e as usinas termelétricas. Em construção, encontra-se a Usina Termelétrica Miroel Wolowski, pertencente à empresa Engie Energia. Com potência instalada de 340 MW, tem previsão de entrada em operação para janeiro de 2019.

A história da CRM, conforme descrito em seu sítio eletrônico, [www.crm.rs.gov.br](http://www.crm.rs.gov.br), tem origem em 1947, com a criação do Departamento Autônomo de Carvão Mineral, visando a exploração e beneficiamento de carvão para abastecer a Viação Férrea do Rio Grande do Sul. Em 1969 a empresa tornou-se uma sociedade de economia mista, vinculada à Secretaria de Minas e Energia do Estado do Rio Grande do Sul, sendo renomeada como Companhia Riograndense de Mineração (CRM). Atualmente possui a concessão de lavra em minas de carvão em Candiota e Minas do Leão, sendo a fornecedora exclusiva da CGTEE.

A empresa CGTEE surgiu em 1997, após um desmembramento da Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE), tornando-se em julho de 2000 uma empresa subsidiária do grupo Eletrobrás. Conforme descrito em seu sítio eletrônico, <http://www.cgtee.gov.br>, o complexo termelétrico de Candiota

teve início em 1950, com as primeiras pesquisas sobre o aproveitamento do carvão mineral para geração termelétrica. Fruto destas pesquisas, surgiram as Usinas Candiota I (fora de operação), Candiota II (denominada Usina Termelétrica Presidente Médici, retirada de operação em 2017) e Candiota III.

A utilização do carvão nas caldeiras da usina termelétrica está condicionada à cominuição do mesmo, para que a combustão aproveite ao máximo seu poder calorífico. A cominuição consiste na britagem (onde o carvão é reduzido a pequenos blocos de diâmetro máximo de 30 mm) e na moagem, onde estes blocos são convertidos em partículas extremamente finas, facilitando sua combustão (CGTEE, 2010).

O presente projeto de pesquisa analisará estes processos de cominuição, com o objetivo de caracterizar os equipamentos, verificar a energia gasta pelos equipamentos principais e indicar possíveis melhorias operacionais à usina termelétrica.

## 2 JUSTIFICATIVAS

Se por um lado as usinas termelétricas conferem garantia de operação independente das condições do tempo (chuvas, ventos e insolação), por outro lado ocorre a emissão de diversos poluentes ao meio ambiente (GARCIA, 2002). O processo de combustão baseia-se na reação química de entre massas de carbono e o oxigênio presente no ar, formando Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), principal gás responsável pelo efeito estufa.

Outro elemento polente presente no carvão é o Enxofre, que após a combustão forma o Dióxido de Enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Este óxido reage com a água da atmosfera e forma o Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), responsável pela chuva ácida, prejudicial a plantações e estruturas metálicas (ROCHA, 2007).

O processo de mineração do carvão também provoca danos ao meio ambiente, assim como qualquer atividade mineradora, através da drenagem ácida da mina. Devido à acidez do carvão, os efluentes do processo apresentam baixos valores de pH, podendo causar, caso não sejam devidamente tratados, contaminações de

nascentes, lençóis freáticos e aumento da mortalidade da vida aquática. O manuseio das cinzas também é delicado, devido a presença de metais pesados em sua composição, que têm efeito cumulativo no organismo dos seres vivos.

Além das questões ambientais, a economia de recursos minerais finitos também deve ser levada em consideração. No contexto econômico atual o desperdício de recursos naturais e a ineficiência de processo não são toleráveis. Ninguém está disposto a pagar mais por um produto que passou por um processo ineficiente em que resultou em custos maiores.

Portanto, a eficiência no processo é necessária para que o negócio se mantenha de forma sustentável nas áreas econômica e ambiental. No caso da usina termelétrica, o processo de cominuição apresenta os seguintes fatores que podem influenciar na eficiência do processo:

- Granulometria inadequada para combustão;
- Tempo de moagem excessivo;
- Vazão inadequada de carvão nos moinhos;
- Tamanho do carvão a ser alimentado nos moinhos;
- Periodicidade de ajustes em classificadores;
- Manutenções preventivas e corretivas em equipamentos.

A análise dos itens acima pode identificar condições inadequadas de operação. A eliminação destas condições pode trazer uma maior estabilidade da combustão e da geração de energia elétrica, reduzindo os gastos energéticos e manutenções nos equipamentos, além de reduzir as emissões de poluentes, justificando assim este projeto de pesquisa.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

Propor melhorias para a operação e manutenção do sistema de cominuição instalado na CGTEE.

### 3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o carvão disponível para utilização na usina termelétrica;
- Mensurar a eficiência dos processos de cominuição (britagem e moagem) utilizados pela empresa Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) visando o objetivo principal;
- Verificar a viabilidade da criação de um procedimento padronizado de ajuste nos equipamentos de moagem e classificação de carvão, indicando a forma e a frequência destes ajustes, a fim de controlar a granulometria do carvão enviado à fornalha;
- Documentar os resultados encontrados, em forma de relatório, para que os funcionários da empresa tenham conhecimento das informações encontradas e possam conduzir os processos de operação e manutenção de forma mais adequada.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 O carvão

O carvão se define como uma rocha combustível onde o material carbonáceo corresponde a, no mínimo, 50% de seu peso e 70% do seu volume, sendo formada pelo endurecimento de plantas remanescentes. Provém de plantas que, depositadas em pântanos, sofreram carbonificação (bioquímica e físico-química) com a ação do tempo, temperatura e pressão. (LUNKES, 2010).

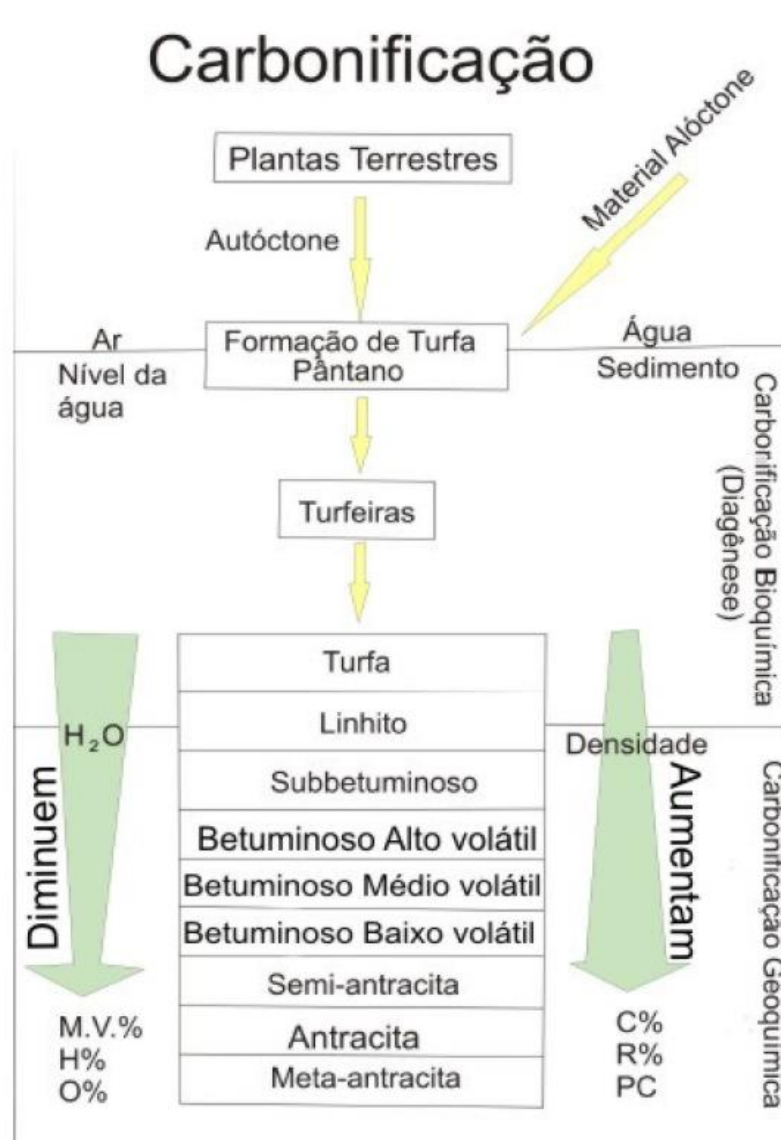
A Figura 1 descreve o processo de formação do carvão. A deposição de plantas em pântanos provoca a formação de turfeiras através da carbonificação bioquímica. Após este processo, ocorre a carbonificação geoquímica, onde a turfa converte-se em linhito e, posteriormente, em carvão sub-betuminoso e antracito.

Com o andamento do processo de carbonificação geoquímica, ocorre o aumento dos percentuais de carbono e poder calorífico, além da redução dos teores de matéria volátil, hidrogênio e oxigênio, aumentando a qualidade do carvão (OLIVEIRA, 2011). O poder calorífico consiste na quantidade de energia liberada pelo carvão no processo de combustão, medido em calorias por unidade de massa (cal/g ou kcal/kg). Pode ser classificado em poder calorífico superior (PCS) ou inferior (PCI),

sendo que a diferença entre eles equivale à quantidade de calor necessária para vaporizar a umidade contida no carvão.

O carvão mineral teve grande importância no passado, sendo o principal combustível da Revolução Industrial. Atualmente, é utilizado como combustível em usinas termelétricas e em fornos de grandes indústrias. Segundo EPE (2017), o carvão mineral é responsável por gerar 40% da energia elétrica no mundo. No Brasil, as maiores minas de carvão estão localizadas em Candiota, na região sul do Rio Grande do Sul, onde as reservas deste mineral estão previstas para durar mais 200 anos.

Figura 1 - Processo de carbonificação, responsável pela formação do carvão



Fonte: Oliveira (2011)

## 4.2 O carvão de Candiota

Candiota concentra aproximadamente 38% das reservas brasileiras de carvão, porém apresenta baixa qualidade. A ocorrência do minério está relacionada a Formação Rio Bonito, da idade Permiano Inferior (LUNKES, 2010).

Conforme pesquisas realizadas por Lunkes (2010) e Oliveira (2011), o carvão de Candiota ocorre de forma estreita e irregular em diferentes camadas, conforme demonstrado na Figura 2. No detalhe da figura, são mostradas as camadas exploradas comercialmente, que correspondem a Camada Candiota Superior e Camada Candiota Inferior. As demais camadas apresentam elevados teores de cinza e baixos valores de poder calorífico, inviabilizando sua utilização em usinas termelétricas.

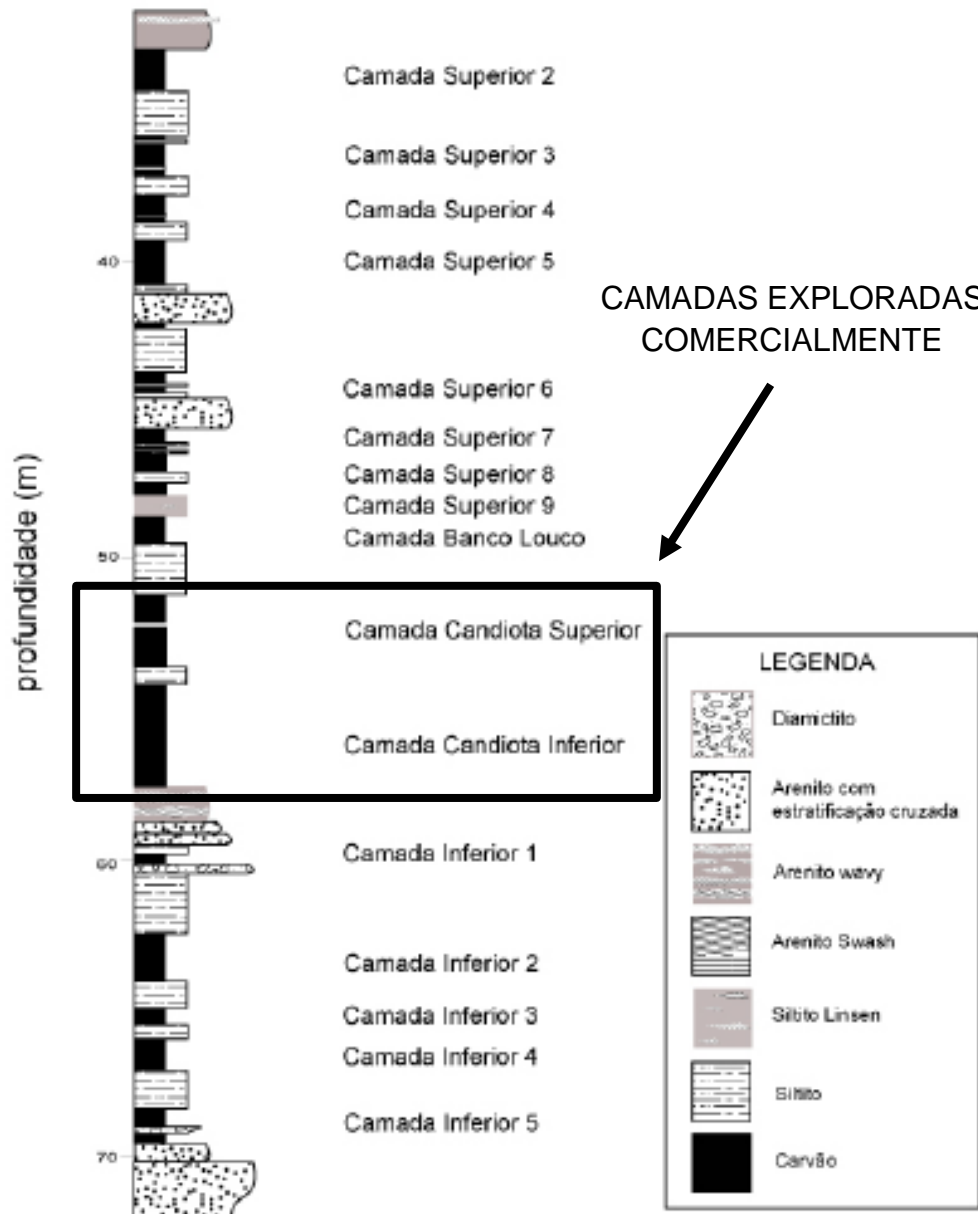
Os estudos revelaram que o carvão disposto na mina de Candiota corresponde à classificação sub-betuminoso, de qualidade inferior a muito inferior, devido ao elevado teor de cinzas. A composição mássica do carvão, segundo Oliveira (2011), segue a seguinte proporção:

- Umidade: 7,3%;
- Cinzas: 46,0%, sendo composta basicamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- Matéria volátil: 20,0%, sendo que em base seca e livre de cinzas, este valor atinge 43,6%;
- Carbono fixo: 26,7%.

O poder calorífico superior do carvão ROM (*run of mine*, vindo da mina) variou entre 1546 cal/g a 3770 cal/g, apresentando um valor médio de 2577 cal/g.



Figura 2 - Perfil da distribuição de camadas de carvão em Candiota/RS.



