

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS MOINHOS DE CARVÃO DA UNIB-RS

por

Jéferson Luís Both

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS MOINHOS DE CARVÃO DA UNIB-RS

por

Jéferson Luís Both

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Cristiano Frandalozo Maidana

Prof. Nattan Roberto Caetano

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 17, dezembro de 2012.

*Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais,
Nelson José Both e Nelsi Lucia Anschau Both.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a todos os funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), professores, técnicos, administrativos, que me guiaram e contribuíram para a minha formação.

Agradeço, também, à minha orientadora neste Trabalho de Conclusão de Curso, professora Thamy Cristina Hayashi, pela atenção, pela dedicação e pelo tempo empregado durante a realização.

Aos meus pais, a quem dedico este TCC, um grande muito obrigado pelo esforço e pela dedicação em minha educação, fatores que me permitiram diversas conquistas; pelo suporte e pelo entendimento das minhas escolhas e pelo amor e atenção que sempre me dedicaram.

Ao meu irmão, Gílson Luís Both, um agradecimento especial, por ser um exemplo, além de conselheiro e grande amigo que foi nessa trajetória.

Aos meus amigos e colegas de curso, especialmente João Farret Ferzola, Lucas Mesquita de Vargas, Matheus Daniel da Silveira, Rodolfo da Silva Rodrigues e Saule Augusto Biasuz, pela amizade proporcionada durante a faculdade, o que tornou essa trajetória muito mais agradável.

Aos meus amigos que conheci no Programa de Duplo Diploma na França, especialmente Daniel Tanuri e Rafael Gomes Diógenes, pelo grande amizade que tornou possível a vivência longe da família por tanto tempo.

BOTH, J.L. **Análise da Eficiência dos Moinhos de Carvão da UNIB-RS**. 2012. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Em plantas termoelétricas que queimam carvão, o moinho é o componente principal, cujo desempenho dita toda a eficiência da planta. O moinho é utilizado para pulverizar o aglomerado de carvão e transportar o carvão fino para a câmara de combustão. Este trabalho busca analisar a influência dos principais parâmetros operacionais controláveis no desempenho dos moinhos de carvão da UNIB-RS, planta industrial da Braskem. Assim, foram retiradas amostras de carvão pulverizado na descarga do moinho para diferentes condições de operação. Esses valores foram, através de curvas dadas pelo fabricante dos moinhos, relacionados com a eficiência nominal. A máxima eficiência de um moinho ocorre em uma determinada faixa de tamanho das partículas, pois partículas grande causam combustão incompleta e partículas pequenas exigem um esforço desnecessário em sua moagem, aumentando o desgaste dos rolos do moinho. Os parâmetros analisados foram a posição do classificador (aletas que causam perda de carga na saída do moinho), a pressão na descarga do moinho, a temperatura na descarga do moinho e a vazão de carvão. Observou-se que o efeito do classificador não segue uma lógica como o esperado e é altamente influenciado pelos demais fatores citados. Uma análise e posterior validação da curva de vazão de ar em função da vazão de carvão dada pelo fabricante foi realizada. Uma equação relacionando as variáveis operacionais do moinho foi criada, o que permite uma predição da quantidade mássica de carvão passante em uma peneira de *mesh* 200 e, através de curvas do fabricante, uma predição da eficiência dos moinhos. Dessa maneira, pode-se escolher os parâmetros de maneira que o moinho se mantenha em uma faixa de eficiência próxima da máxima.

PALAVRAS-CHAVE: moinho de carvão, eficiência energética, carvão pulverizado.

BOTH, J.L. **Efficiency Analysis of the UNIB-RS's coal mills**. 2012. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

In coal fired power plants the mill is the main component, which performance dictates the overall plant efficiency. The mill is used to grind the coal and transport the pulverized coal to the combustion chamber. This report analyzes the influence of the main controllable operating parameters of UNIB-RS's coal mills. Thus, samples of pulverized coal were taken at the discharge of the mill to different operating conditions and, with the data provided by the manufacturers, these results were related with their efficiency. The highest efficiency of a mill occurs in a certain size range of the particle, not so big that will cause incomplete combustion and not so small that will require so much effort, increasing the wear aspect of the mills' rolls. The parameters studied were: the position of the classifier, which reduces the pressure in the flow at the mill discharge, the mill discharge pressure, the mill discharge temperature and the coal flow. For some positions, it was observed that the effect of the classifier does not follow the logic process as expected and is highly influenced by other parameters. Analysis and validation of the air flow curve given by the manufacturer were achieved. An equation relating the operational variables of the mill was created, which allows a prediction of the amount of coal passing through a 200 mesh sieve. From the mill's manufacturer curve, these results can predict the efficiency of the mills considering the parameters to keep the mill in a range of efficiency near 100%.

KEYWORDS: coal mills, energy efficiency, pulverized coal.

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

w_{liq}	Trabalho líquido entregue ao ciclo Rankine [kJ/s]
$w_{turb, out}$	Trabalho realizado pela turbina [kJ/s]
$w_{pump, in}$	Trabalho entregue a bomba [kJ/s]
q_{in}	Calor gerado na caldeira [kJ/s]
q_{out}	Calor cedido no condensador [kJ/s]
m	Vazão mássica do fluido [kg/s]
h_3	Entalpia de vapor na saída do gerador de vapor [kJ/kg]
h_2	Entalpia do líquido na entrada do gerador de vapor [kJ/kg]
m_{ar}	Vazão mássica de ar [kg/s]
$c_{p ar}$	Calor específico do ar [kcal/kg °C]
T_e	Temperatura de entrada [°C]
T_s	Temperatura de saída [°C]
m_{ca}	Vazão mássica de carvão [kg/s]
$c_{p ca}$	Calor específico do carvão [kcal/kg °C]
w_i	Conteúdo de umidade do carvão [kg _{água} /kg _{carvão}]
$h_{lv água}$	Entalpia de vaporização da água [kcal/kg]
Y	Quantidade mássica que passa através de uma peneira de <i>mesh</i> 200 (malha de 0,075 mm) [%]
x_1	Pressão na descarga do moinho [mmH ₂ O]
x_2	Vazão de carvão [ton/h]
x_3	Temperatura na descarga do moinho [°C]
A	Constante referente a x_1 [mmH ₂ O ⁻¹]
B	Constante referente a x_2 [ton/h ⁻¹]
C	Constante referente a x_3 [°C ⁻¹]
D	Constante referente à multiplicação de x_1 e x_2 [mmH ₂ O ⁻¹ . ton/h ⁻¹]
E	Constante referente à multiplicação de x_1 e x_3 [mmH ₂ O ⁻¹ . °C ⁻¹]
F	Constante referente à multiplicação de x_2 e x_3 [ton/h ⁻¹ . °C ⁻¹]

Alfabeto Grego

η_t	Rendimento térmico do ciclo Rankine [%]
η_{cal}	Eficiência do gerador de vapor [%]

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 Caldeiras em um ciclo Rankine.....	2
3.2 Princípio de funcionamento dos moinhos	3
3.3 A utilização de carvão pulverizado.....	4
3.4 Testes de desempenho dos moinhos	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
5 METODOLOGIA	6
5.1 Parâmetros analisados	6
5.2 Procedimento de testes	7
5.3 Características dos equipamentos	8
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
6.1 Funcionamento atual dos moinhos	8
6.2 Efeito da variação dos classificadores	9
6.3 Análise da vazão de ar	12
6.4 Equação modelo	14
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Anexo I	16
Anexo II	16
Anexo III	17
Anexo IV	18
Anexo V	18

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes conquistas da humanidade até hoje foi o domínio do fogo, quando o homem aprendeu a provocar e a controlar a combustão. Hoje em dia, a combustão é fundamental para a geração de energia térmica, resultante de uma reação química exotérmica de oxidação de combustíveis [Garcia, 2002]. Esses combustíveis podem ser carvão, gás, gasolina ou madeira que, na presença de um oxidante e de uma energia de ativação, irão reagir e gerar energia.

O carvão mineral, combustível fóssil formado pelos restos de plantas soterradas há milhões de anos, é o combustível natural mais abundante no planeta [Williams, 2000]. Devido a essa grande disponibilidade, teve um papel significativo na produção de energia no decorrer dos anos. O carvão é considerado um combustível de fácil extração, transporte e utilização devido a suas características: é encontrado no estado sólido, é fácil de “quebrar” e alta densidade de energia.

O carvão é considerado uma fonte de energia barata, principalmente nas regiões onde sua disponibilidade é alta. No Brasil, a mineração do carvão encontra-se na região sul, onde os estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina são responsáveis por 99,98% das reservas de carvão. Para essa região, o carvão é muito mais que somente um combustível fóssil: é a fonte de renda de muitas famílias que necessitam do trabalho oriundo da mineração para obter seu sustento.

A queima de combustíveis fósseis traz um ponto negativo: a poluição atmosférica devido à emissão de gases nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente. Os poluentes formados pela combustão do carvão consistem em material particulado, formado por cinzas, carbono não-queimado e fumaça, e também em gases poluentes como o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e hidrocarbonetos não-queimados (VOC) [Williams, 2000]. Ainda segundo Williams, a emissão de gás carbônico (CO₂), produto oriundo de uma queima completa, pode intensificar o efeito estufa. Gases como os SO_x e os NO_x são tóxicos aos seres humanos e precursores da chuva ácida, efeito global responsável por inúmeros danos ao meio ambiente. Devido a essas características, cada vez mais os órgãos ambientais tomam ações para reduzir os efeitos da degradação da qualidade do ar, fixando limites para a emissão de poluentes para a atmosfera.

A Braskem S.A., indústria com atuação no setor químico e petroquímico, produz vapor superaquecido (11,08 MPa e 525°C) para o acionamento de equipamentos industriais (compressores, por exemplo) e para a produção de energia elétrica em turbinas a vapor. Esse vapor é produzido a partir da queima de combustíveis fósseis em geradores de vapor ou caldeiras, equipamentos que compõem um ciclo Rankine. A matriz energética da Braskem é formada principalmente por carvão, o combustível de menor custo e que tem queima limitada devido às emissões de enxofre e de material particulado. A matriz energética é complementada, assim, por óleos e por gases oriundos do processo de produção. Atualmente a matriz energética da Braskem, unidade de Triunfo, é composta por aproximadamente 55% de carvão, 31% de óleo e 13% de gás. Esses dados mostram a importância da queima de carvão e da sua otimização para a empresa.

Na década de 30, nos Estados Unidos, surgiu um movimento para a utilização do carvão pulverizado para a combustão [Williams, 2000]. Ainda segundo Williams, a vantagem da queima de pequenas partículas é que, com elas, é possível que se atinja maiores taxas de transferência de calor e de transferência de massa. Desde então, a utilização do carvão para a geração de energia é dominada por grandes caldeiras de carvão pulverizado. Os moinhos de carvão são os equipamentos responsáveis por essa pulverização. Em plantas termoelétricas a carvão, o moinho é o componente principal, cujo desempenho dita toda a eficiência da planta. O moinho é utilizado para moer o aglomerado de carvão e transportar o carvão fino para a fornalha para uma combustão eficiente. A otimização dos moinhos na sua melhor condição de operação tem sido considerada como um ponto potencial de estudo que pode proporcionar melhorias no desempenho da unidade, nas emissões atmosféricas, na eficiência da queima e na manutenção dos moinhos [Shah, 2009].

2. OBJETIVOS

A eficiência dos moinhos da Braskem (unidade de Triunfo/RS) é dada através de curvas definidas pelo fabricante. Essa eficiência depende de alguns fatores: da moagem do carvão, da umidade do carvão e dos parâmetros ajustados durante a operação do moinho, como o classificador e os rolos. O trabalho consistirá na realização de testes variando alguns parâmetros operacionais dos moinhos, como o classificador, a pressão na descarga e a temperatura na saída do moinho. Esses testes visam a realizar uma análise da influência desses fatores sobre o desempenho dos moinhos. Espera-se, dessa maneira, garantir a operação dos moinhos em uma faixa próxima dos 100% de eficiência.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Caldeiras em um ciclo Rankine

Dentre os diversos sistemas conhecidos para a conversão de calor em trabalho a partir de um ciclo termodinâmico, o mais comum é o ciclo a vapor ou ciclo Rankine [Çengel, 2007]. O ciclo Rankine geralmente utiliza a água como fluido de trabalho e possui quatro equipamentos básicos: caldeira, turbina, condensador e bomba. As caldeiras são basicamente trocadores de calor de grande escala onde o calor, oriundo da queima de combustíveis fósseis e dos gases de combustão, é transferido para a água, que se transforma em vapor superaquecido, o qual será utilizado para gerar energia elétrica. Observa-se na Figura 3.1 os componentes e o diagrama T-s (temperatura - entropia) de um ciclo Rankine ideal.