Fonte: Oliveira (2011)

#### 4.3 Fluxograma do processo da mineração a combustão do carvão

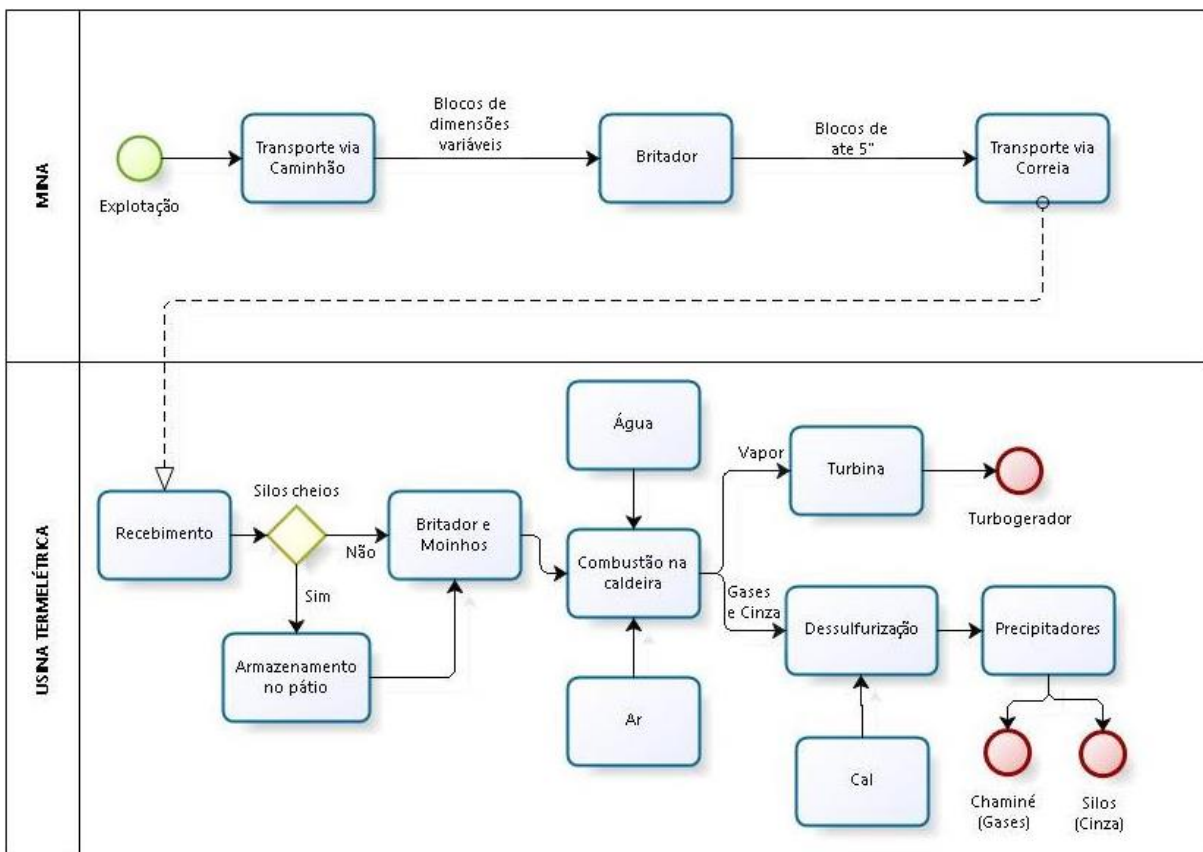
Para que o carvão seja convertido em eletricidade, ele necessita ser extraído do solo, britado e moído para ser queimado em fornalhas. A combustão gera calor, que é transferido para a água que circula pelas tubulações da caldeira. Com este calor, a água vaporiza, e o vapor aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico, promovendo a geração de energia elétrica. Na Figura 3 (próxima página) está representado o fluxograma do processo de geração de energia.

A fim de aumentar a eficiência da queima o carvão deve ser moído, para aumentar a área específica de contato com ar (REINALDO, 2004). Para isto, a CGTEE utiliza moinhos para atingir a granulometria exigida para combustão. Através de acordos comerciais, a granulometria do carvão enviado pela CRM à CGTEE é de 5,0” (cinco polegadas, equivalente a 120 mm). Após a moagem, a granulometria média corresponde a 0,074 mm.

O carvão encontra-se depositado em camadas, conforme explicado no item 4.2. Para sua exploração, é utilizado o método de lavra a céu aberto com emprego de explosivos. Os blocos de carvão desmontados são carregados por uma draga em caminhões, que realizam o transporte até um conjunto de britadores de mandíbulas, que promovem a cominuição do material até blocos de 120 mm.

O transporte do carvão britado entre a CRM e a CGTEE é feito por correias transportadoras, (ou caminhões, na indisponibilidade destas), que podem depositar o carvão no pátio ou diretamente nas correias internas da CGTEE.

Figura 3 - Fluxograma de todo o processo desde a exploração na mina até a geração de energia elétrica

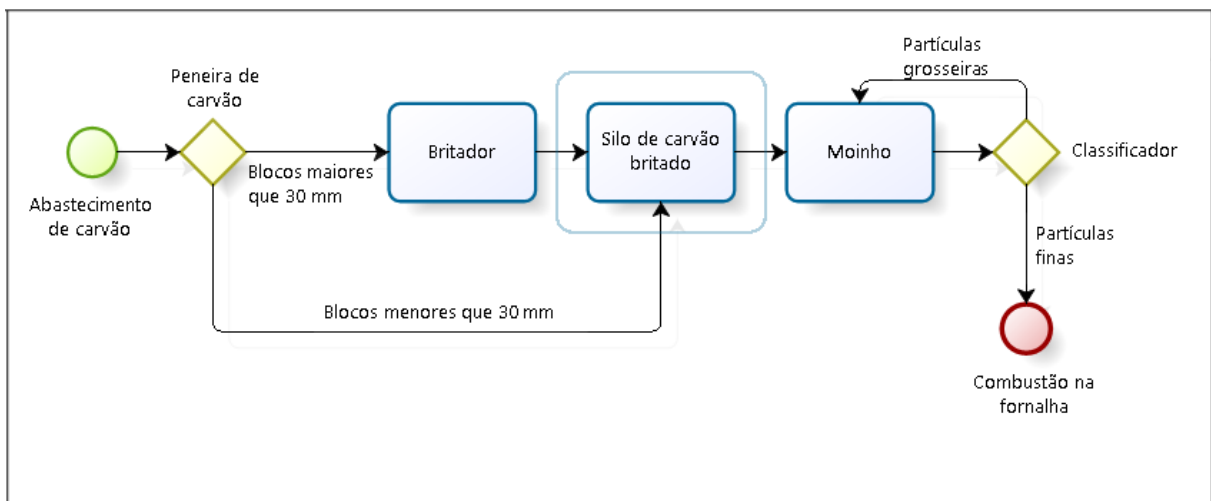


Fonte: O Autor.

Após o recebimento, o carvão passa pelo processo de cominuição apresentado na Figura 4, composto por um par de britadores de martelo (um operando e outro em reserva) e por três moinhos de bolas.

O conjunto de peneira e britador reduz a granulometria do carvão para a entrada no moinho. Os blocos de carvão menores de 30 mm passam pela peneira (Figura 5) e seguem para o silo de carvão britado, enquanto os blocos maiores são direcionados ao britador (Figura 6), para redução até 30 mm e posterior transporte ao silo.

Figura 4 - Fluxograma detalhado do processo de cominuição (britagem e moagem) no complexo termelétrico



Fonte: O Autor.

Figura 5 - Fotos externa e interna da peneira de carvão.



Fonte: O Autor.

Figura 6 - Fotos externa e interna do britador de carvão.



Fonte: O Autor.

Para a obtenção da granulometria desejada, são utilizados moinhos de carvão equipados com aero separadores, também chamados de classificadores. O modelo de moinho instalado é o moinho de bolas, onde o carvão é inserido em um tambor carregado com bolas de aço. Com o movimento rotativo, as esferas realizam um movimento similar a uma cascata, provocando a quebra dos blocos de carvão.

A granulometria desejada é obtida através de aero separadores (Figura 7), onde estão instaladas aletas que restringem o fluxo de ar e de carvão. As partículas menores são carregadas pelo ar de transporte, vencendo as restrições das aletas, enquanto as partículas grosseiras perdem energia cinética e caem no fundo do cone interno, formando a chamada carga circulante e retornando ao moinho para remoagem em um circuito fechado.

Quanto mais restrita for a passagem nos aero separadores, menor será a granulometria do carvão moído. A restrição ocorre com o ajuste em aletas posicionadas na parte superior do classificador da Figura 7, através de alavancas externas, conforme a foto da Figura 8. O fechamento das aletas ocasiona um maior consumo de energia na moagem, pois um volume maior de partículas mais grosseiras é rejeitado e volta ao moinho, resultando no aumento da carga circulante.

Figura 7 - Vistas lateral (à esquerda) e superior (à direita) de um aero separador de duplo cone.

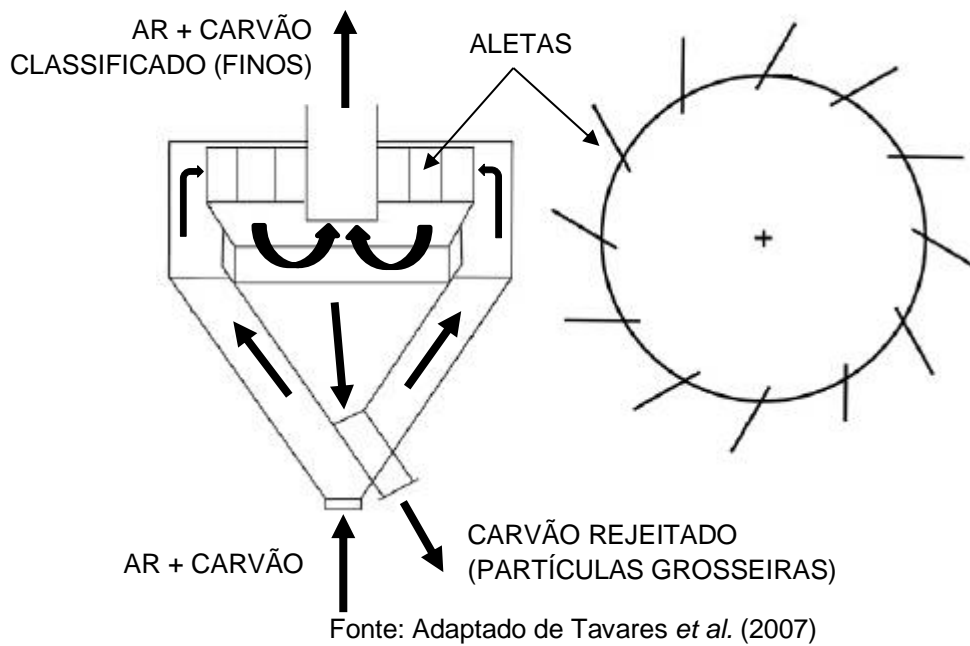
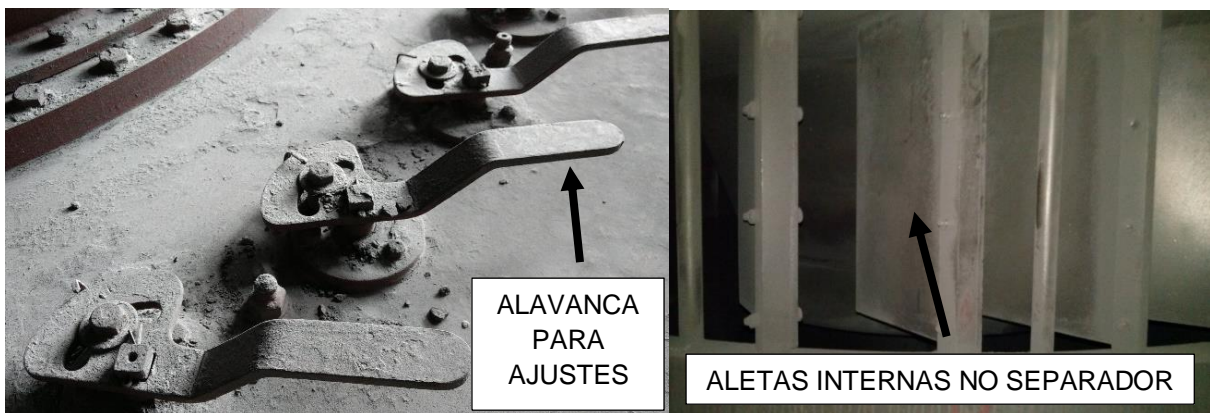


Figura 8 - Alavancas (a esquerda) para ajuste das aletas do aero separador (à direita).



Fonte: O Autor.

#### 4.4 Geração de energia elétrica através do carvão

O processo de geração de energia elétrica em usinas térmicas é complexo, envolvendo um grande número de equipamentos. Conforme Lora e Nascimento (2004), a geração de vapor ocorre com o aquecimento da água em caldeiras, onde ocorre a combustão através da injeção de combustível e ar. O vapor gerado aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico, que converte o movimento do eixo em energia elétrica.

A quantidade de energia elétrica gerada é controlada pela vazão de ar e de carvão nos moinhos. Um incremento de ar na entrada do moinho provoca um aumento no arraste de carvão pulverizado para a fornalha, aumentando a chama. O aumento na chama provoca aumento de pressão no vapor a ser descarregado no turbo gerador, aumentando a potência elétrica.

Na usina em questão, o vapor é gerado em uma caldeira aquatubular, onde a água e o vapor circulam na parte interna das tubulações, que estão dispostas de tal maneira a formar uma câmara de combustão, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Imagem da câmara de combustão de uma caldeira em funcionamento.



Fonte: CGTEE (2010)

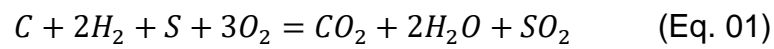
#### 4.4.1 Ar, combustível e combustão

Segundo Garcia (2002), o carvão é processado nos britadores e moinhos, até atingir a granulometria desejada para ser queimado. A partir dos moinhos, o carvão é carregado pelo ar primário para os classificadores e posteriormente para a fornalha.

Os ventiladores de ar primário são os responsáveis por promover este fluxo de ar que é aspirado da atmosfera e aquecido com os gases da combustão em trocadores de calor específicos para este fim. Ao passar pelos moinhos, além da função de transporte, tem a função de secagem do carvão, reduzindo ao máximo sua umidade.

Na câmara de combustão estão instalados os queimadores de carvão, que o injetam juntamente com ar em direção ao centro da câmara. Há um leve desvio no alinhamento dos queimadores, fazendo que a chama fique em forma de vórtice (como visto na Figura 9), aumentando o tempo de residência do carvão na fornalha.

Para o controle estequiométrico da combustão, são utilizados ventiladores de ar secundário (ou ar forçado), que insuflam ar diretamente na fornalha, sem passar pelos moinhos. Este ar também é pré-aquecido em trocadores de calor, aproveitando a temperatura dos gases da combustão. A combustão consiste em uma reação química exotérmica, onde os elementos Carbono (C), Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e Enxofre (S) reagem com o Oxigênio (O<sub>2</sub>) presente no ar, de acordo com a equação abaixo:



O ajuste fino da quantidade de energia elétrica gerada é realizado através do ar primário nos moinhos. Aumentando-se o fluxo de ar nos moinhos, uma quantidade maior de carvão é arrastada para a fornalha, aumentando a energia térmica na combustão. Conseqüentemente, o vapor absorve mais calor e o converte em aumento de pressão, forçando um fluxo maior de vapor na turbina, aumentando a energia no eixo do gerador.

#### 4.4.2 Gases e Cinzas

Após a combustão, os gases e cinzas passam por um trocador de calor, onde cedem o calor residual da queima para os ares primário e secundário, que serão utilizados na combustão. Após o trocador de calor, as cinzas são retidas em precipitadores eletrostáticos. A partir dos precipitadores, a cinza é transportada para silos, onde são armazenadas e descarregadas em caminhões, seguindo para comercialização em indústrias cimenteiras ou descarte na cava da mina.

Os gases passam por um sistema de dessulfurização, para eliminar o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) proveniente da combustão. Ocorre a injeção de Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ), que através de algumas reações químicas absorve boa parte do dióxido de enxofre presente no gás. O subproduto desta reação, Sulfito de Cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ), também é armazenado em silos para posterior transporte para a cava da mina. Desta forma, após a retenção das cinzas e da dessulfurização, os gases são expelidos para a atmosfera através da chaminé.

#### 4.4.3 Ciclo térmico

O ciclo térmico da usina é responsável por aproveitar o vapor produzido e fornecer água para caldeira (LORA e NASCIMENTO, 2004). Após o vapor executar trabalho na turbina, ele passa por um trocador de calor chamado de condensador, onde se liquefaz, sendo armazenado na fase líquida (chamado de condensado).

Este condensado é transferido para o tanque de alimentação da caldeira, passando por pré-aquecedores que utilizam extrações de vapor da turbina para seu aquecimento. No tanque de água de alimentação o condensado passa pelo processo de desaeração, que consiste na retirada do oxigênio dissolvido, e fica armazenado para abastecer a caldeira.

A produção de vapor na caldeira reduz seu nível de água, que deve ser reposta em mesma proporção. Esta tarefa é executada pelas bombas de água de alimentação, que mantém a caldeira com o nível de água dentro dos parâmetros exigidos pelo manual de operação. Assim, o ciclo se repete continuamente.