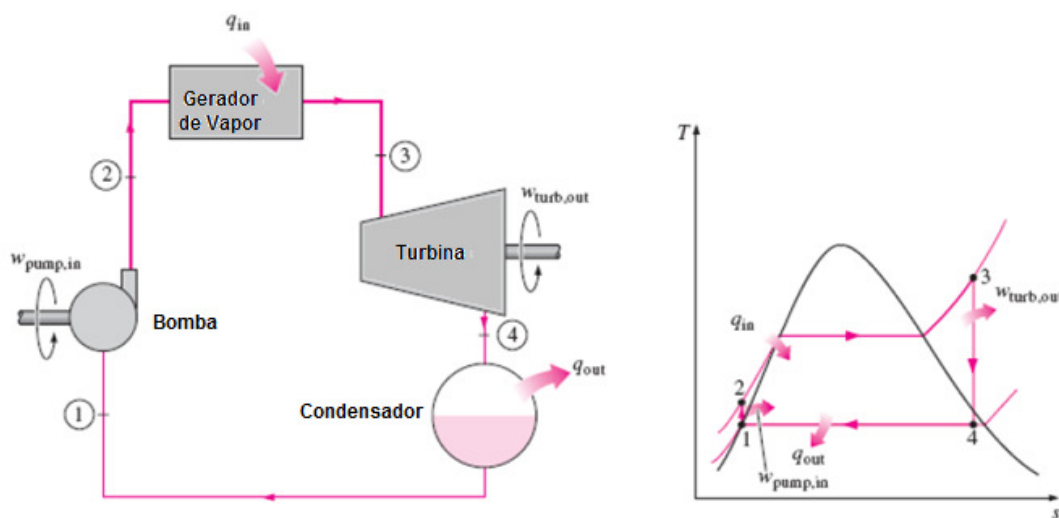


Figura 3.1 – Equipamentos que compõem um ciclo Rankine e diagrama T-s ideal

A eficiência térmica de um ciclo Rankine é determinada pela Equação 3.1.

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_{in}} = \frac{w_{turb,out} - w_{pump,in}}{q_{in}} = \left(1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}\right) \quad (3.1)$$

O calor gerado na caldeira pode ser modelado segunda a Equação 3.2.

$$q_{in} = \eta_{cal} \cdot m \cdot (h_3 - h_2) \quad (3.2)$$

Podemos observar que a eficiência do gerador de vapor (η_{cal}) é diretamente proporcional à eficiência térmica de um ciclo Rankine: quanto maior a eficiência do gerador de vapor, maior a eficiência térmica global do ciclo Rankine. Segundo a literatura, o rendimento de caldeiras de grande porte (como as presentes na UNIB-RS) varia de 88 a 94% [Pinheiro, 1995].

A eficiência de caldeira poder ser calculada por dois métodos distintos: o método direto, que leva em consideração a potência útil gerada na caldeira em relação à potência fornecida à mesma, e o método indireto, que calcula a eficiência a partir da determinação de todas as perdas geradas nas caldeiras. Dessa maneira, torna-se essencial minimizar as perdas de energia durante a operação das caldeiras. Uma das formas de minimizar essas perdas é a utilização eficiente dos combustíveis nas caldeiras, o que depende basicamente de três fatores:

1. Combustão completa dentro da fornalha;
2. Maximização da transferência de calor dos gases de combustão;
3. Minimização das perdas de calor para o meio ambiente;

A combustão completa no interior da fornalha é um fator crítico na operação de centrais termoeletrica movidas a carvão. O carvão, devido à característica de um combustível sólido, requer uma pulverização antes de entrar na câmara de combustão. Caso contrário, gerará grande quantidade de incombustos, reduzindo a eficiência de caldeira e, conseqüentemente, a eficiência global do ciclo Rankine.

Além disso, há uma crescente necessidade pela ótima utilização da energia total disponível em cada combustível utilizado devido à necessidade de conservação dos recursos naturais e de conservação do meio ambiente. Uma combustão completa, assim, é importante também para a redução da emissão de poluentes atmosféricos. Isso se justifica pelo fato de que a melhora da eficiência global da caldeira automaticamente reduz os poluentes lançados na atmosfera, já que o volume total dos produtos de combustão é reduzido [Williams, 2000].

3.2 Princípio de funcionamento dos moinhos

O carvão mineral é o principal combustível utilizado nas caldeiras da UNIB-RS. Esse carvão, antes da queima, sofre um processo de pulverização, sendo reduzido em pequenas partículas para uma melhor combustão. Essa é a principal função dos moinhos pulverizadores, que também são responsáveis por secar o carvão, classificar o tamanho das partículas do carvão na saída do moinho e transportar o carvão para o exaustor. O Anexo I mostra um plano do moinho da UNIB-RS com uma indicação de seus principais componentes.

O carvão chega no moinho pelo centro e se deposita em uma superfície inclinada denominada mesa. Essa mesa gira pela ação de um motor elétrico, fazendo com que o carvão depositado flua, devido à ação da força centrífuga, para a sua periferia. Durante esse trajeto, o carvão passa entre o anel de moagem da mesa e os rolos, que moem o carvão devido à força de molas de compressão presentes nas extremidades. A regulagem da distância entre a mesa e o rolo é ajustável, o que se constitui em um dos parâmetros no controle da granulometria (tamanhos dos grãos) do carvão. Esse parâmetro, entretando, só é ajustado quando o desgaste dos rolos é tão grande que não se consegue manter a granulometria desejada na saída dos moinhos.

Uma vez na periferia da mesa, esse carvão moído entra em contato com o ar de arraste e secagem do carvão. Esse ar escoia através de uma fenda situada abaixo da mesa giratória e arrasta o carvão helicoidalmente. Essa ação é feita pelas "vane wheel", aletas que controlam a direção do fluxo de ar de arraste. O bom estado da superfície dessas aletas é essencial para que o ar não entre de forma muito turbulenta nos moinhos, o que causaria uma distribuição não homogênea do ar dentro do moinho e um efeito negativo no tamanho das partículas de carvão.

A mistura de ar e carvão pulverizado sobe e passa pelo classificador, que são aletas cujo ângulo é ajustável e que têm como função imprimir uma perda de carga na mistura. A perda de carga imposta fará com que os grãos de carvão mais pesados (maiores) percam energia e não consigam subir até a fornalha, sendo, assim, redirecionados para a mesa para serem remoídos. Uma maior restrição, ângulo das aletas mais fechado, causa uma maior perda de carga na mistura e faz com que mais carvão volte a ser moído, reduzindo-se assim a granulometria do carvão enviado a fornalha. A Figura 3.2 mostra uma imagem interna do classificador e das aletas ajustáveis.



Figura 3.2 – Aletas ajustáveis que configuram o classificador de um moinho a carvão

A rotação da mesa, que induz a rotação dos rolos, é controlada por um motor elétrico. A corrente utilizada para acionar esse motor pode ser utilizada para medir a potência necessária para girar o motor que moe o carvão. Assim, é esperado um aumento dessa corrente quando houver excesso de carvão voltando do classificador para ser remoído pelos pulverizadores.

3.3 A utilização de carvão pulverizado

O tamanho das partículas de carvão utilizadas para a produção de energia vai depender do mecanismo de combustão aos quais elas são submetidas. A Tabela 3.1 mostra, para cada tipo de combustão de carvão, o tamanho da partícula e o tipo de fluxo de ar utilizado.

Tabela 3.1 – Tamanho médio das partículas de carvão e tipo de fluxo de ar para os diferentes tipos de combustão (Williams, 2000)

Mecanismo de combustão	Diâmetro da partícula (mm)
Grelha fixa	50 a 150
Grelhas móveis (em forma de degraus)	5,6 a 10
Combustão em leito fluidizado	~ 1
Queimador de carvão pulverizado	0,05 a 0,15
Queimador de carvão micropulverizado	~ 0,001

A maioria das centrais térmicas a carvão utilizadas para gerar vapor e energia elétrica utiliza o carvão pulverizado, ou seja, um pó de carvão extremamente fino que inflama quase instantaneamente quando introduzido em uma fornalha. As principais vantagens dessa pulverização são:

- As pequenas dimensões das partículas de carvão são facilmente arrastadas para a fornalha e conseguem sofrer combustão completa antes de sair da mesma;
- A pulverização permite que uma parcela da combustão ocorra longe do queimador, reduzindo a produção de NOx. Esse efeito ocorre devido à presença de diferentes tamanhos de partículas. Observa-se na Figura 3.3 que quanto maior o tamanho da partícula mais tempo ela demora para sofrer combustão.
- A possibilidade de projeto de caldeiras de grande porte, aumentando sua eficiência e reduzindo os custos de projeto.

Existem, basicamente, cinco fatores que podem causar valores altos de granulometria do carvão pulverizado:

1. Baixa moabilidade por rolos gastos ou desregulados;
2. Pouca pressão nas molas e nos rolos;
3. Peças do moinho gastas;
4. Excesso de impurezas no carvão;
5. Lâminas do classificador abertas em demasia.

Dentre esses parâmetros, a alteração das lâminas do classificador é o mais simples de ser modificado, pois é uma alteração que pode ser feita manualmente e não gera nenhum custo extra à operação do moinho.

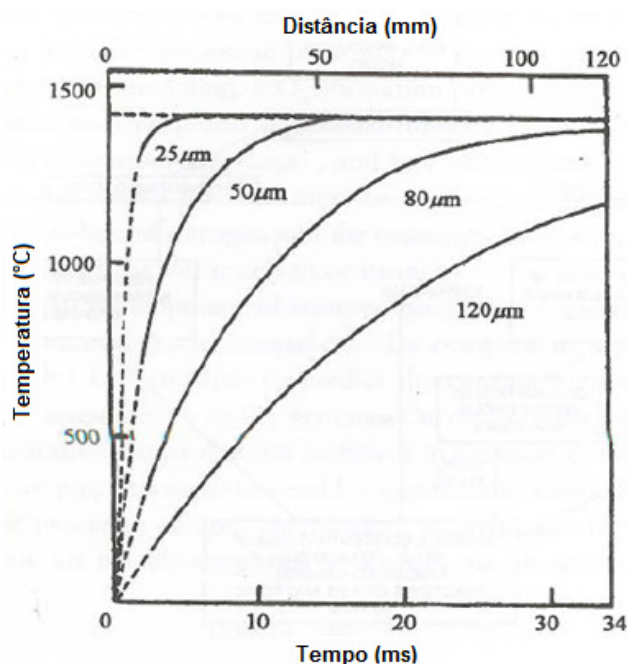


Figura 3.3 – Perfis de temperatura calculados para partículas de carvão de diferentes tamanhos em combustão a 1300°C (Williams, 2000)

3.4 Testes de desempenho nos moinhos

Existem diversos testes que são realizados atualmente para a determinação ou para a estimativa do desempenho dos moinhos de carvão: teste de tamanho de partículas, teste de capacidade dos moinhos e teste de rejeitos.

O teste de tamanho de partículas é um indicador da qualidade da pulverização do carvão. O teste consiste na análise da granulometria de uma amostra de carvão. Ele é realizado através da medida de porcentagem da amostra que passa através de um conjunto de peneiras, designadas como *mesh* 50 (malha de 0,297mm), *mesh* 100 (malha de 0,149mm) e *mesh* 200 (malha de 0,074mm). Esse teste isolado permite somente identificar o tamanho das partículas queimadas na caldeira, ignorando outros parâmetros importantes para o funcionamento dos moinhos.

Os testes de capacidade dos moinhos são os mais importantes e significativos em relação ao seu funcionamento. Eles fazem a relação da capacidade do moinho com diversos outros parâmetros, como a moabilidade do carvão, a umidade e o diâmetro das partículas.

Moabilidade é definida como a facilidade com que um carvão pode ser pulverizado. Esse parâmetro não deve ser confundido com a dureza: carvão de uma mesma dureza pode ter uma gama diferente de moabilidade, devido à presença de outros constituintes, como a umidade. Assim, foi definido um índice padrão para a determinação da moabilidade do carvão, chamado Índice de Moabilidade “Hardgrove”, que caracteriza o carvão e é determinado por testes em laboratório.