## 5 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FRAGMENTAÇÃO

### 5.1 Operações Unitárias

Conforme o Conselho Federal de Química (CFQ), Operações Unitárias são “operações onde ocorrem transformações físicas e/ou físico-químicas e/ou fenômenos de transporte, realizadas em equipamentos específicos, tanto em escala piloto como industrial, que por meio da aplicação dos fenômenos de transporte permitem e complementam:



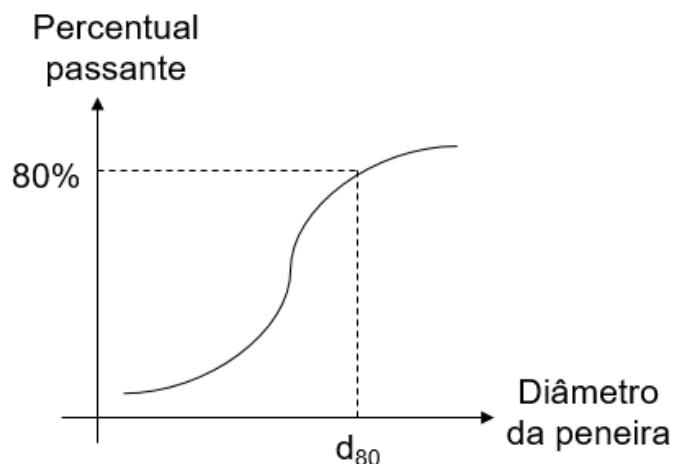
- a) A otimização e interação das conversões químicas nos processos industriais;
- b) A preparação das matérias primas a serem processadas;
- c) A otimização e racionalização energética dos processos;
- d) A separação e/ou purificação dos produtos intermediários e/ou finais dos processos;
- e) O controle e tratamento de efluentes sólidos, líquidos e gasosos. ”

São consideradas operações unitárias os processos de transporte de sólidos, moagem, britagem, granulação de sólidos, peneiramento, classificação de sólidos, elutriação, sedimentação, separação centrífuga, filtração, fluidização aquecimento e resfriamento de fluidos, evaporação, cristalização, secagem, destilação, extração, absorção, adsorção e umidificação.

Desta forma, a cominuição de carvão consiste nas operações unitárias de britagem, moagem e classificação de sólidos, além do transporte do mesmo entre os moinhos e a caldeira, com o objetivo de reduzir sua granulometria e transportá-lo até a utilização final na combustão.

Granulometria é o termo utilizado para caracterizar o tamanho das partículas de um determinado material. A granulometria de uma substância sólida corresponde ao espaçamento da peneira no qual passam 80% das partículas, caracterizado pela dimensão  $d_{80}$  na Figura 10.

Figura 10 - Representação gráfica da distribuição granulométrica de um material particulado.



Fonte: O Autor.

Distinguem-se pelo tamanho cinco tipos de sólidos particulados:

- Pós: partículas de 1  $\mu\text{m}$  até 0,5 mm (1  $\mu\text{m} = 10^{-6}$  m);
- Sólidos Granulares: partículas de 0,5 a 10 mm;
- Blocos Pequenos: 1 a 5 cm;
- Blocos Médios: 5 a 15 cm;
- Blocos Grandes: > 15 cm.

Para a combustão, segundo Garcia (2002), o carvão necessita apresentar uma granulometria tal que ao menos 75% das partículas sejam passantes em uma peneira de 200 mesh Tyler (equivalente a 0,074 mm). Já Both (2012) cita que o Electric Power Research Institute recomenda como granulometria ótima para a combustão o percentual de 70% passante na peneira de 200 mesh Tyler. Este é ponto de equilíbrio, considerando que o carvão com uma granulometria maior terá dificuldades em atingir a combustão completa, resultando em carvão incombusto em meio às cinzas. Já uma granulometria menor exige maiores gastos energéticos na moagem.

Creiasco (2012) explica que Tyler é um sistema padronizado pela International Standard Organization (ISO), baseando-se no número de aberturas (mesh) em uma polegada linear (25,4 mm) de uma peneira.

Segundo Luz *et al.* (2010), no campo da mineração, a fragmentação, também chamada de cominuição, é definida como o conjunto de técnicas que objetivam reduzir o tamanho de um bloco de um mineral sólido em fragmentos de tamanho menor. Esta fragmentação permite que materiais heterogêneos sejam beneficiados, separando o mineral nobre do mineral de ganga, além de tornar os minerais homogêneos aptos a serem enviados às próximas etapas do processo.

O processo de cominuição corresponde ao maior gasto energético de uma empresa mineradora, podendo atingir até 80% do total do consumo de energia (LUZ *et al.*, 2010). Devido a esta elevada participação nos custos, o assunto é frequentemente abordado em pesquisas de melhorias de performance.

Análises químicas em materiais minerais mostram que estes são formados por estruturas cristalinas em arranjos tridimensionais. As ligações entre os átomos são eficientes em pequenas distâncias, mas tornam-se frágeis em longas distâncias,

gerando falhas na estrutura macroscópica. Estas falhas são chamadas de “gretas de Griffith” na área de mineração. Ao sofrer uma tensão que ultrapassa o limite de ruptura do material, ocorre a fratura do mineral nos pontos de concentração de tensão, próximo às falhas.

Quando ocorre a fratura do material, uma parte da energia contida no material converte-se em energia livre na superfície do bloco. Desta forma, um bloco recém-britado ou moído tem sua área superficial quimicamente mais ativa. Desta forma, a estocagem de materiais fragmentados provoca perda de reatividade do material.

Conforme explicado por Chaves e Peres (2009), a energia mecânica é aplicada por meio de esmagamento (ou compressão), impacto, atrito ou abrasão, procedendo assim a fragmentação do material.

Na quebra por compressão, o material é prensado entre duas superfícies rígidas, gerando uma fratura principal induzida pela tensão e pequenas fraturas no ponto de contato com as superfícies, gerando partículas mais finas.

No método de fragmentação por impacto, é aplicado um esforço de forma rápida no material, onde este absorve mais energia que a necessária para uma simples fratura, gerando partículas de forma e tamanho semelhantes.

A fragmentação por atrito ocorre por interações partícula-partícula e é caracterizada pela produção de finos. Quando este não é o objetivo, o processo de quebra por atrito torna-se indesejável.

De modo geral, quando os esforços são aplicados de forma lenta, a velocidade de deformação também é lenta, ocorrendo a fratura com menor deformação e gasto de energia. Por outro lado, foi demonstrado que no caso de uma velocidade muito alta a energia exigida para ruptura é mínima. Portanto, o consumo de energia aumenta conforme o aumento da velocidade de aplicação das forças, exceto em casos de velocidade extrema.

Até o momento, não há uma fórmula exata para determinar a energia necessária para a fragmentação de rochas minerais. Existem alguns modelos experimentais desenvolvidos pelos pesquisadores Rittinger (1867), Kick (1885) e

Bond (1952), (apud LUZ *et al.*, 2010), que permitem obter um valor aproximado do consumo energético no processo.

O primeiro modelo foi desenvolvido por P. Ritter Von Rittinger e aplica-se a fragmentação muito fina, no qual “a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido”. A fragmentação de uma partícula gera duas ou mais novas partículas, aumentando a área superficial total do produto fragmentado. Neste raciocínio, tem-se a função:

$$E = K(S_1 - S_0) \quad (\text{Eq. 02})$$

Sendo:

E = energia específica;

K = fator de proporcionalidade;

$S_1$  = área superficial do produto fragmentado;

$S_0$  = área superficial inicial.

O segundo trabalho neste tema foi realizado por F. Kick, aplicando-se à fragmentação de maticões. Cita que “o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas” e a equação de cálculo é a seguinte:

$$E=C.\log(D_0/D_1) \quad (\text{Eq. 03})$$

Sendo:

E = energia requerida;

C = constante;

$D_0$  = diâmetro inicial da partícula;

$D_1$  = diâmetro final da partícula.

Ambos os estudos citados apresentavam altos percentuais de erro, variando muito a cada mineral analisado. Em teoria, os minerais deveriam ser mais duros do que são na prática, porém a energia gasta no processo era superior ao valor calculado pelas fórmulas teóricas.

Devido às divergências entre as teorias de Rittinger e Kick com testes práticos, a busca por um modelo mais exato teve continuação. Então F.C. Bond propôs um novo modo de cálculo, através de dados empíricos, determinando que “a energia

requerida para fragmentação é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho” (BOND, 1952, apud LUZ *et al.*, 2010). A expressão matemática é descrita da seguinte forma:

$$E = E_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad (\text{Eq. 04})$$

Sendo:

E = energia requerida para fragmentação;

$E_0$  = constante;

P = tamanho do produto;

F = tamanho da alimentação.

É importante entender que o “tamanho” das partículas de alimentação e de produto corresponde ao valor de abertura, em micrometros ( $\mu\text{m}$ ), da peneira pelo qual passa 80% do material analisado.

Bond ainda propôs o uso do WI (*Work Index*) ou índice de trabalho, que representa a energia necessária para fragmentar um determinado material de tamanho inicial muito grande (infinito) até uma granulometria onde 80% do material seja passante em uma peneira de 100  $\mu\text{m}$ . Aplicando estes valores na equação de Bond, temos:

$$WI = E_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right] = E_0 \left[ \frac{1}{10} \right] \quad (\text{Eq. 05})$$

$$E_0 = 10WI \quad (\text{Eq. 06})$$

Substituindo o valor de  $E_0$  na expressão matemática do enunciado, a Equação de Bond fica na seguinte forma:

$$E = 10WI \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad (\text{Eq. 07})$$

Este modelo é o mais usual, sendo aplicado até os dias de hoje.

Em 1957, Charles demonstrou que as três teorias podem ser representadas por uma única equação:

$$dE = -k \frac{dx}{x^n} \quad (\text{Eq. 08})$$

Neste caso,  $n$  e  $k$  são constantes referentes ao material, enquanto  $dE$  é a quantidade diferencial de energia necessária para provocar a redução de tamanho  $dx$  no material. A variação do valor de  $n$  nos traz as seguintes condições:

- Para  $n = 1$ ; a equação corresponde à lei de Kick, adequada para cominuição de blocos grandes, como na britagem;
- Para  $n = 1,5$ ; a equação satisfaz a equação de Bond, aplicada na moagem industrial;
- Para  $n = 2$ ; a equação converte-se na lei de Rittinger, adequada à moagem ultrafina, relacionada à variação de área superficial do minério.

Conforme Chaves e Peres (2009), as operações de cominuição podem ser realizadas a seco ou a úmido. A úmido significa que o processo ocorre com o mineral mergulhado em uma polpa com água que facilita o transporte das partículas, enquanto o modo a seco ocorre somente com a umidade natural do mineral. Normalmente, a britagem é realizada a seco e a moagem a úmido. O modo a úmido apresenta as seguintes vantagens:

- Facilidade no escoamento do mineral;
- Dissipação do calor;
- Eliminação da emissão de poeira.

Como desvantagem, ocorre um maior desgaste abrasivo nos equipamentos que trabalham a úmido, devido à sinergia com os processos de corrosão eletroquímica (resultantes da concentração de íons na polpa) juntamente com a ação abrasiva do mineral. Por este motivo, a cominuição de materiais extremamente abrasivos é realizada a seco.

No caso específico da cominuição de carvão para combustão, o processo a úmido é inviável, pois além do carvão ser abrasivo e higroscópico, seria necessário acrescentar uma etapa de secagem no processo para que fosse possível realizar a queima do carvão na caldeira.

## 5.2 Britagem

A britagem pode ser definida, de modo geral, como um conjunto de operações de fragmentação que deixam o mineral em condições granulométricas de ser utilizado diretamente ou enviado para processamento posterior (LUZ *et al.*, 2010).

Segundo Chaves e Peres (2009), a diferença entre britagem e moagem está nos mecanismos utilizados para redução das partículas, além da faixa de tamanhos destas partículas. Na britagem, predominam as ações de compressão ou de impacto, enquanto na moagem, as partículas (já mais finas) sofrem esforços de abrasão e arredondamento.

Os britadores dividem-se nas seguintes famílias, com respectivos tipos e estágios de britagem (conforme Tabela 1):

- Mandíbulas:
  - Dodge (um eixo): primários a terciários.
  - Blake (dois eixos): primários.
- Giratórios:
  - Giratórios: primários.
  - Cônicos *standard*: secundários.
  - Cônicos *short head*: terciários.
  - Interpartículas: quaternários e moagem grossa.
- Impacto:
  - Eixo horizontal: primários a terciários.
  - Eixo vertical: secundários e terciários.
  - Moinhos de martelos: terciários e quaternários.
- Especiais:
  - Bradford: primários.
  - Outros: carvão e minerais moles.

Conforme Luz *et al.* (2010), a tabela seguinte mostra a classificação dos estágios da britagem. De maneira geral, a britagem apresenta uma baixa relação de redução (RR).

Tabela 1 - Estágios de Britagem, com suas RR e granulometrias.

ESTÁGIO	RELAÇÃO DE REDUÇÃO	TAMANHO MÁXIMO (mm)	
		ALIMENTAÇÃO	PRODUTO
BRITAGEM PRIMÁRIA	Até 8:1	1000	100
BRITAGEM SECUNDÁRIA	6 a 8:1	100	10
BRITAGEM TERCIÁRIA	4 a 6:1	10	1,0
BRITAGEM QUARTENÁRIA	Até 20:1	5,0	0,8

Fonte: Adaptado de Chaves e Peres (2009).

A britagem primária utiliza britadores de grande porte operando a seco, em circuito aberto. As operações seguintes à britagem primária, de modo geral, são entendidas como britagem secundária. O objetivo principal é preparar o material para moagem, sendo comum o descarte de finos (escalpe) para aumentar a capacidade de produção.

A britagem terciária costuma ser o último estágio de britagem. Os estágios subsequentes (quaternários) são necessários em usinas com características específicas de fragmentação, como necessidade de uma estreita faixa granulométrica de produto. Na britagem terciária predomina a utilização de britadores cônicos operando em um regime controlado, em circuito fechado.

Conforme apresentado por Ribeiro (2014), a CRM possui duas linhas paralelas de britagem, cada uma composta por uma peneira vibratória, um britador de mandíbulas Dodge e um britador de mandíbulas duplo eixo (Blake). O produto desta britagem corresponde a blocos de carvão de no máximo 120 mm de diâmetro, que são enviados à CGTEE através de correias transportadoras.

Na CGTEE, estão instalados paralelamente dois britadores de martelo, que reduzem a granulometria do carvão para o diâmetro máximo de 30 mm, especificação para alimentação dos moinhos.

Os produtos provenientes da britagem são as britas. O material sofre ação de forças de compressão e impactos até sua ruptura. Com a quebra, ocorre a redução do tamanho do bloco, que cai para as partes mais estreitas do britador, sofrendo os esforços até quebrar novamente. Ao atingir o tamanho inferior à saída do britador, o



material britado atinge a granulometria desejada e é encaminhado para as etapas seguintes do processo (CHAVES E PERES, 2009).

Na operação de um britador, os problemas mais frequentes são:

- Empastamento: quando o material de alimentação está úmido, ele pode grudar nas mandíbulas, chegando ao ponto de obstruir a passagem de material.
- Entupimento (*blocking*): ocorre quando o britador é alimentado com um bloco muito grande, maior do que o limite admitido pelo britador
- Atolamento (*bridging*): neste caso, as partículas formam um arranjo em forma de arco, sustentando as demais partículas que estão sendo alimentadas no britador, obstruindo a passagem.
- Afogamento (*choking*): este problema ocorre quando a vazão de alimentação é maior do que a capacidade do equipamento. À medida que o material vai reduzindo de tamanho, ele ocupa um volume maior, diminuindo a vazão de capacidade do britador. Se a alimentação for maior que esta capacidade, ocorre afogamento.

### 5.3 Moagem

Segundo Chaves e Peres (2009), o processo de moagem distingue-se da britagem por dois fatores: a granulometria e o mecanismo de redução de tamanho. A moagem trabalha com partículas menores e utiliza mecanismos de arredondamento de partícula, quebra de pontas e abrasão.

Os objetivos da moagem são:

- Separar minerais valiosos com material de ganga, preparando o material para processos de concentração e/ou flotação;
- Diminuir o tamanho das partículas para as especificações exigidas nos processos seguintes;
- Aumentar a área superficial, a fim de facilitar a liberação de matéria volátil e as reações químicas, como a combustão.

Os moinhos de carga cadente são os equipamentos mais utilizados no processo de moagem, sendo os moinhos de barras, bolas e seixos utilizados na grande maioria das instalações. Outros equipamentos utilizados são os moinhos de martelo, de discos, vibratórios, de impacto, entre outros.

Os moinhos normalmente são constituídos de um tambor cilíndrico, apoiado em mancais nas extremidades, que gira em torno de seu eixo. Estes mancais devem ser devidamente lubrificados, assim como os demais itens móveis (acoplamentos e transmissões), para que não haja superaquecimento e perda excessiva de energia sob a forma de calor dissipado.

A fabricação é realizada através de chapas de aço calandradas e com revestimento resistente ao desgaste, podendo ser metálico, cerâmico, ou de borracha. No interior do tambor encontram-se os corpos moedores e a polpa, composta do mineral a ser processado e água, no caso de moagem a úmido.

De modo geral, o acionamento é realizado com motores elétricos, com rotação praticamente constante, utilizando-se uma caixa redutora de velocidade e um acionamento através de um conjunto de coroa e pinhão. O pinhão, acoplado na saída da caixa redutora, é tratado com dureza menor do que a coroa, que fica rigidamente montada no tambor do moinho. Desta forma, o desgaste maior ocorre no pinhão, uma peça menor, mais barata e de maior facilidade de montagem.