O último teste que pode ser realizado para determinar o desempenho de um pulverizador diz respeito ao tipo de material rejeitado. Os pulverizadores podem moer quase todos os tipos de piritas (dissulfureto de ferro) e rochas, mas isso torna-se economicamente inviável, devido ao grande desgaste que a moagem desses materiais causa aos rolos. Assim, se apenas piritas e rochas são observadas como rejeito dos moinhos, provavelmente algumas delas estão sendo moídas pelos rolos. Se houver uma grande porcentagem de carvão entre os rejeitos, há uma grande quantidade de carvão não-queimado resultante na queima. Assim, deve-se buscar uma quantidade mínima de carvão entre os rejeitos para se obter uma máxima eficiência na operação dos moinhos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a Electric Power Research Institute (EPRI), uma amostra de carvão com 70% de sua massa passante através do *mesh* 200 indica um moinho com ótimo desempenho. Valores maiores do que 70% fazem o moinho realizar mais trabalho do que o necessário, aumentando o desgaste e o consumo de energia. Valores inferiores a 70% significam que partículas muito grandes estão entrando na fornalha, o que gera uma grande quantidade de carbono não-queimado e uma baixa eficiência da combustão.

Em Shah 'et al.', 2009, uma análise CFD foi feita com o intuito de analisar a influência do classificador no desempenho dos moinhos pulverizadores de carvão. Nessa análise, um moinho foi modelado e um escoamento multifásico (gás + partícula) foi testado utilizando-se um software comercial para diferentes configurações, isto é, ângulos do classificador. O efeito do ângulo dos classificadores foi analisado através de três parâmetros: a turbulência do fluxo do escoamento, a relação mássica das partículas que saem em relação àquelas que entram, denominado eficiência do classificador, e o tamanho das partículas na saída do moinho. O melhor ângulo de abertura do classificador foi definido correlacionando esses três parâmetros. Assim, chegou-se à conclusão de que o ângulo ótimo é de 65°, pois confere uma uniformidade no escoamento, 60% de eficiência do classificador e 70% das partículas passante em uma peneira de 200 *mesh*.

5. METODOLOGIA

5.1 Parâmetros analisados

Buscou-se, através dos testes, variar os parâmetros controláveis que afetam o desempenho dos moinhos, a fim de avaliar os efeitos na granulometria do carvão enviado à câmara de combustão e, com esses resultados, estimar a eficiência dos moinhos. Assim, o primeiro passo foi identificar os parâmetros controláveis e os parâmetros não-controláveis que interferem em nossa resposta: a quantidade mássica de carvão passante na peneira de 200 *mesh*. A Figura 5.1 mostra esquematicamente a análise realizada.



Figura 5.1 – Esquema representativo da análise dos parâmetros de controle

Através de uma análise do funcionamento do equipamento e de conversas com operadores e engenheiros da área, definiu-se que os parâmetros controláveis são:

- X_1 : Posição do classificador - parâmetro que influi sobre a perda de carga do escoamento e pode ser facilmente modificados durante a operação do moinho.
- X_2 : Pressão na descarga do moinho - parâmetro influenciado pela vazão de ar total que entra no moinho. O aumento dessa pressão tende a arrastar partículas maiores de carvão para a câmara de combustão.
- X_3 : Temperatura na descarga do moinho - parâmetro que depende da quantidade da mistura de ar quente e ar frio que entra no moinho e das características do carvão, como a umidade.
- X_4 : Vazão de carvão - variável que denota a quantidade de carvão que é moído em um certo intervalo de tempo. É o parâmetro cuja maximização é importante.

Os testes foram realizados em um moinho fabricado pela Mitsubishi Heavy Industries que voltou de manutenção completa. Assim, parâmetros como o desgaste das peças dos

moinhos e a pouca pressão nas molas e nos rolos foram desconsiderados. Além disso, o carvão passa atualmente por separados magnéticos antes de chegar nos moinhos, processo que retira dele grande parte de impurezas que seriam danosas ao moinho. Dessa forma, podemos considerar o carvão livre de impurezas.

Assim, o único parâmetro que ainda se deve considerar é o desgaste dos rolos. Esse desgaste é um parâmetro que varia lentamente com o tempo, não possuindo, dessa forma, um efeito significativo a curto prazo. Como todos os testes foram realizados em um intervalo de dois meses, esse parâmetro não-controlável (Z_1) foi desconsiderado. Após grandes períodos de tempo, a solução utilizada quando há um grande desgaste dos rolos é, em um primeiro momento, o “tombamento” dos mesmos, isto é, a mudança da posição dos rolos. Após quatro mudanças de posição é realizada a troca do rolo como um todo.

5.2 Procedimento de testes

O procedimento de testes para determinar a capacidade dos moinhos pode ser dividido em duas etapas: a retirada da amostra de carvão e a posterior análise da mesma. O procedimento de retirada da amostra tem uma duração total de duas horas e o procedimento de análise uma duração total de quatro horas, totalizando cerca de seis horas por teste.

Começa-se, assim, com a retirada de uma amostra de carvão pulverizado no duto de saída do moinho. Deve-se fazer a retirada das amostras cuidadosamente, seguindo os seguintes passos:

- 1º. Regulagem dos parâmetros controláveis do moinho até o valor desejado e posterior aguardo de duas horas para estabilizar o escoamento no moinho;
- 2º. Abertura do dreno da linha de ar de selagem;
- 3º. Abertura das válvulas do ar de selagem;
- 4º. Utilizando o equipamento disponível na empresa, retirada da amostra fazendo-se movimentos horizontais, a fim de percorrer toda a extensão do duto (uma vez que as partículas maiores tendem a se concentrar nas paredes).

Uma vez retirada a amostra de carvão, passa-se ao procedimento de análise em laboratório. Essa análise consiste basicamente na determinação da granulometria, onde se passa o carvão pulverizado seco (a amostra é secada antes do procedimento) em um conjunto de peneiras, como é mostrado na Figura 5.2. Para as análises operacionais do setor de Utilidades da Braskem, utilizam-se as peneiras de 50 e 200 *mesh* (USA Standard). As peneiras consistem em um conjunto de arames trançados com uma certa abertura: 0,30 mm para a de 50 *mesh* e 0,075 na de 200 *mesh*. A Figura 5.2 mostra o correto posicionamento das peneiras para realizar os testes, assim como os valores utilizados pela Braskem para validar os testes operacionais