Segundo Luz *et al.* (2010), as características que definem um moinho são suas dimensões (diâmetro e comprimento) e sua potência instalada. A potência instalada leva em consideração, além das dimensões, a carga de corpos moedores, a rotação e a quantidade de sólidos na polpa.

A carga de corpos moedores pode ser composta pelos seguintes itens:

- Barras: na parte interna do moinho estão instaladas barras metálicas, paralelamente com o eixo de rotação do equipamento, com o comprimento pouco menor que o comprimento interno do cilindro.
- Bolas: de utilização mais usual, são utilizadas esferas de ferro fundido ou aço forjado para moagem da polpa.
- Cylpebs: são peças metálicas tronco-cônicas ou cilíndricas, podendo ser laminadas ou forjadas.

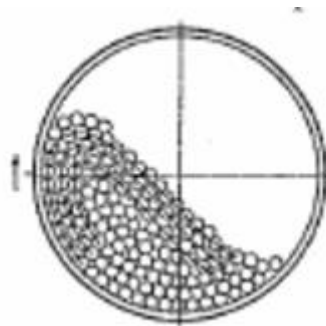
- Seixos: são fragmentos de rochas, utilizados quando o mineral a ser processado não pode entrar em contato com materiais metálicos.

O processo de moagem deve ocorrer preferencialmente em modo úmido e com uma quantidade de sólidos entre 50% e 60% na polpa. O volume de água adicionada ao minério na alimentação altera a viscosidade, a densidade e a velocidade da polpa, influenciando diretamente na ação dos corpos moedores e na eficiência do moinho.

O comportamento dos corpos moedores dentro do moinho pode ser dividido em quatro situações, sendo que estas estão diretamente relacionadas com a rotação do moinho.

- a) Em baixas rotações, as bolas ou barras são carregadas pelo revestimento do moinho até uma determinada altura, rolando umas sobre as outras, conforme a Figura 11. Este movimento é chamado de “rolamento”, e a cominuição ocorre pelo processo de abrasão.

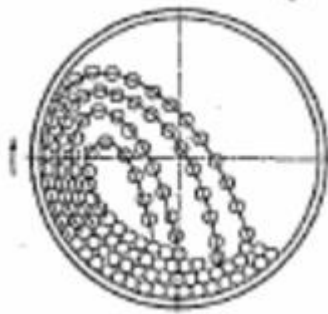
Figura 11 - Representação dos corpos moedores em movimento de rolamento.



Fonte: Luz *et. al.* (2010)

- b) Ao aumentar a rotação do moinho, os corpos moedores acompanham o revestimento por um ângulo maior, vindo a formar uma trajetória parabólica e caindo sobre os demais. Este movimento é chamado de “cascateamento” e está representado na próxima figura.

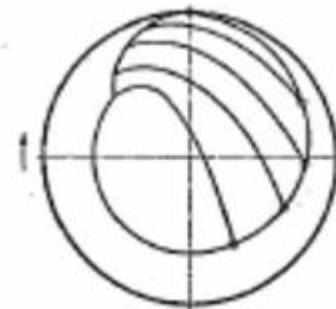
Figura 12 - Representação dos corpos moedores em movimento de cascadeamento.



Fonte: Luz *et. al.* (2010)

- c) Chegando próximo à velocidade crítica do moinho, os corpos moedores seguem a mesma trajetória parabólica, porém começam a cair sobre o revestimento do cilindro, conforme a figura abaixo. Este fenômeno não é adequado, pois os corpos moedores danificam a estrutura interna do moinho.

Figura 13 - Representação corpos moedores caindo sobre a blindagem do moinho.



Fonte: Luz *et. al.* (2010)

- d) Ao atingir a velocidade crítica de rotação do moinho, todo material contido nele acompanha o movimento circular do cilindro devido à força centrífuga. A equação abaixo, apresentada por Luz *et al.* (2010) representa o modo de cálculo da velocidade crítica, em rotações por minuto (RPM) através do diâmetro (D) do moinho, expresso em metros.

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (\text{Eq. 09})$$

A operação do moinho não deve ultrapassar a velocidade crítica, pois nesta não ocorre a fragmentação. Os blocos do minério e os corpos moedores permanecem de forma estática em relação ao moinho, não havendo impactos e/ou atrito entre eles.

O revestimento interno dos moinhos, composto por peças chamadas de *lifters* ou blindagens, também interfere na trajetória dos corpos moedores. Saliências maiores tendem a dar um impulso maior nas esferas ou barras, aumentando o efeito de cascadeamento.

O processo de moagem, como regra geral, ocorre a úmido, pois o fluido auxilia no abatimento de materiais particulados e no arrefecimento dos equipamentos. A moagem a seco somente é indicada para processos onde não haja água disponível ou quando o mineral processado não pode ser umidificado, como carvão mineral, cal virgem, cimento, entre outros. Na moagem a seco o desgaste dos corpos moedores e blindagens é menor, pois os eletrólitos contidos na polpa provocam corrosão nas superfícies que acabam sendo expostas pela abrasão.

É importante ressaltar que moagem a seco ocorre somente com a umidade do minério (5% a 15%), enquanto a moagem a úmido ocorre com um mínimo de 50% de água na polpa. Não há como trabalhar com valores intermediários a estas faixas.

Normalmente os moinhos que utilizam esferas como corpos moedores, são chamados de moinhos de bolas. Trabalham com rotação entre 65% e 80% da velocidade crítica e com um volume de corpos moedores entre 35% e 50%.

Utilizam-se bolas forjadas ou fundidas com tratamentos térmicos e/ou químicos para que se obtenha a dureza desejada. Uma dureza elevada aumenta a durabilidade das bolas, porém implica no aumento de sua fragilidade e no desgaste das blindagens internas do moinho.

A reposição de corpos moedores desgastados é um dos principais custos da moagem, depois da energia de acionamento do moinho. As principais falhas que ocorrem nos corpos moedores são:

- Erosão;
- Riscamento;
- Endentação ou mordida;
- Sulcamento;
- Desgaste metal contra metal;
- *Pitting* (pequenos pontos de corrosão localizada);

- Lascamento ou *spalling*;
- Fratura hemisférica;

Ainda conforme Chaves e Peres (2009), os principais fatores considerados na operação de um moinho são a vazão de produto, corrente elétrica de acionamento, ruído dos corpos moedores, a temperatura de saída e a carga circulante, que consiste na quantidade de material que sai e retorna ao moinho, devido a sua granulometria estar acima dos valores desejados.

Atualmente existem sistemas automatizados capazes de controlar a alimentação dos moinhos, utilizando as variáveis citadas acima em algoritmos, fornecendo um feedback para o ajuste do moinho.

#### 5.4 Cominuição de Carvão

O processo de cominuição do carvão apresenta alguns diferenciais em relação aos demais minérios, devido a sua caracterização (CHAVES E PERES, 2009). Os principais pontos são os seguintes:

- Heterogeneidade do minério: há grande variabilidade da concentração dos constituintes;
- Presença intensa falhas (trincas, poros, capilaridades);
- Elevada umidade, sendo esta superficial ou contida nas falhas;

A equação para o cálculo do índice de trabalho (WI) de Bond para o carvão são diferentes, pois o comportamento plástico e elástico do material resulta em valores diferentes dos demais minérios. Enquanto o WI é calculado, de modo geral, conforme a norma NBR 11376 (ABNT, 1990), o WI do carvão é determinado pelo ensaio de Hardgrove, desenvolvido em 1932 e normatizado pela norma ASTM D409 (ASTM, 2016), representado pela seguinte equação:

$$WI = \frac{435}{HGI^{0,91}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Segundo Garcia (2002), o Índice de Moabilidade do Material de Hardgrove (HGI) do material é calculado em um moinho especial, chamado de Máquina de Hardgrove, onde é colocada uma amostra de 50 gramas de carvão com granulometria

de 1,18 milímetros. Após 60 rotações no moinho, a amostra é submetida à peneira de 0,074 mm (equivalente a 200 mesh). A massa de material passante é utilizada na equação abaixo, para obtenção do HGI.

$$HGI = 13 + 6,93(\text{massa passante } 200\#) \quad (\text{Eq. 11})$$

Um estudo realizado por Kalkreuth *et al.* (2005) mostrou que a redução do teor de cinzas do carvão provoca a redução de seu HGI, dificultando sua cominuição. Em seu estudo foram analisadas amostras de carvão da Mina do Recreio, no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul. As amostras apresentaram um percentual médio de cinza de 24,5% (base úmida) e HGI de 56.

Os equipamentos mais utilizados para a britagem de carvão são os britadores Bradford, de impacto, de rolos e moinhos de martelos. Para a moagem, são recomendados os moinhos de galga, Raymonds e o pulverizador de bolas.

## 5.5 Classificação de partículas

Conforme descrito por Massarani (2002), os estudos da trajetória das partículas são utilizados para realizar a classificação de partículas conforme seus valores de tamanho ou densidade.

Este processo de classificação é denominado de elutriação e baseia-se na diferença entre a velocidade do fluido de arraste e da velocidade terminal das partículas. Pelo fato da velocidade do fluido ser maior, ocorre o carregamento das partículas. Uma partícula maior tende a desenvolver uma velocidade terminal menor, vinda a sedimentar após a perda de velocidade no processo de classificação.

Conforme Cremasco (2012), as partículas estão sujeitas às forças de arraste, de colisão, gravitacionais e centrífugas. Quando as partículas têm massa específica ou diâmetro maior, a força peso destas partículas tende a ser superior à força de arraste, promovendo sua sedimentação. No caso de partículas menores ou mais leves, as forças de arraste carregam o material para a saída do classificador.

Os classificadores podem ser divididos em dois grupos: estáticos e dinâmicos. A principal diferença está nas características construtivas, onde os classificadores

dinâmicos possuem um elemento de rejeição constituído por um rotor móvel e os classificadores estáticos não apresentam este equipamento (ROSA, 2001).

## 6 METODOLOGIA

O caminho a ser seguido para a obtenção dos resultados será dividido em quatro etapas: caracterização do carvão, análise da eficiência do processo de cominuição, ajustes nos equipamentos e criação de um relatório técnico. Estas etapas estão representadas na Tabela 2. Para a organização do trabalho, serão utilizadas as ferramentas da qualidade conhecidas como Ciclo PDCA e 5W2H.

Conforme Campos (2004), o Ciclo PDCA (sigla dos vocábulos ingleses *Plan, Do, Check* e *Act*) também é chamado de Ciclo de Deming e consiste nas seguintes etapas:

- Planejamento (P): estabelecimento das metas e dos métodos para alcançá-las;
- Execução (D): execução das tarefas conforme previsto no planejamento e coleta de dados para verificação do processo;
- Verificação (C): comparação dos resultados com a meta planejada;
- Atuação Corretiva (A): detecção e correção de desvios, a fim de evitar a reincidência do problema.

Como método de organização das atividades, será utilizada a matriz conhecida como 5W2H, que é uma ferramenta que auxilia o planejamento de um processo respondendo a sete questões principais (SILVA et. al., 2013):

- O quê (*what*): item correspondente a ação principal da tarefa;
- Quem (*who*): indica quais serão as pessoas responsáveis pela tarefa;
- Como (*how*): descreve de que forma o objetivo da tarefa será atingido;
- Por quê (*why*): é o motivo, problema que torna a tarefa necessária;
- Quando (*when*): indica o período ou data para execução, adequando as atividades à duração do projeto;
- Quanto custará (*how much*): previsão de custos para a realização da tarefa;
- Onde (*where*): indica o local onde as tarefas serão executadas.



Estas questões permitem planejar a execução de atividades de um projeto identificando as etapas e seus respectivos objetivos, motivos, recursos, prazos e pessoal envolvido. Para este projeto, as atividades foram ordenadas conforme descrito a seguir. O item *how much* não foi inserido na tabela, pois as atividades estão inseridas nas atividades profissionais do pessoal envolvido.

Tabela 2 - Quadro resumo da metodologia.

Etapas Questões	1. Caracterização do carvão	2. Análise da eficiência do processo de cominuição	3. Ajustes nos equipamentos, acompanhando respectivas variações	4. Elaboração de um relatório das condições encontradas
<b>What</b>	Identificação da composição físico-química	Comparar a energia gasta no processo com fórmulas teóricas	Realizar ajustes nos equipamentos de cominuição e analisar as variações de processo	Registrar em documento oficial as condições de trabalho adequadas
<b>Who</b>	Mestrando, com apoio do pessoal do laboratório químico	Mestrando	Mestrando, com apoio do pessoal de manutenção e de laboratório químico	Mestrando
<b>How</b>	Análises de laboratório	Comparação entre valores teóricos e práticos de gasto energético e redução de granulometria	Utilização do ciclo PDCA	Digitação, impressão e divulgação de documento
<b>Why</b>	Para conhecer quais são as condições que os equipamentos devem operar	Para verificar o dimensionamento dos equipamentos	Para aumentar a eficiência no processo	Para que o conhecimento seja transmitido aos demais operadores do processo
<b>When</b>	Durante o início das pesquisas	Durante todo o período de pesquisa	Durante todo o período de pesquisa	Ao final do trabalho
<b>Where</b>	Laboratório químico da empresa	No local de trabalho	Locais de instalação dos equipamentos	Divisão de Operação

Fonte: O Autor.

## 6.1 Caracterizar o carvão disponível na mina de Candiota

A tarefa de caracterizar o carvão é o princípio das atividades da pesquisa. É necessário conhecer detalhadamente o minério em questão para que se possa compreender seu valor econômico e os processos necessários para seu aproveitamento.

As características físico-químicas do carvão definem qual é a forma mais adequada de processamento e quais equipamentos devem ser utilizados para que o minério seja convertido em combustível.

Para caracterizar o carvão, foram coletadas amostras de carvão bruto nos amostradores instalados para este fim, com auxílio dos analistas do laboratório químico. Após, as amostras foram analisadas em laboratório, quantificando os seguintes itens através das respectivas normas:

- Poder calorífico superior e inferior, conforme a norma ASTM D5865: *Standard Test Methods for Gross Calorific Value of Coal and Coke* (ASTM, 2013);
- Percentual de cinzas, conforme a norma NBR 8289: Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinzas (ABNT, 1983);
- Percentual de enxofre, conforme a norma ASTM D4239: *Standard Test Methods for Sulfur in the Analysis sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion Methods* (ASTM, 2017);
- Percentual de carbono fixo e Material volátil, conforme a norma ASTM D7582: *Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis* (ASTM, 2015);
- Preparação dos ensaios, conforme a norma NBR 8292: Carvão Mineral – Preparação de amostra de carvão mineral para análise e ensaios (ABNT, 1983).

As normas NBR 8289 e NBR 8292 foram canceladas em dezembro de 2014 pela ABNT. Como não foram disponibilizadas outras normas em substituição, este trabalho prosseguiu com as normas supracitadas.

Existem alguns estudos relacionados ao assunto, conforme apresentado por Oliveira (2011). Neste trabalho também foram pesquisados dados históricos do carvão

fornecido pela CRM, para que se tenha uma ideia da variabilidade da composição do carvão. Esta variabilidade pode vir a interferir nos processos de cominuição e combustão, exigindo mudanças operacionais nos equipamentos.

A coleta das amostras ocorreu em um amostrador instalado em uma das correias transportadoras, após os britadores da CGTEE. Estando a correia em operação, o equipamento coleta uma pequena amostra de carvão a cada intervalo de 14 minutos, depositando-a em um recipiente específico. Duas vezes ao dia, o operador da área recolhe as amostras do recipiente e entrega ao laboratório químico, que faz o quarteamento e a análise imediata do carvão no equipamento de termogravimetria.

Houve a necessidade de determinar o HGI e o WI do carvão. Como a empresa não dispõe de equipamento específico para determinação dos índices, estes foram pesquisados em bibliografias relacionadas ao carvão disponível na Mina de Candiota.

## 6.2 Análise da eficiência da cominuição

A análise da eficiência do processo de redução do tamanho das partículas de carvão foi realizada através da comparação da energia gasta no processo com a energia que seria necessária, conforme os cálculos propostos por Bond, pois este modelo aplica-se mais adequadamente ao processo de moagem industrial (LUZ *et al.*, 2010).

O modelo de Bond foi utilizado por Alves *et al.* (2013) para determinar o WI do minério de cobre na moagem na Mina do Sossego, pertencente a empresa Vale S.A. Também foi utilizado por Carvalho (2015), onde foi analisada a moabilidade do minério de ferro, objetivando a otimização da disposição de moinhos.