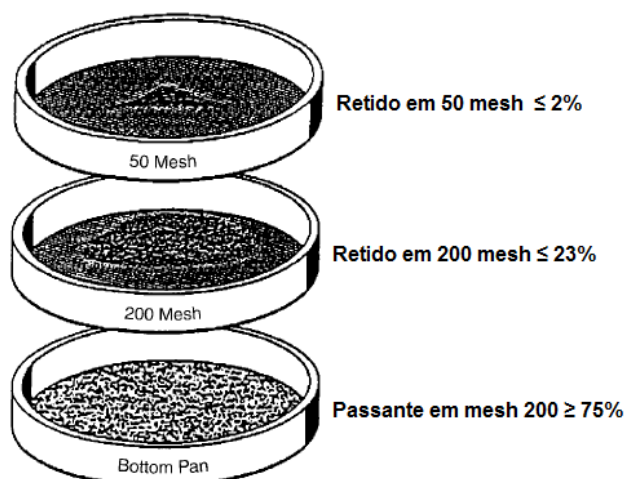


Figura 5.2 – Colocação das peneiras e valores que validam os testes realizados na UNIB-RS

5.3 Características dos equipamentos

Os testes foram realizados no setor de Utilidades da UNIB-RS (Unidade de Petroquímicos Básicos) da Braskem. O setor de Utilidades tem como principal função produzir vapor superaquecido para gerar energia elétrica nas turbinas (ciclo Rankine) e para o acionamento de compressores em outras unidades da empresa. O vapor gerado possui pressão de 113 kgf/cm² (11,08 MPa) e temperatura de 525°C. Esse vapor é gerado por três caldeiras, duas das quais funcionam utilizando carvão como principal combustível. Os testes foram realizados em um dos moinhos de uma das caldeiras que queimam carvão. Essa caldeira possui como características principais: fornalha com queima tangencial e capacidade nominal de produção de vapor especificado de 280 ton/h (máximo de 310 ton/h).

Cada caldeira possui quatro conjuntos de silos, de moinhos e de alimentadores. Desse conjunto, entretanto, somente um ou dois moinhos operam em paralelo, devido à necessidade de manutenção e aos limites de emissões atmosféricas fixados para cada caldeira. Esses moinhos têm como características principais:

- Capacidade máxima: 28 t/h;
- Temperatura máxima do ar + pó de carvão pulverizado na saída do moinho: 77 °C;
- Pressão do ar primário na entrada do moinho: 1000 mmH₂O;
- Pressão de descarga: 400 mmH₂O.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Funcionamento atual dos moinhos

A primeira etapa de testes foi uma análise do funcionamento atual do moinho de carvão onde os testes foram realizados. Para isso, uma amostra de carvão pulverizado foi retirada semanalmente durante o período de um mês (cinco amostras) e analisadas através dos testes de granulometria. A Tabela 6.1 apresenta os dias de retirada das amostras e os resultados de granulometria obtidos.

Tabela 6.1 – Testes de granulometria para o funcionamento atual dos moinhos da UNIB-RS

Dia	01-oct	08-oct	15-oct	22-oct	29-oct	Média	Desvio Padrão
Passante <i>mesh</i> 200 (%)	85,6	84,4	83	84,6	84	84,32	0,94
Retido <i>mesh</i> 200 (%)	14,4	15,4	16,9	15,4	16	15,62	0,92
Retido <i>mesh</i> 50 (%)	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,16	0,09

Nota-se que os valores não mudam consideravelmente (baixo desvio padrão) de uma semana para a outra, o que confirma a pouca influência do desgaste dos rolos considerado um período relativamente curto de tempo (um mês, por exemplo). Os valores de massa passante no *mesh* 200 permitem, juntamente com as características do carvão (Índice de Hardgrove e umidade) mostrados no Anexo II, a determinação da capacidade do moinho no atual funcionamento do mesmo (classificador na posição 5). Observa-se que os valores de umidade apresentam uma variação (de 14 a 18%), o que implica em uma variação da capacidade.

Pode-se associar às médias dos resultados uma incerteza aleatória dada pelo desvio padrão e, assim, dizer que o valor obtido em cada uma das peneiras está na faixa de:

$$82,43 \% < \text{Passante } mesh\ 200 < 86,21 \%$$

$$13,78 \% < \text{Retido } mesh\ 200 < 17,46 \%$$

$$0 \% < \text{Retido } mesh\ 50 < 0,34 \%$$

com 95,45% de probabilidade (dois desvios padrão).

A Figura 6.1 mostra os valores as curvas definidas pelo fabricante dos moinhos que determinam a capacidade em função dos parâmetros relacionados ao carvão. Na parte inferior do gráfico, observa-se, no eixo vertical, o Índice de Moabilidade “Hardgrove” do carvão (igual a

76), que é relacionado com o tamanho das partículas de carvão enviadas a fornalha, através de retas que fornecem a quantidade passante de carvão em uma peneira de *mesh* 200. O ponto encontrado é relacionado, na parte superior do gráfico, com a umidade do carvão, de onde se obém um novo ponto. Esse ponto é ligado diretamente à capacidade dos moinhos, valores mostrados no eixo horizontal.

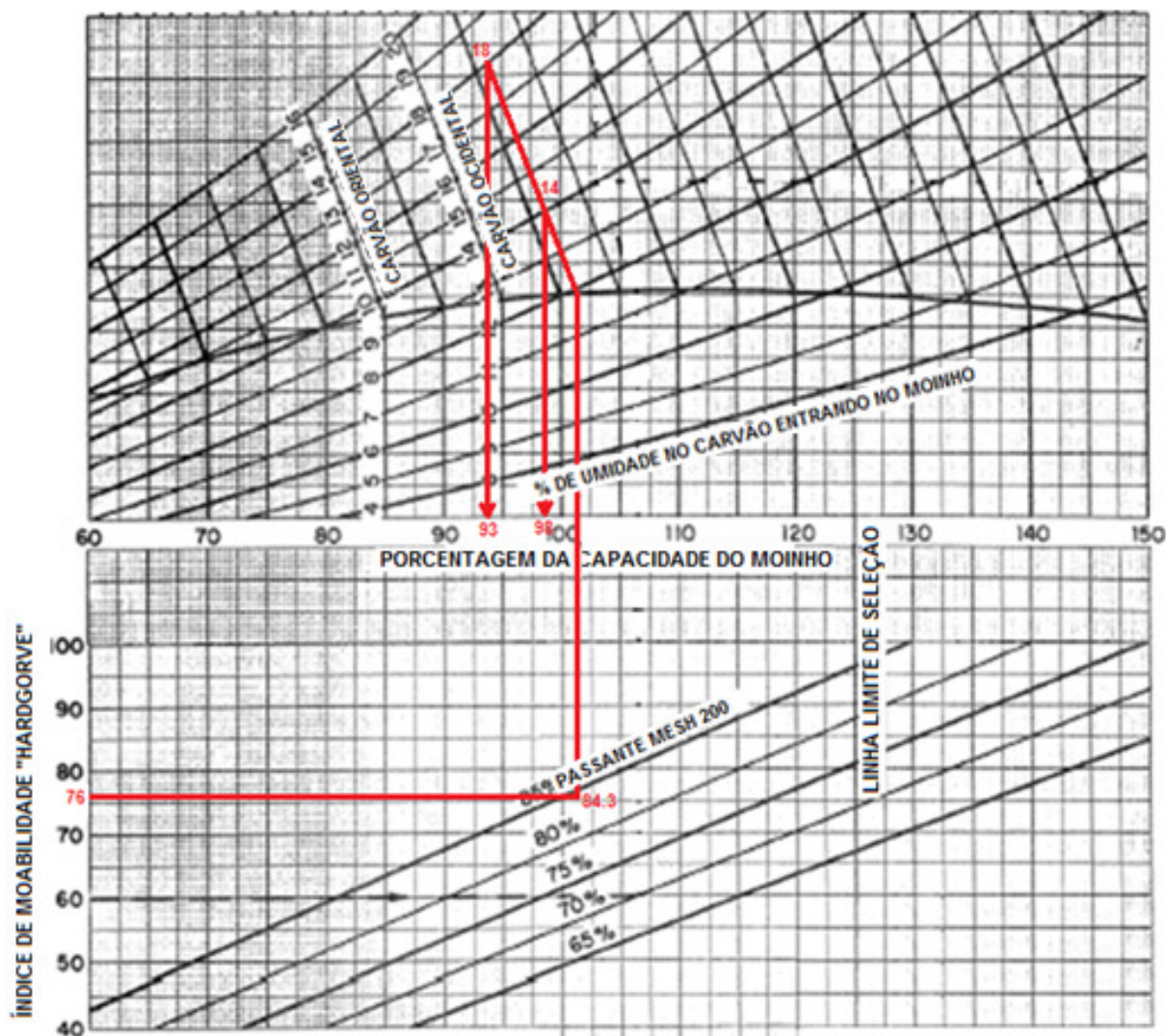


Figura 6.1 – Curvas fornecidas pelo fabricante que relacionam os parâmetros e permitem a estimativa da capacidade dos moinhos de carvão da UNIB-RS

Assim, observa-se na Figura 6.1 que a eficiência atual dos moinhos de carvão está entre 93 e 98% (em função da umidade do carvão moído), valores que podem ser considerados satisfatórios. Esses testes foram realizados com o classificador na posição 5 e com os outros parâmetros controláveis (pressão na descarga, temperatura na descarga e vazão de carvão) em valores não previamente estabelecidos.

6.2 Efeito da variação dos classificadores

Os testes seguintes visaram avaliar o efeito da variação do classificador na granulometria dos moinhos e, conseqüentemente, na eficiência dos mesmos. O classificador consiste em aletas ajustáveis presentes antes do duto de saída dos moinhos que imprimem uma perda de carga no escoamento. Quanto maior o valor do classificador, maior a restrição ao

escoamento e, dessa maneira, maior a perda de carga imposta. O classificador pode ser ajustado do valor 1 ao valor 10: quanto maior esse valor, maior a restrição à passagem do escoamento e, dessa maneira, maior a perda de carga imposta. Assim, espera-se uma redução da granulometria do carvão passante, ou seja, uma maior quantidade passante na peneira de 200 *mesh*, na medida em que o valor do classificador aumenta.

As coletas das amostras desses testes foram realizadas em um período de no máximo três dias, a fim de que os efeitos do desgaste dos rolos e de possíveis problemas no moinho fossem minimizados. A Figura 6.2 mostra os resultados de granulometria realizados para as cinco diferentes posições do classificador.

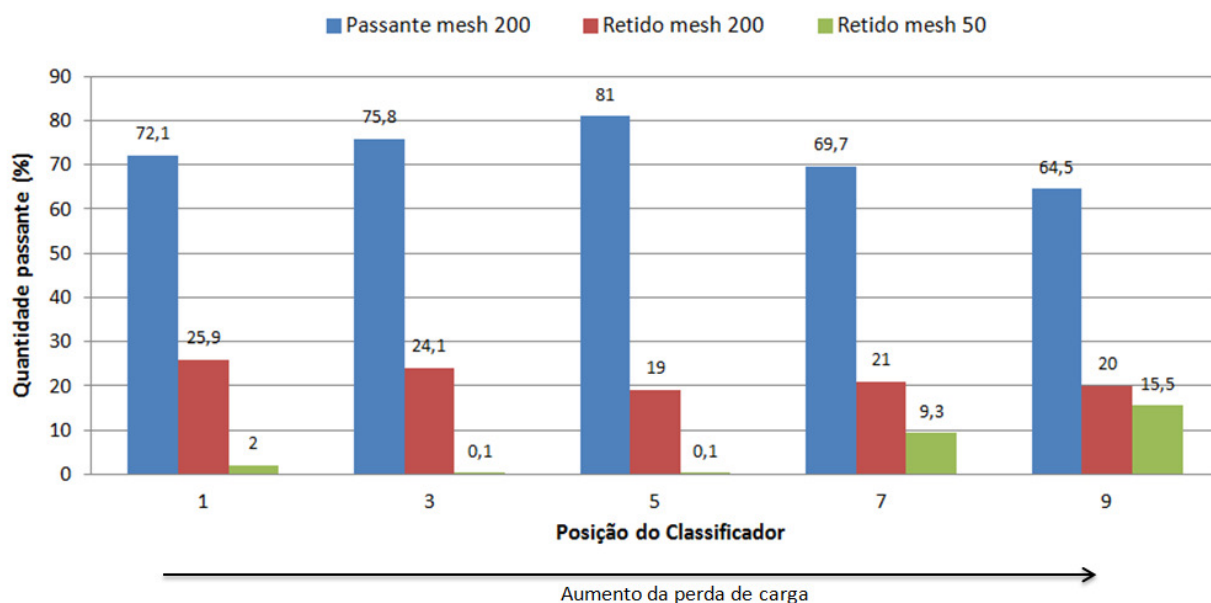


Figura 6.2 – Granulometria passante nas peneiras para as diferentes posições do classificador

Observa-se que, em um primeiro momento, para as posições 1, 3 e 5, há uma tendência de aumento do tamanho das partículas enviadas à caldeira, o que era esperado devido à menor perda de carga imposta ao escoamento. Para as posições 7 e 9 do classificador, entretanto, nota-se um aumento do tamanho das partículas, mesmo com o aumento da restrição ao escoamento (perda de carga), o que não era esperado.