O cálculo da energia teórica para moagem (utilizando modelo empírico) foi realizado utilizando o HGI pesquisado na Eq. 10 ( $WI = \frac{435}{HGI^{0,91}}$ ), obtendo-se o WI para o carvão disponível na Mina de Candiota. Na Eq. 07 ( $E = 10WI \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]$ ) foram inseridos os valores de WI encontrados anteriormente e os valores de diâmetro das partículas de alimentação e de produto dos moinhos, resultando em um valor de

energia necessária para moer uma tonelada de material, expressa em quilowatt-hora por tonelada (kWh/t).

Operacionalmente, foi realizada a medição da potência do acionamento do moinho e da vazão de carvão pulverizado produzido, obtendo-se a energia consumida na prática. A comparação entre as energias teóricas e práticas indica a eficiência no processo de moagem, que pode resultar em um consumo excessivo de energia no processo, constituindo um ponto de melhoria a ser estudado.

### 6.3 Ajuste de equipamentos, acompanhando as variações no processo

A partir das análises do processo de cominuição, foram realizados ajustes nos equipamentos com o objetivo de melhorar as condições do processo de moagem. Os ajustes consistiram na abertura e fechamento das aletas dos classificadores, visando buscar a granulometria adequada para combustão. Após cada ajuste, foram analisadas as variações que ocorreram na granulometria do carvão e no processo de combustão, conforme a disponibilidade de sistemas de medição.

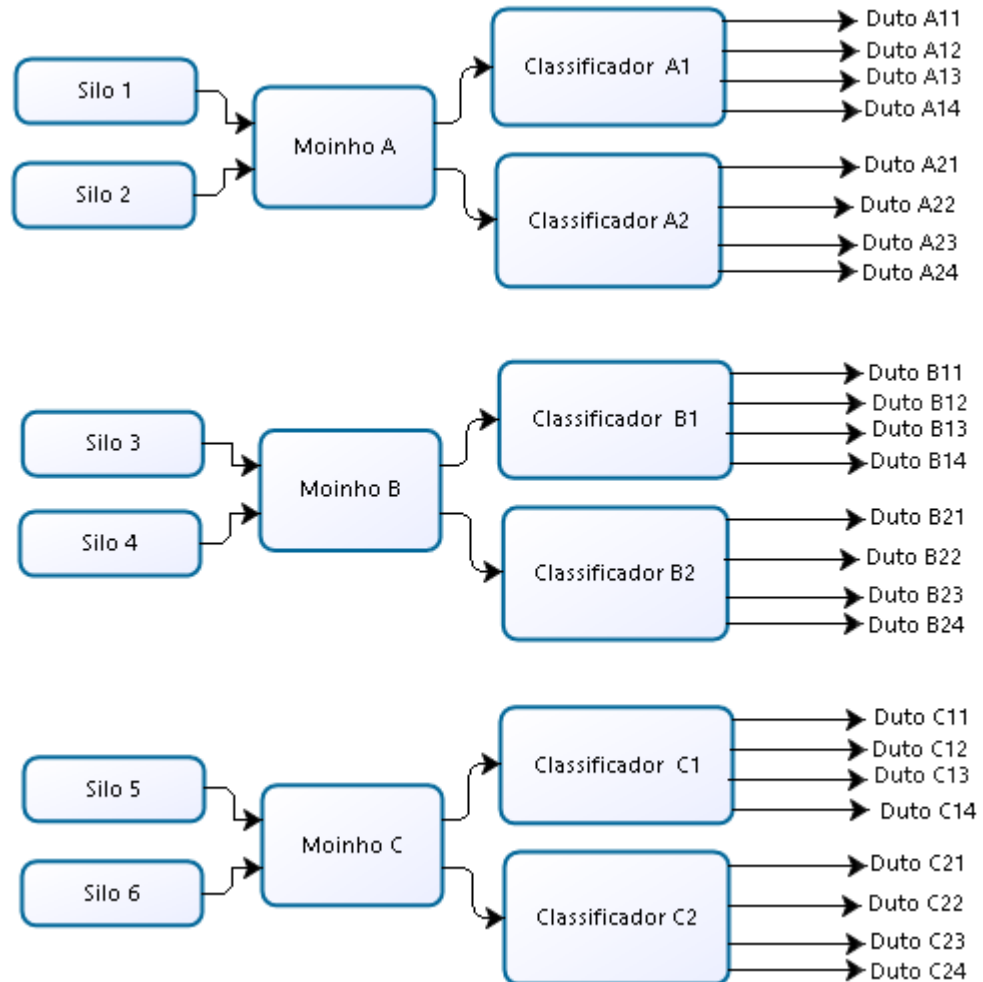
Na usina termelétrica onde estão sendo realizados os estudos, é adotado o sistema de queima direta, ou seja, todo carvão pulverizado produzido pelos moinhos é enviado diretamente para a fornalha. Não há armazenamento de carvão pulverizado. Desta forma, uma variação no fluxo de ar em um dos moinhos interfere na potência elétrica do gerador de forma praticamente instantânea. Devido a esta característica, o controle da geração de energia elétrica é realizado pelo sistema de controle coordenado através da modulação do fluxo de ar nos moinhos. Na Figura 14 estão representados os moinhos, com seus respectivos silos de carvão britado, classificadores e dutos de carvão pulverizado, com a devida identificação.

Cada moinho é alimentado por dois silos, onde está armazenado o carvão britado. Cada silo possui uma mesa alimentadora, que dosa a quantidade correta de carvão para o moinho. A alimentação ocorre pelas duas extremidades.

Também pelas extremidades do moinho ocorre a saída de carvão pulverizado, arrastado pelo fluxo de ar até os classificadores. Nos classificadores ocorre a separação das partículas, onde as grosseiras são rejeitadas e enviadas novamente ao moinho enquanto as partículas finas são transportadas para a fornalha através dos

duto de carvão (sendo quatro dutos em cada classificador, um para cada canto da fornalha).

Figura 14 - Disposição dos Moinhos, com seus silos de alimentação com seus equipamentos auxiliares



Fonte: O Autor.

Em condições normais, a alimentação de carvão no moinho é controlada automaticamente através de um sistema de malha de controle eletrônico, sem a interferência do operador. Quando é requerido um aumento na geração de energia elétrica, o operador realiza a abertura da válvula de controle de ar, para que ocorra o aumento do fluxo de ar no moinho, arrastando uma quantidade maior de carvão para a fornalha. Conseqüentemente ocorre uma redução do nível de carvão no moinho, que é percebida pela malha de controle, que aumenta a vazão de alimentação de carvão no moinho, executando a ação inversa ao ocorrer uma redução no fluxo de ar.

Os classificadores têm a função de impedir que partículas mais grosseiras de carvão sejam enviadas à fornalha. O ajuste do ponto de corte da granulometria destas partículas é realizado em aletas instaladas nos classificadores, conforme apresentado na Figura 8 do item 4.3 Fluxograma do processo da mineração a combustão do carvão.

O fechamento das aletas provoca um aumento das colisões das partículas de carvão contra as aletas, reduzindo sua energia cinética. Desta forma, as partículas mais pesadas apresentam a força de peso maior do que as forças de arraste, fazendo com estas precipitem para o fundo do classificador, onde são encaminhadas novamente para o moinho, formando a carga circulante.

Não há uma posição padrão para as aletas dos classificadores. Em um estudo experimental, Both (2012) identificou que além do ajuste dos classificadores, o fluxo de ar de arraste, a pressão e a temperatura do ar de descarga do moinho também exerciam forte influência sobre a granulometria. Como o fluxo de ar é o responsável por regular a geração de energia elétrica e a temperatura não é controlável, o ajuste dos classificadores é a único ajuste possível de ser realizado para regular a granulometria para combustão.

Desta forma, foram efetuados ajustes nos classificadores, movimentando as alavancas das aletas (apresentadas na Figura 8) nas seguintes posições: 0%, 50%, 75% e 100%, onde 0% corresponde ao ponto com maior restrição na passagem de material e 100% corresponde a aleta totalmente aberta, praticamente sem restrição ao fluxo. O ajuste é manual, afrouxando a porca que trava a alavanca e utilizando um tubo ou similar como extensão para movimentá-la.

Seguindo o ciclo PDCA descrito por Campos (2004), foram realizadas as seguintes etapas:

- a. Planejamento: reuniões com o pessoal responsável pela operação e pelo laboratório químico para planejamento dos ajustes dos classificadores.
- b. Execução: realização dos ajustes no equipamento, aguardando algumas horas até o sistema entrar em equilíbrio.

- c. Verificação: coleta de amostras e verificação da granulometria do carvão e teor de incombustos na cinza.
- d. Atuação corretiva: discussão dos resultados e planejamento de novos ajustes, voltando à primeira etapa.

### 6.3.1 Coleta de amostras

Ao verificar a forma de coleta de amostras de carvão pulverizado percebeu-se que esta não era adequada. O funcionário responsável pela coleta utilizava uma manga de tecido para coletar material, posicionando esta manga na válvula de amostragem, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Operador realizando a coleta de amostras de carvão pulverizado.



Fonte: O Autor.

Considerando os princípios da viscosidade do escoamento, do atrito do ar com as paredes da tubulação e o perfil de velocidades do carvão pulverizado, a abertura da válvula de amostragem provoca a vazão do carvão que está escoando de forma mais próxima da parede do tubo, não compondo uma amostra representativa do material que está passando na tubulação.

Diante desta necessidade, foi projetado e construído um amostrador, apresentado na Figura 16. Basicamente composto por um tubo de aço inoxidável e uma mangueira, disponíveis no estoque da empresa. O tubo foi perfurado em três pontos, com furos oblongos de 30 por 10 mm, para a entrada de carvão. Uma das extremidades foi fechada, para evitar a entrada de material grosseiro no momento da inserção do amostrador no duto. Na outra extremidade foi presa uma mangueira de silicone, que conduz o carvão pulverizado até o recipiente para acondicionamento da amostra.

Este aparelho, de manuseio simples e eficaz, é inserido de forma perpendicular na tubulação de carvão pulverizado, através da válvula de amostragem. Com as aberturas, este amostrador coleta amostras de três pontos ao longo do diâmetro da tubulação, obtendo uma amostra mais condizente com o material enviado à fornalha.

Figura 16 - Amostrador de carvão pulverizado confeccionado para a pesquisa.



Fonte: O Autor.

A coleta das amostras foi executada com o apoio dos operadores da área dos moinhos. De maneira geral, as coletas foram realizadas pela manhã, entre segunda-feira e sexta-feira, sendo realizada a análise laboratorial à tarde.

Cada dia foi coletado aproximadamente 200 gramas de carvão pulverizado de cada um dos 04 dutos de um determinado classificador, apresentado na Figura 14, desde que o classificador estivesse em operação. No momento da coleta, as amostras



foram acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em potes plásticos, conforme mostrado na Figura 17, enquanto aguardavam a análise de granulometria.

Este procedimento foi repetido em cada classificador após a realização de ajustes nas aletas.

### 6.3.2 Análise laboratorial

Para que fosse feita a análise granulométrica, as amostras foram postas em bandejas metálicas, conforme a Figura 17, para serem levadas à estufa, para secagem. Após a secagem, são colocadas 50 gramas da amostra no conjunto de peneiras, composta por quatro peneiras, com aberturas de 30, 50, 100 e 170 mesh Tyler, além de um recipiente do fundo, que coleta o material passante das quatro peneiras.

Este conjunto de peneiras é colocado na plataforma vibratória (Figura 18). A empresa não dispõe de peneira de 200 mesh Tyler, aceitando como material especificado nos manuais de operação o percentual de material passante na peneira de 170 mesh Tyler (0,090 mm).

Figura 17 - Amostras de carvão nos recipientes para serem encaminhados para a estufa



Fonte: O Autor.

Figura 18 - Plataforma vibratória no processo de peneiramento das amostras de carvão.



Fonte: O Autor.

Após o período de peneiramento, as peneiras são retiradas da plataforma vibratória e o material retido em cada peneira, além do recipiente do fundo, é pesado individualmente em uma balança de precisão de 0,01 gramas (conforme mostrado na Figura 19), sendo anotado o valor percentual relativo as 50 gramas em uma planilha específica para este fim, similar a Tabela 3.

Figura 19 - Processo de pesagem das amostras de carvão retidas nas peneiras



Fonte: O Autor.

Tabela 3 - Exemplo de tabela utilizado para anotar o percentual retido da amostra nas peneiras.

Peneira	Abertura ( $\mu$ )	A11 (% retido)	A12 (% retido)	A13 (% retido)	A14 (% retido)
30	590				
50	297				
100	150				
170	90				
Fundo					
Total					
Perda					

Fonte: O Autor.

#### 6.4 Elaboração de um relatório das condições encontradas

As informações obtidas durante este projeto de pesquisa foram registradas em um documento, sendo apresentado para a empresa em forma de Relatório Técnico Operacional.

Este relatório contém os dados de caracterização do carvão, granulometrias de entrada e saída recomendadas pelos fabricantes dos equipamentos, energia teoricamente necessária e energia gasta no processo de cominuição, ajustes de classificadores, além de possíveis fontes de desperdício de energia.

O objetivo é levar as informações ao conhecimento de todos os funcionários envolvidos nos processos de operação e de manutenção dos equipamentos que constituem o sistema de cominuição do complexo termelétrico.

É importante que os funcionários conheçam os equipamentos em que trabalham. Muitas vezes as operações são realizadas baseando-se em conceitos errôneos, sem análises mais aprofundadas, principalmente no ajuste dos classificadores. Pretende-se fornecer um material em que os envolvidos no processo tenham uma base científica para a tomada de decisões.

Caso sejam percebidas necessidades de manutenção nos equipamentos durante este trabalho, estas serão solicitadas com embasamento neste relatório.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 Caracterização do carvão

Estudos realizados por Sabah e Sampaio (1998) informam que o índice de moabilidade de Hardgrove para o carvão de Candiota equivale a 103. Utilizando este valor na Eq. 10, encontra-se um valor de WI de 6,41 kWh/t. O índice de Hardgrove encontrado por Sabah e Sampaio (1998) está de acordo com os resultados de Kalkreuth *et al.* (2005), pois o carvão de Candiota apresenta um teor de cinzas mais elevado que o carvão da Mina do Recreio (52,5% contra 24,5%, respectivamente), devendo assim apresentar também um HGI mais elevado (103 contra 56). Magalhães (2013) realizou estudos experimentais mais recentes, utilizando um britador para determinar o WI de amostras de vários materiais. Para o carvão da mina de Candiota, o WI medido correspondeu a 7,03 kWh/t, um valor próximo ao encontrado por Sabah e Sampaio (1998).

São realizadas análises químicas diariamente no carvão recebido pelo complexo termelétrico. Estas análises são necessárias pois a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exige que todas usinas termelétrica do país informem o poder calorífico de seus combustíveis. Esta informação é necessária para o cálculo da eficiência energética global da usina termelétrica, onde é relacionada energia dos combustíveis consumidos e a energia elétrica entregue nas linhas de transmissão. A eficiência energética apresentada pela CGTEE tem se mantido entre 30% e 35%, visto que a eficiência máxima de uma caldeira pode chegar a 43% (CORÁ, 2006).

Nos meses de março e abril do ano de 2017, foram acompanhadas as análises do carvão. Para realização das análises, foram obedecidas a metodologia e as normas técnicas descritas no item 6.1, sendo as amostras retiradas do equipamento de amostragem duas vezes ao dia.

Os resultados estão nas colunas “Valores encontrados”, na Tabela 4. Na coluna da direita, estão os valores encontrados na pesquisa de Oliveira (2011) para o carvão da mina de Candiota.

Tabela 4 - Valores percentuais da análise imediata no carvão.

	Valores encontrados			Dados de bibliografia
	Média	Menor	Maior	
Umidade Total (%)	14,35	10,16	16,03	7,3
Umidade Higroscópica (%)	1,76	0,76	5,71	-
Cinzas (%)	52,51	50,78	55,03	46,0
Matéria Volátil (%)	22,99	21,87	24,91	20,0
Carbono Fixo (%)	24,39	22,69	25,83	26,7
Enxofre (%)	1,52	1,00	2,87	1,9
Poder Calorífico Superior (cal/g)	3214	3034	3388	2577
Poder Calorífico Inferior (cal/g)	2552	2402	2755	-

Fonte: O Autor.

A umidade higroscópica corresponde a quantidade de água contida nos poros do carvão, após o mesmo ser seco ao ar livre, enquanto a umidade total equivale a umidade higroscópica somada à água absorvida durante o processo de mineração, devido às chuvas ou outras contaminações.

Como descrito por Oliveira (2011) o carvão está disposto em várias camadas, podendo haver diferenças na caracterização do carvão entre uma camada e outra. Devido a isto, podem ocorrer diferenças consideráveis entre as análises.

A coleta das amostras foi realizada na correia transportadora do complexo termelétrico, ou seja, referem-se ao carvão fornecido comercialmente. Com as atuais exigências contratuais de poder calorífico, a empresa mineradora está selecionando melhor as camadas a serem exploradas para comercialização.

Por estes motivos, o carvão analisado neste trabalho apresenta características diferentes dos valores encontrados em 2011.

Anualmente, é realizado um trabalho de coleta de amostras e análise do carvão contido no pátio da CGTEE. Este trabalho é conduzido pela Fundação Luiz Englert, que apresenta os resultados finais à CGTEE em forma de relatório.

A Tabela 5 apresenta os valores médios dos resultados das análises imediatas realizadas nas amostras. O relatório referente ao ano de 2015 não foi fornecido pela CGTEE. Através da tabela, pode-se perceber a variabilidade dos índices ano após ano, principalmente na questão das cinzas e do poder calorífico. Não

é realizado o processo de homogeneização no pátio de carvão, o que aumenta a variabilidade dos resultados.

Tabela 5 - Resultados das análises imediatas do carvão nos últimos anos.

Ano	Umidade Total (%)	Umidade Higroscópica (%)	Cinza (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Enxofre (%)	Poder Calorífico Superior (cal/g)
2008	16,02	2,79	52,08	21,18	23,95	1,18	3280
2009	17,75	2,90	51,45	21,71	23,94	1,02	3195
2010	16,70	1,66	58,98	18,77	22,25	1,16	2317
2011	15,00	3,36	56,81	21,11	22,08	1,34	2413
2012	16,09	3,17	52,13	22,99	24,88	3,75	3099
2013	16,15	2,27	56,08	21,66	22,26	1,07	2448
2014	17,10	2,68	50,86	23,12	26,02	1,06	3147
2016	15,84	3,38	52,55	20,99	26,46	0,97	2650
Média	16,33	2,78	53,87	21,44	23,98	1,44	2818
Desvio Padrão	0,84	0,58	2,99	1,36	1,72	0,94	400

Fonte: O Autor.

## 7.2 Equipamentos do processo de cominuição

O processo de cominuição é basicamente dividido em duas etapas: britagem e moagem. Na primeira, o carvão extraído da mina é transportado por caminhões até os britadores da CRM. Após esta primeira etapa, o carvão é transferido para o complexo termelétrico através de correias transportadoras. No complexo termelétrico, o carvão passa por um conjunto de peneira e britador, sendo reduzido à granulometria de entrada nos moinhos e enviado para os silos de carvão britado.

Na segunda etapa, o carvão britado contido nos silos é alimentado nos moinhos, onde é processado até atingir a granulometria aceita para combustão.

### 7.2.1 Britagem

A empresa mineradora possui dois britadores de mandíbulas, sendo um de um rolo e outro de duplo rolo dentado, que processam o carvão proveniente da mina até atingir a granulometria de 120 mm, exigida pelo acordo comercial entre as empresas. Na entrada dos britadores, os blocos apresentam dimensões variadas, pois as detonações na mina não garantem uma uniformidade nas fraturas da rocha.

Na saída dos britadores, os blocos apresentam um diâmetro médio de 120 mm, sendo descarregado em correias transportadoras que levam o carvão até o estoque do complexo termelétrico.

No complexo termelétrico, correias transportadoras levam o carvão até as peneiras rotativas, apresentadas na Figura 5. Estão instaladas duas peneiras, com capacidade de 500 t/h (toneladas por hora) cada uma. Em condições normais, enquanto uma peneira opera, a outra permanece em modo reserva ou em manutenção, caso necessário.

As peneiras têm ponto de corte de 30 mm. Blocos maiores desta medida são encaminhados ao britador, enquanto os blocos menores são desviados para a correia transportadora após o britador.

Os britadores instalados são do tipo martelo, com capacidade de 400 t/h. Conforme Chaves e Peres (2009), este equipamento pertence à família dos britadores de impacto, recomendados para britagem terciária e quaternária. O material britado apresenta formas cúbicas e grande quantidade de finos. Não é recomendada a aplicação deste tipo de britador para materiais duros ou abrasivos.

Podem ser admitidos blocos de até 300 mm, enquanto a descarga tem granulometria máxima de 30 mm, apresentando uma relação de redução de 10:1.

O acionamento dos britadores é realizado por motores elétricos de alta tensão (6000 V) com potência nominal de 220 kW.

Os equipamentos de britagem são mais simples que os moinhos. Não necessitam de ajustes, apenas manutenções preventivas periódicas e manutenções emergências. As ocorrências mais frequentes são de empastamento. A maior incidência deste problema ocorre nos períodos chuvosos, pois a mina é a céu aberto.

Desta forma, quando o carvão fornecido apresenta umidade elevada (acima de 17%), ocorre a aderência nos equipamentos e a obstrução da passagem de material.

### 7.2.2 Moagem

O circuito de moagem é composto por três moinhos, instalados paralelamente, operando a seco e em um sistema fechado. Como corpos moedores, são utilizadas esferas de ferro fundido de 50 mm.

Cada moinho tem duas entradas e duas saídas, por suas laterais, conforme a Figura 20. Cada moinho tem como capacidade de projeto a produção de 90 t/h de carvão pulverizado, considerando as condições de umidade do carvão igual a 8%, HGI equivalente a 50 e percentual de 75% do material passante na peneira de 200 mesh.

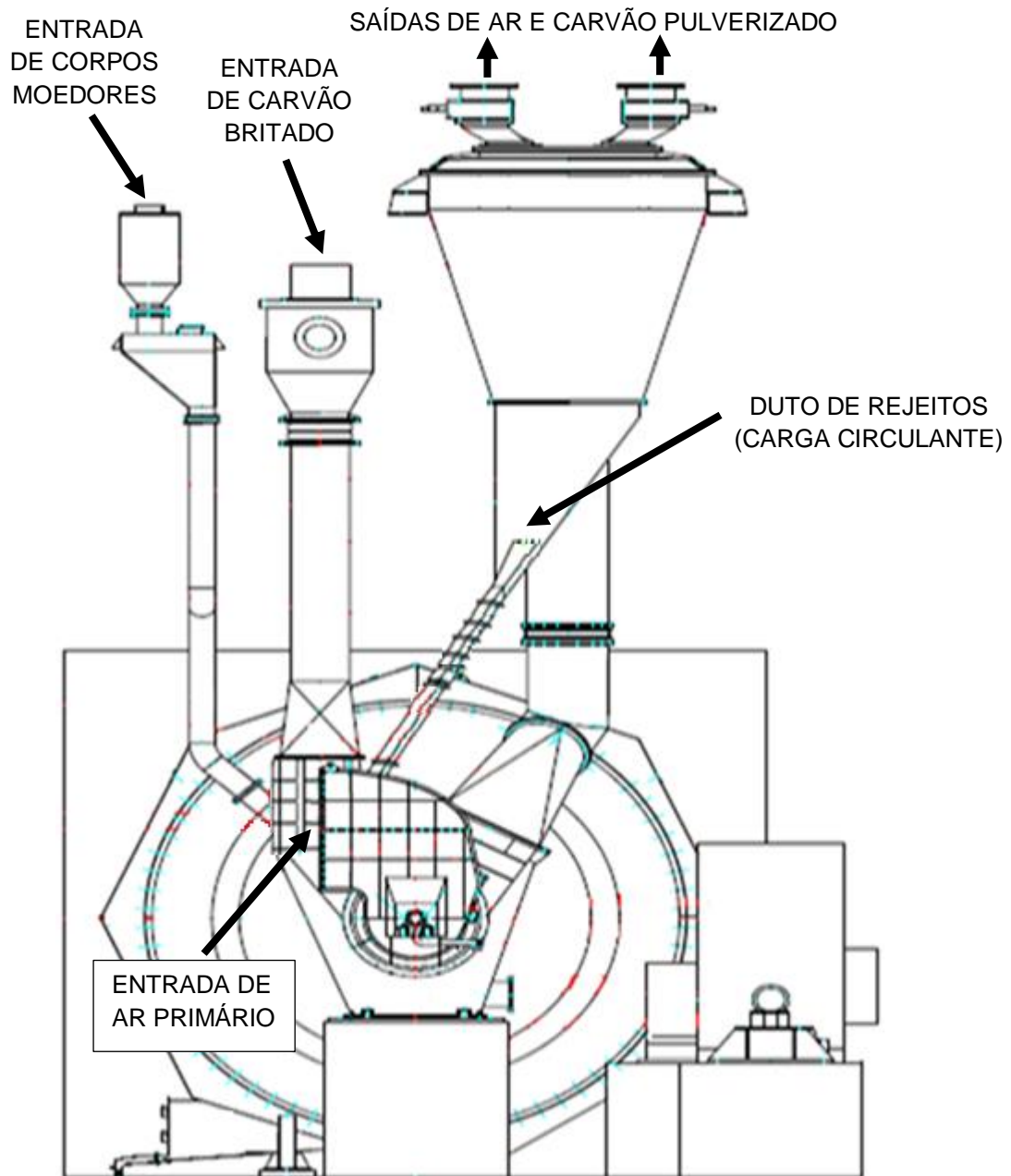
Conforme as especificações do fabricante, a alimentação de carvão deve ser feita por pequenos blocos de carvão, de aproximadamente 30 mm. Considerando a granulometria de saída equivalente a 0,074 mm (200 mesh), a relação de redução do equipamento é de aproximadamente 400:1.

O tambor do moinho apresenta comprimento interno de 6,14 metros e diâmetro de 4,65 metros. A razão entre comprimento e diâmetro equivale a 1,32. Conforme Chaves e Peres (2009), para esta relação é recomendado o uso de corpos moedores de diâmetro máximo de 50 mm, estando o projeto de acordo com a teoria.

A partir do diâmetro interno do moinho e utilizando a Eq. 09, tem-se que a velocidade crítica para este equipamento é de 19,6 RPM. O sistema de acionamento é composto por um motor elétrico e uma caixa redutora de velocidade, fazem com que o moinho trabalhe em 15,3 RPM. Este valor equivale a 78% da velocidade crítica. Luz *et al.* (2010) cita que a faixa mais recomendada para o moinho seria a operação entre 66% e 69% da velocidade crítica, sendo esta faixa usualmente estendida para valores entre 65% e 80%. A escolha de uma rotação de operação mais elevada facilita o movimento de cascadeamento dos corpos moedores.



Figura 20 - Desenho da vista lateral do moinho de carvão, indicando suas entradas e saídas de carvão, ar e corpos moedores.



Fonte: CGTEE (2010).

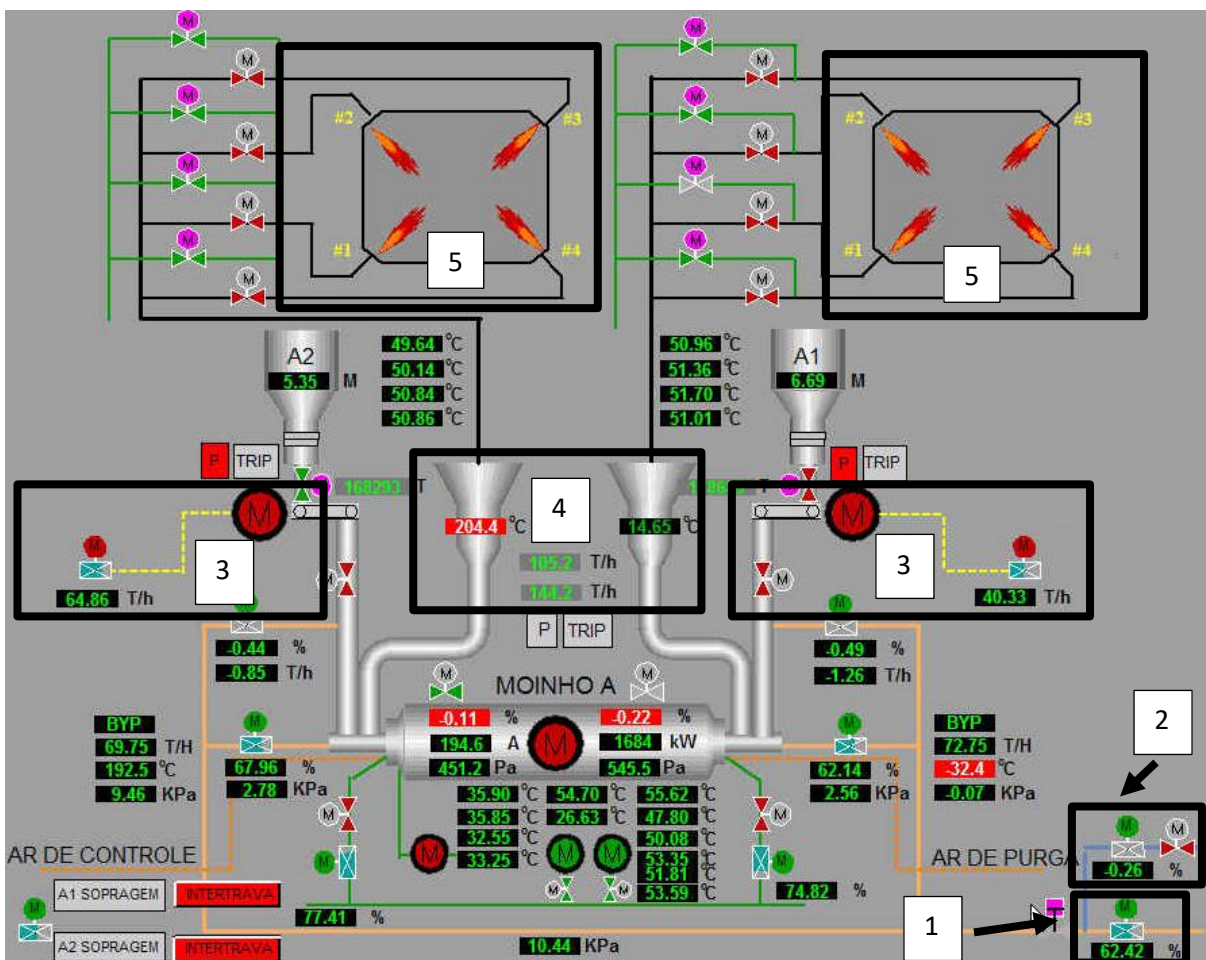
A Figura 21 mostra a tela de supervisão e operação de um dos moinhos. Além das indicações de temperatura, pressão e vazão de ar de alimentação e carvão pulverizado, nela estão numerados os seguintes itens:

1. Válvula de controle de fluxo de ar quente;
2. Válvula de controle de fluxo de ar frio;
3. Mesas alimentadoras de carvão, com a respectiva vazão instantânea;

4. Classificadores de carvão;
5. Indicadores de chama nos queimadores.

A vazão de saída de carvão do moinho é controlada pela válvula número 1 no detalhe da Figura 21. A reposição de carvão é controlada automaticamente por um sistema de malha de controle. Quando ocorre o aumento do arraste do carvão, a pressão diferencial entre as partes superior e inferior do moinho diminui e o sistema de controle aumenta a frequência dos inversores das mesas alimentadoras, aumentando o abastecimento carvão. No momento da captura da tela da Figura 21 a vazão de carvão na mesa alimentadora A2 estava em 64,86 t/h e na mesa A1 em 40,33 t/h (representadas pelo número 3). A vazão de ar era no moinho de 144,2 t/h.

Figura 21 - Tela de supervisão operacional de um moinho de carvão.



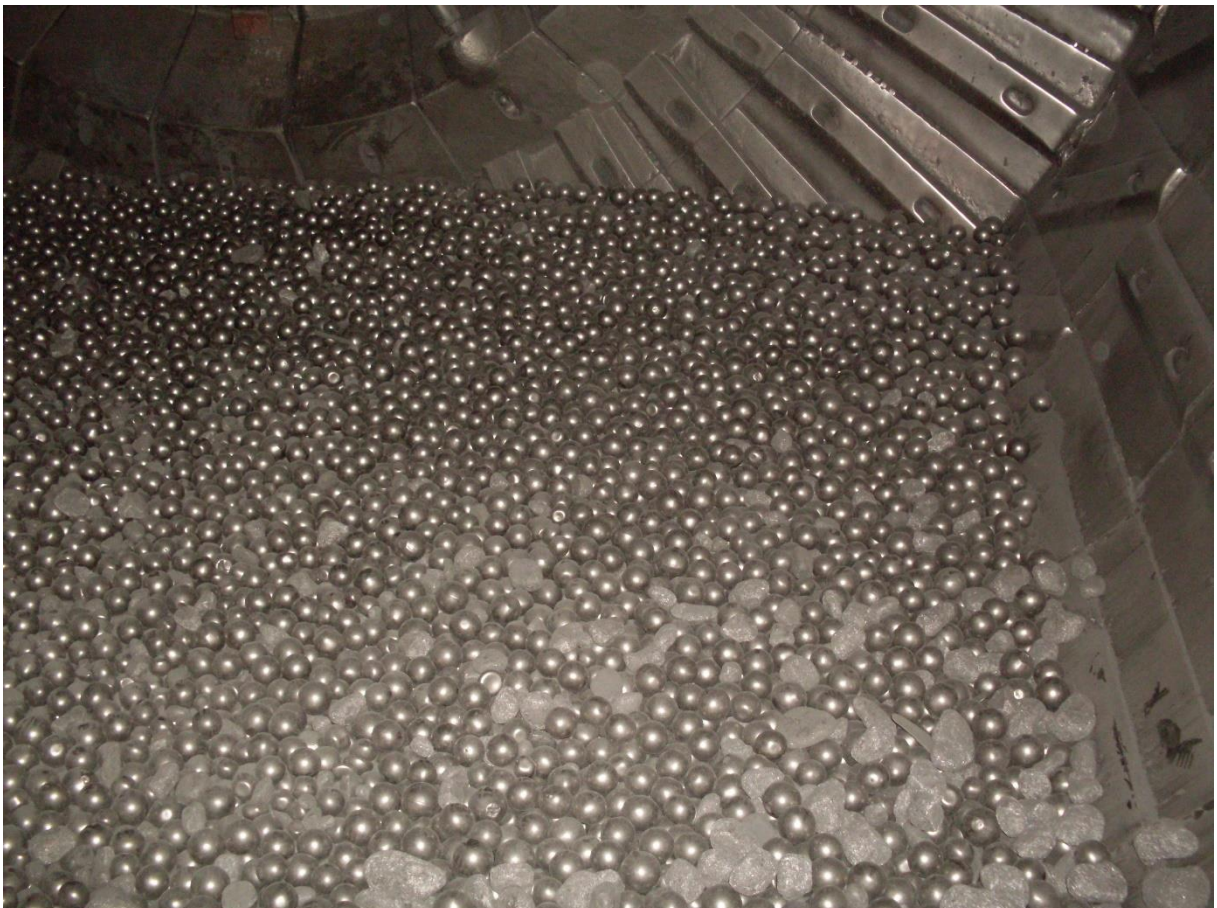
Fonte: CGTEE (2010).

A carga de corpos moedores recomendada pelo fabricante é de 106 toneladas de esferas de ferro fundido nodular. No momento do comissionamento do moinho, a

carga de corpos moedores a ser abastecida deve ser dividida três partes iguais, ou seja, 35,3 toneladas de esferas de cada um dos seguintes diâmetros: 50 mm, 40 mm e 30 mm. Para a reposição, podem ser utilizadas apenas esferas de 50 mm, pois normalmente as esferas vão perdendo material e tendo seu diâmetro reduzido durante a operação do moinho.

A Figura 22 apresenta uma fotografia interna de um moinho, mostrando os corpos moedores e as placas de revestimento internas (blindagens), que tem a função de promover o levantamento de corpos moedores para facilitar o movimento de cascadeamento. Também podem ser vistos blocos de materiais de rocha que não foram moídos, inclusive com diâmetro maior do que os corpos moedores.

Figura 22 - Parte interna de um moinho, mostrando os corpos moedores, blindagens do moinho e blocos que não foram moídos



Fonte: O Autor.

A Figura 23 mostra a polpa retirada de um dos moinhos, em um processo de limpeza. Pode-se perceber as principais falhas que ocorrem nos corpos moedores são a erosão devido ao poder abrasivo do carvão, causando a diminuição do seu diâmetro,

e o lascamento, que ocorre nos corpos de menor resistência ao impacto e o deixam deformado.

Também é possível visualizar algumas pedras calcárias, de granulometria maior. Estas pedras provêm de camadas intermediárias da mina (entre as camadas de carvão) e chegam ao moinho juntamente com o carvão, pois não há um processo de separação ou classificação durante a mineração. A presença destas pedras não é desejável, pois além de não auxiliarem na cominuição do carvão, ocupam espaço no interior do moinho e aceleram o desgaste dos corpos moedores.

Figura 23 - Polpa retirada do moinho, com carvão, corpos moedores e pedras calcárias que não foram moídas



Fonte: O Autor.

Na saída dos moinhos estão instalados os aéro separadores, também chamados de classificadores. Seu funcionamento, descrito nos itens 4.3 Fluxograma do processo da mineração a combustão do carvão e 5.4 Cominuição de Carvão, objetiva reter partículas mais grosseiras, permitindo o envio para a fornalha das partículas mais finas.

Nos classificadores não há monitoramento das variáveis. Os ajustes são realizados através de alavancas que movimentam as aletas (Figura 8), reduzindo a

energia cinética das partículas de carvão e provocando a precipitação das partículas grosseiras. Não há medição do percentual de partículas que são retidas nos classificadores, o que é chamado de carga circulante.

Nos moinhos instalados na usina, não há como mensurar o volume da carga circulante, tão pouco coletar amostras para análises. A análise de granulometria da carga circulante traria mais informações para servir como base no planejamento dos ajustes das aletas dos classificadores.

### 7.3 Eficiência do processo

Para o acionamento do moinho, é utilizada a potência de um motor elétrico trifásico de alta tensão (6kV). A medição da potência elétrica instantânea é indicada para o operador na tela de supervisão. Para realização dos cálculos, serão utilizados os dados da tela capturada e apresentada na Figura 21.

Conforme as equações desenvolvidas por Bond, apresentadas por Luz *et al.* (2010) e descritas no item 5 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FRAGMENTAÇÃO, podemos realizar um cálculo teórico da energia necessária para a moagem do carvão.

Inserindo na Eq. 07 os valores de granulometria determinados pelo fabricante do moinho ( $F_{80} = 30000 \mu\text{m}$  e  $P_{80} = 74 \mu\text{m}$ ) e o valor de WI encontrado por Magalhães (2013), igual a 7,03 kWh/t, tem-se que a energia específica necessária para a moagem do carvão, teoricamente, seria de 7,77 kWh/t.

Conforme os dados apresentados na Figura 21, estavam sendo processadas 105,2 t/h de carvão, enquanto a potência elétrica do motor era de 1684 kW. Realizando a divisão da potência pela vazão de carvão, tem-se o valor de 16,0 kWh/t, ou seja, são necessários 16 kWh para converter uma tonelada de carvão bruto (britado) em carvão pulverizado, apto à combustão.

Este valor é 106% superior ao gasto energético teórico. Tanto Luz *et al.* (2010) como Chaves e Peres (2009) explicam que os modelos desenvolvidos por Bond, Rittinger e Kick são aproximados, podendo apresentar variações expressivas. Mesmo assim, a diferença está elevada.

Possíveis causas para este alto consumo energético nos moinhos podem ser explicadas por diversos fatores, como:

- a) Granulometria dos blocos de alimentação de carvão nos moinhos acima do valor de projeto (conforme mostrado na Figura 24). Possivelmente pode haver algum desgaste nos britadores ou peneiras, o que está permitindo a passagem de blocos maiores para o circuito de moagem;
- b) Impurezas nas aletas dos classificadores, como apresentado na Figura 25, provocando um aumento na carga circulante e conseqüentemente a moagem excessiva do material;
- c) Desgaste nas blindagens internas dos moinhos, o que pode estar reduzindo o efeito de cascadeamento dos corpos moedores;
- d) Excesso de dissipação de energia em forma de calor nos mancais e acoplamentos do equipamento.
- e) Sub dimensionamento do moinho, visto que na Figura 21 o fluxo de carvão era de 105 t/h de carvão, enquanto a especificação do equipamento é de 90 t/h.

Figura 24 - Blocos de carvão com tamanho acima da especificação de alimentação do moinho.



Fonte: O Autor.

Figura 25 - Impurezas nas aletas do classificador (à esquerda), comparado com um classificador limpo (à direita).



Fonte: O Autor.

O aumento da eficiência poderia ser obtido utilizando beneficiamento do carvão através do processo de jigagem, amplamente estudado por Sampaio (1983) e por demais pesquisadores por ele orientados. A jigagem do carvão permite reduzir sensivelmente seu teor de cinza e enxofre, o que permite reduzir a vazão mássica de carvão para os moinhos mantendo a mesma capacidade de geração de energia elétrica.

Conforme Morita (2009) e Herrera Camacho (2008), a utilização de caldeiras de leito fluidizado é outra alternativa que traz ganhos de eficiência energética, visto que a combustão ocorre com partículas de carvão de até 06 mm, não necessitando a utilização de moinhos no processo.

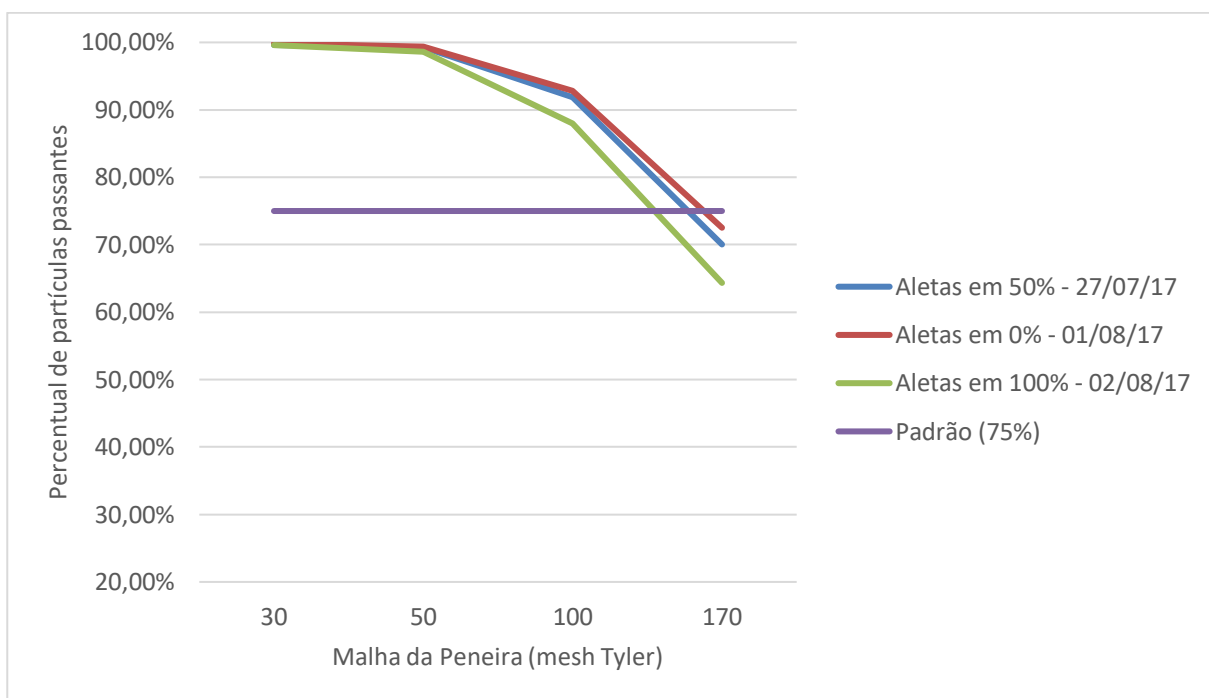
#### 7.4 Ajustes no processo

Nos britadores instalados, não há opção de ajustes. A configuração do equipamento tem apenas a opção “ligado” ou “desligado”. A granulometria de saída é fixa e depende das condições de desgaste e manutenção do equipamento.

Nos moinhos, o único equipamento que permite ajustes sem interferir diretamente na geração de energia elétrica é o classificador de carvão pulverizado. Ao mesmo tempo, este equipamento é o que menos possui instrumentos de medição (vazão, pressão, carga circulante, perda de carga), dificultando a compreensão de sua operação. Nestes equipamentos foram realizados vários testes, seguindo a sequência de planejamento, ajuste nos classificadores e acompanhamento da granulometria e nas condições da fornalha.

Na sequência, são mostrados os gráficos construídos a partir das tabelas obtidas durante as pesagens das amostras. O gráfico da Figura 26 representa o valor médio de granulometria do carvão no classificador B1. Cada linha representa uma configuração de ajuste das aletas, além da linha considerada como padrão. A linha padrão corresponde a uma distribuição granulométrica tal que 75% das partículas sejam passantes na peneira de 200 mesh Tyler, conforme indicado por Garcia (2002). Como a peneira mais restritiva disponível na empresa corresponde a 170 mesh Tyler, esta foi aceita em substituição à peneira de 200 mesh Tyler.

Figura 26 - Gráfico da granulometria média após cada ajuste no classificador B1.

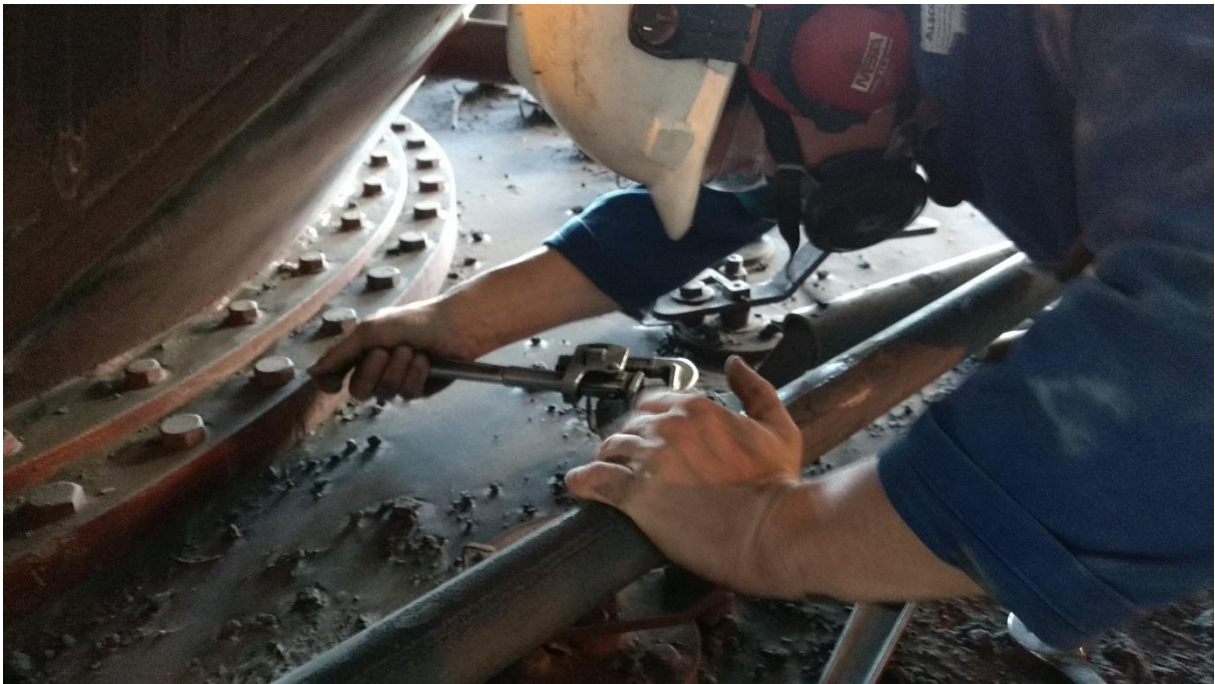


Fonte: O Autor.

O classificador B1 estava, inicialmente, com uma abertura de 50% nas aletas do classificador. Foi realizada uma coleta de amostra de carvão e analisada sua granulometria. O material retido no fundo das peneiras (passante em 170 mesh Tyler) foi equivalente a 70% do material.



Figura 27 - Movimentação das alavancas para ajuste das aletas dos classificadores.



Fonte: O Autor.

A fim de buscar o percentual de 75% passante em 170 mesh, peneira mais restritiva disponível, foi realizado o fechamento das aletas dos classificadores até a posição 0%, correspondente à maior restrição, conforme mostrado na Figura 27. O resultado foi a elevação para 72,5% de material passante em 170 mesh. Percebeu-se que mesmo com o classificador todo fechado, não foi possível atingir o percentual exigido pelos manuais. Também houve uma dificuldade em manter a geração de energia elétrica com este ajuste, pois mesmo com a máxima vazão de ar primário para arrastar o carvão, a restrição imposta pelo classificador impôs uma limitação no fluxo de carvão para a fornalha.

Devido a esta restrição na geração, foi necessária a abertura das aletas, para atingir a meta de geração de energia elétrica. Foi realizada a abertura total das aletas, para verificar em qual seria a distribuição granulométrica nesta condição. Foi verificado que o percentual passante na última peneira foi de 64,3%, um valor próximo à posição anterior das aletas. Instantaneamente houve um acréscimo na geração de energia elétrica, mostrado pela variação no gráfico da Figura 28, entre 10h00min e 12h00min. A queda de geração no período anterior às 10h00min ocorreu devido a um consumo interno de vapor, questão normalizada antes do período destacado.

Figura 28 - Gráfico da oscilação de potência do gerador de energia elétrica.



Fonte: O Autor.

No dia seguinte, foi efetuada a abertura de um depósito de cinza leve. Foi verificado que a cinza estava apresentando uma coloração mais escurecida, conforme mostrado na Figura 29, aparentando conter um elevado teor de carvão incombusto. Foi realizada um tratamento térmico em forno mufla, constatando que a cinza continha 11% de incombustos, enquanto o valor normal varia entre 0,5% e 2,0%. Este fenômeno ocorreu devido às partículas de carvão apresentarem um volume elevado, tendo dificuldades em concluir a reação de combustão na fornalha. Desta forma, as partículas são arrastadas para fora da caldeira sem liberar totalmente seu poder calorífico. Desta forma, foi mantido o ajuste intermediário das aletas, em 50%.

Figura 29 - Ponto de coleta de cinza leve proveniente da fornalha, indicando cinzas com coloração escura, com alto teor de carvão incombusto.



Fonte: O Autor.

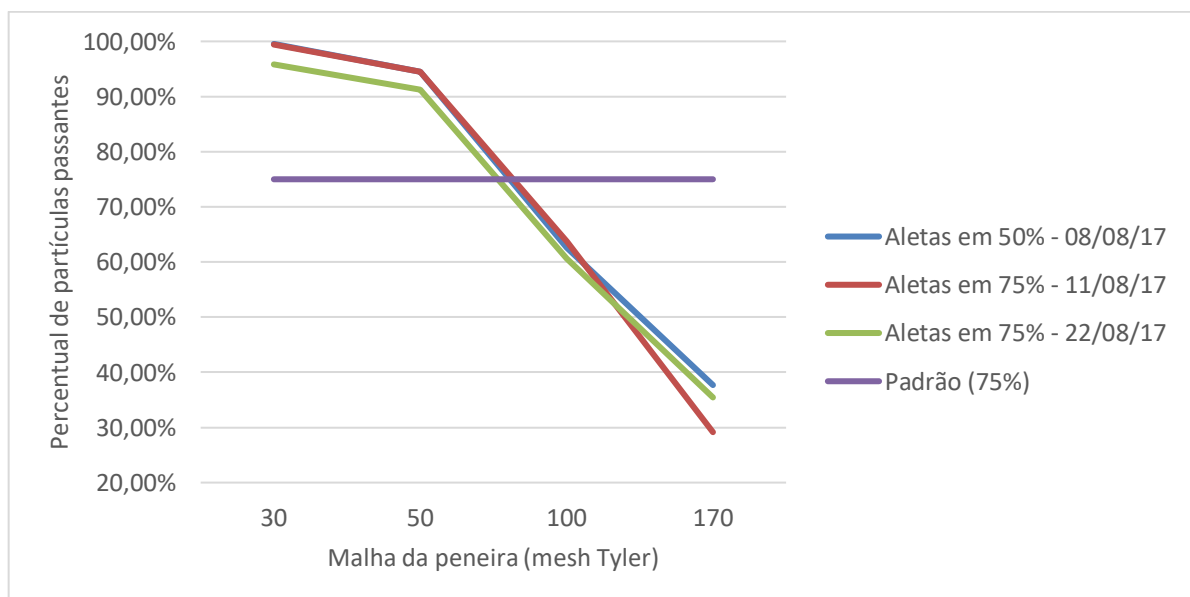
Também foram realizados trabalhos no classificador A2, conforme o gráfico da Figura 30.

Na análise inicial, o classificador A2 apresentou uma distribuição granulométrica mais grosseira que o classificador B1 com o mesmo percentual de abertura das aletas. Neste caso, o valor médio foi igual a 37% do material passante em 170 mesh Tyler. Neste caso o ideal seria realizar o fechamento das aletas, para diminuir a granulometria do carvão. Porém, como o fechamento das aletas ocasionaria uma redução na geração de energia elétrica, foi solicitado pela supervisão da operação realizar a abertura das aletas.

Desta forma, as aletas foram ajustadas em 75%. Após algumas horas de operação, foi realizada uma análise granulométrica, que resultou em uma pequena variação, reduzindo o percentual passante em 170 mesh Tyler para 29,1%. Houve um aumento na geração de energia elétrica, juntamente com aumento de volume de cinza pesada e do teor de incombustos na cinza, que subiu de 2% para 5%.

Após 11 dias foi realizada uma nova análise granulométrica, sem que fosse realizada qualquer modificação no equipamento. O resultado foi mais próximo do ajuste inicial, apresentando um percentual passante em 170 mesh de 35,4%.

Figura 30 - Gráfico da granulometria média após cada ajuste no classificador A2.



Fonte: O Autor.

A variação de granulometria ocorrida entre a os dias 11 e 22 de agosto, onde as aletas do classificador permaneceram na mesma posição, pode ser explicada pelos

resultados descritos por Both (2012), que percebeu que a vazão, a pressão e a temperatura do ar de arraste influenciam na granulometria do carvão. Também pode ser justificada a diferença de ajustes entre um moinho e outro, onde as vazões de ar e carvão são diferentes.

Considerando que o controle da geração de energia elétrica é realizado variando a vazão de ar nos moinhos, e que esta vazão exerce influência na granulometria do carvão, seria necessário um ajuste nos classificadores a cada variação de carga, o que é inviável. Desta forma não há como definir um procedimento padrão para o ajuste dos classificadores. Este ajuste deverá ser realizado baseando-se em análises de carvão incombusto nas cinzas e na capacidade de moagem de cada moinho.

#### 7.5 Relato das informações encontradas

Com os resultados encontrados foi elaborado um Relatório Técnico Operacional (RTO), informando a empresa sobre as condições de operação dos britadores e moinhos e influência dos ajustes dos classificadores sobre a operação da caldeira. O registro em documento oficial é importante para que todas as pessoas envolvidas no processo tenham conhecimento das informações encontradas.

Figura 31 - Cabeçalho do RTO elaborado baseado neste trabalho.

		RELATÓRIO TÉCNICO OPERACIONAL DIVISÃO DE OPERAÇÃO - DOOP	
Sigla/Nº	Data Emissão	Tema	Nº Folhas
RTO DOOP 009 2017	20/10/2017	02 – Engenharia de Operação	1/4
<b>Análise do Processo de Cominuição do Carvão</b>			

Fonte: O Autor.

Relatou-se que os moinhos estão operando sobrecarregados, com vazão de carvão acima do especificado nos manuais do fabricante. Mesmo com a granulometria acima do especificado, a produção de carvão é insuficiente para manter a geração de energia elétrica nos patamares de projeto. Esta condição remete à perda de eficiência

global no conjunto de caldeira e ciclo térmico, o que vem exigindo maior quantidade de combustível para uma mesma geração elétrica.

Um indicador da sobrecarga nos moinhos é a vazão de carvão no momento da captura da tela apresentada na Figura 21, onde o fluxo de carvão (105 t/h) é maior que a capacidade projetada para o moinho, de 90 t/h.

Também foi citado que as blindagens internas do corpo do moinho exercem influência no movimento de cascadeamento dos corpos moedores. Devido ao desgaste natural das blindagens, a moagem fica comprometida, o que exige a substituição destas blindagens. A baixa eficiência dos moinhos pode estar relacionada a esta condição.

## 8 CONCLUSÕES

O carvão da mina de Candiota encontra-se disposto em várias camadas. Cada camada remete a uma etapa do processo de formação, apresentando suas características próprias. Devido a esta condição, podem ocorrer diferenças nas análises de caracterização do carvão. A homogeneização do pátio de carvão seria uma alternativa para minimizar estas diferenças.

Análises dos dados históricos mostraram que o carvão fornecido pela CRM à CGTEE apresenta características variáveis com o passar do tempo, principalmente quanto ao poder calorífico superior (que variou entre 2317 e 3280 cal/g) e quanto ao teor de cinzas, que variou entre 50,86% e 58,98% nas análises dos últimos nove anos. Estas mudanças interferem na condição operacional da usina, pois uma redução do poder calorífico do carvão invariavelmente resulta em uma geração de energia elétrica menor, para uma mesma vazão de combustível.

De modo geral, o carvão da mina de Candiota apresenta elevado teor de cinzas, resultando em um Índice de Moabilidade de Hardgrove (HGI) equivalente a 103, um valor elevado se comparado a outros carvões brasileiros, como o carvão da Mina do Recreio (Minas do Leão, RS) que apresenta valor médio de 56. Este índice significa que o carvão apresenta uma moabilidade melhor, apesar de ser caracterizado como de qualidade inferior a muito inferior. Neste estudo de caso, o

carvão apresenta um *work index* (WI) entre 6,40 e 7,03 kWh/t, de acordo com cálculos baseados em estudos realizados por Bond e outros pesquisadores da área.

Para a combustão, o carvão passa pelos processos de britagem e moagem. Após a britagem primária e secundária, realizada pela empresa de mineração, o carvão é constituído de blocos de granulometria de 120 mm. Após o envio para o complexo termelétrico, é realizada uma última britagem, reduzindo os blocos até o tamanho máximo de 30 mm. Os problemas mais frequentes ocorrem quando é fornecido carvão com elevada umidade natural, em teores acima de 17%, causando empastamento nos dutos de transferência e na parte interna do britador.

Na moagem, são utilizados moinhos de bolas, operando a seco e em regime fechado. Embora as recomendações sejam para que o processo de moagem ocorra a úmido, o fato do carvão ser utilizado para combustão não permite esta opção, pois seria necessária uma operação de secagem, o que demandaria um consumo extra de energia. O regime fechado de operação permite um controle melhor da granulometria de saída, no qual é exigido que 75% do carvão seja passante na peneira de 200 mesh Tyler, ou seja, apresente diâmetro menor que 0,074 mm. Os moinhos dispostos no complexo termelétrico trabalham em uma rotação relativamente elevada (78% da velocidade crítica), o que denota que o movimento de cascadeamento de corpos moedores é o principal responsável pelo processo de cominuição no moinho. Os corpos moedores sofrem desgaste natural, necessitando reposição periódica. Os maiores causadores de desgaste são a erosão (devido ao atrito do carvão nas camadas superficiais) e o lascamento, que ocorre nos corpos moedores de menor dureza ao receberem o impacto causado pelo efeito de cascadeamento. Com o objetivo de minimizar estes problemas, são utilizados corpos moedores específicos para estes moinhos, com composição química e dureza controlados.

O consumo de energia é elevado, sendo superior ao dobro (106%) do valor calculado pelos princípios de Bond. Enquanto os cálculos previam um consumo de 7,77 kWh por tonelada de carvão processado, o moinho está consumindo 16,0 kWh. As causas para este consumo energético podem estar relacionadas a alguns fatores, como rotação de trabalho elevada, subdimensionamento, má utilização ou desgaste dos moinhos, sendo que estes problemas estão relatados na empresa através de um relatório técnico operacional.

Os estudos de ajustes nos aéro separadores ou classificadores indicaram que a variação de granulometria do carvão pulverizado não é proporcional ao percentual de abertura das aletas dos classificadores. Há uma relação entre o ajuste das aletas e granulometria do carvão na saída do moinho, porém esta relação sofre influência de outros fatores, entre eles o fluxo de ar de arraste do carvão, o que explica a diferença de granulometria das amostras de um mesmo classificador, coletadas com alguns dias de diferença.

Com a abertura das aletas e o conseqüente aumento da granulometria do carvão, houve um aumento da geração de energia elétrica, porém com um aproveitamento menor de seu poder calorífico, identificado pelo aumento do teor de carvão incombusto nas cinzas.

Por fim, sugere-se que o ajuste das aletas dos classificadores seja realizado baseando-se nas condições instantâneas de operação, buscando um teor reduzido de incombustos nas cinzas sem que a geração de energia sofra restrições.

As informações obtidas através de pesquisas e de testes foram relatadas em um Relatório Técnico Operacional, um documento interno da empresa, para que o conhecimento seja disseminado a todos colaboradores envolvidos no processo de operação e de manutenção dos equipamentos.

## 9 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 11376**. Moinho de bolas - Determinação do Índice de Trabalho. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT. **NBR 8292**. Preparação de Amostra de Carvão Mineral para Análise e Ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. **NBR 8289**. Determinação do teor de cinza. Rio de Janeiro, 1983.

ALVES, Vladimir Kronemberger; MAZZINGHY, Douglas Batista; ROSA, Marco Antônio Nankran; MENDONÇA, Anderson Miranda; de RENNO MACHADO, Luis Clauzio, de; OLIVEIRA, Geovan Olavo Damasio; de SOUZA, Marlon Gonçalves. **Aplicação de Método Simplificado de Determinação de WI na Previsão de Desempenho dos Moinhos de Bolas da Usina do Sossego**. São Paulo: Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013.

ASTM **D7582-15**, Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM **D4239-17**, Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM **D5865-13**, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM **D409 / D409M-16**, Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BOTH, Jéferson Luís. **Análise da Eficiência dos Moinhos de Carvão da UNIB-RS**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – 2012.

CFQ. Conselho Federal de Química. Resolução Normativa Nº 254, de 13/12/2013. Brasília, 2013.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC: Controle da Qualidade Total (No estilo japonês)** - 8ª Edição – Nova Lima - MG: INDG Tecnologia e Serviços – 2004.

CARVALHO, Marly de Ávila. **Avaliação da disposição de moinhos em circuitos de moagem de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – 2015.

CORÁ, Rogério. **Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em Caldeiras**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – 2006.

CGTEE. Manuais de Operação. Candiota – 2010.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo Clark. **Teoria e pratica do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem/** 4.ed. rev. e ampl. São Paulo : Signus, 2009. v.3.

CREMASCO, Marco Aurelio, **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos** / São Paulo, SP : Blucher, 2012. 423 p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2017.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial**. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GAUTO, Marcelo Antunes; ROSA, Gilber Ricardo. **Processos e operações unitárias da indústria química** / Rio de Janeiro, RJ: Ciência Moderna, 2011. 417 p.



HERRERA CAMACHO, Lyda Margarita. **Estudo experimental da transferência de calor suspensão gás/sólido: parede em leito fluidizado circulante**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

KALKREUTH, W., BORREGO, A.G., ALVAREZ, D., MENENDEZ, R., OSÓRIO E., RIBAS, M., VILELA, A., CARDOZO ALVES, T. **Exploring the possibilities of using Brazilian subbituminous coals for blast furnace pulverized fuel injection**. Fuel, v. 84, n. 6, p. 763-772, 2005.

LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. (Coord.) **Geração Termelétrica**. Rio de Janeiro: Editora Interciência., 2004. 1296 p.

LUNKES, Maiquel Kochhan. **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**. – Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios – 5ª Edição**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAGALHÃES, Fernando Neves de. **Método Simplificado da Avaliação da Britabilidade**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

MASSARANI, Giulio. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2ª Edição. E-Papers Serviços Editoriais. Rio de Janeiro, 2002.

MORITA, Eugênio de Souza. **Estudo Experimental das Emissões de NOx na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

OLIVEIRA; Joseane Souza de. **Análise Estratigráfica, petrologia e química orgânica aplicada nas camadas superiores, inferiores e Banco Louco na região de Candiota, Bacia do Paraná, RS, Brasil**. / Joseane Souza de Oliveira. – Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2011.

REINALDO, Rafaela Frota. **Estudo Numérico da Transferência de Calor e Deposição de Cinzas em Caldeiras com Queima de Carvão Pulverizado**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – 2004.

RIBEIRO, Guilherme Luís Mello. **Otimização do planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões em minas a céu aberto**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Pampa. Bagé – 2014.

ROCHA, A. P. **Desempenho de Filtro Biológico na Depuração e Desodorização de Emissões de Sulfeto de Hidrogênio**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo – 2007.

ROSA, Cesar Renato Alves. **Desempenho de Classificadores Dinâmicos de Partículas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – 2001.

SABAH, Eyüp; SAMPAIO, Carlos Hoffmann. **Untersuchungen zur Aufbereitarbeit der aus feinst verwachsenen Tonminerale enthaltenden Kohle durch die Zyklonklassierung**. 1998.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann **Caracterização para o beneficiamento do carvão de Candiota**. Monografia (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1983.

SILVA, Alisson O.; RORATTO, Lucas; SERVAT, Marcos Eduardo; DORNELES, Leandro; POLACINSKI, Edio. **Gestão da qualidade: Aplicação da ferramenta 5W2H como plano de ação para projeto de abertura de uma empresa**. In: 3ª Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. Horizontina, 2013.

TAVARES, Luís Marcelo Marques; CUNHA, Emerson Reikdal da; ALMEIDA, Salvador Luiz de. **Influência de variáveis operacionais no desempenho de classificador aerodinâmico**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p. 497-503, Set. 2007. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672007000300010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000300010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 04/12/2017.