Nessa etapa do trabalho somente um teste foi realizado para cada posição do classificador. Dessa maneira, a determinação da incerteza de aleatoriedade associada às medições não é possível. Como os testes seguiram o mesmo procedimento dos testes cujos resultados são mostrados na Seção 6.1, pode-se propagar as incertezas de medição obtidas anteriormente. Assim, para um intervalo de confiança de 95,45%, as incertezas ligadas a cada uma das leituras são:

- Passante em uma peneira de *mesh* 200: $\pm 1,88\%$;
- Retido em *mesh* 200: $\pm 1,84\%$;
- Retido em *mesh* 50: $\pm 0,18\%$;

A fim de analisar o porquê desse resultado inesperado para as posições 7 e 9 do classificador, os outros parâmetros influentes no funcionamento do moinho foram analisados: a pressão na descarga do moinho, a temperatura da descarga do moinho e a vazão de carvão. A Figura 6.3 mostra os resultados de pressão na descarga do moinho para as cinco diferentes posições do classificador.

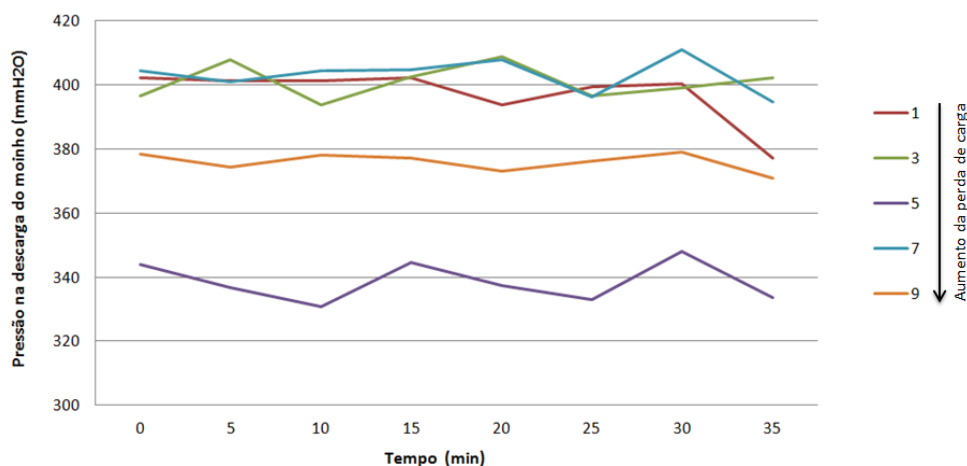


Figura 6.3 – Pressão na descarga do moinho para as cinco posições do classificador

A pressão na descarga do moinho depende do escoamento de ar dentro do equipamento. Pressões maiores tendem a arrastar partículas maiores. Observa-se que a menor pressão ocorreu com o classificador na posição 5, justamente a posição em que se obteve menor granulometria. A pressão na descarga do moinho, quando o classificador estava nas posições 7 e 9, é maior do que aquela na posição 5, o que pode ser um dos motivos que leva a uma granulometria maior nesses dois pontos, mesmo com uma maior perda de carga imposta pelo classificador.

Outro fator que afeta a granulometria é a vazão de carvão. Esse é o fator cuja maximização é importante, uma vez que o carvão é o combustível mais barato da matriz energética da Braskem. A queima de carvão é limitada, entretando, pela temperatura baixa na saída do moinho e pelos limites de emissões atmosféricas. A Figura 6.4 mostra as vazões de queima de carvão nos testes em cada uma das cinco posições do classificador testadas.

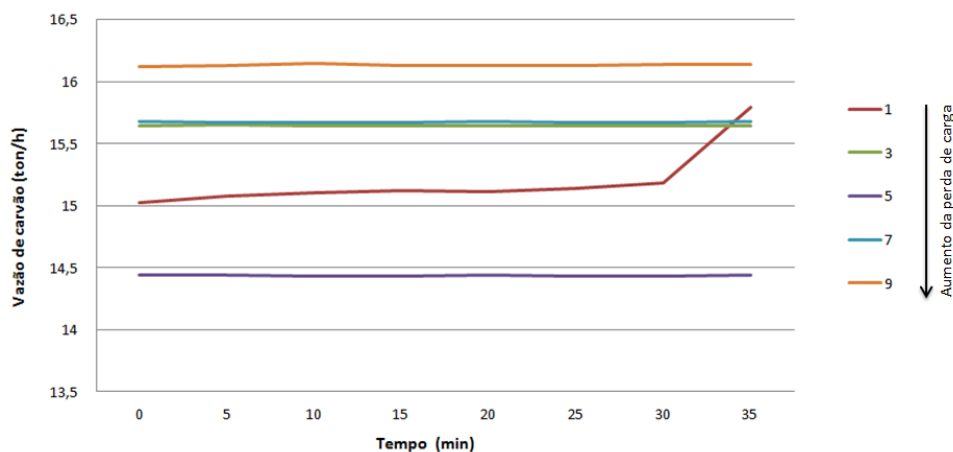


Figura 6.4 – Vazão de carvão nos testes das cinco posições do classificador

Observa-se que não há uma grande diferença entre as situações analisadas (variação de 1,5 ton/h). Como esses valores são influenciados diretamente pela umidade do carvão queimado (valor que pode variar de 14 a 18%), torna-se difícil retirar qualquer conclusão a partir desse gráfico. Nota-se, entretando, que as maiores vazões acontecem quando o classificador está nas posições 7 e 9, justamente aquelas que, apesar de uma alta restrição imposta ao escoamento, apresentaram uma grande granulometria.

A temperatura na descarga do moinho também afeta o seu escoamento. Ela depende da quantidade de ar primário quente e frio que entra nos moinhos, da quantidade de carvão e

dos parâmetros relativos ao carvão. A Figura 6.5 mostra as temperaturas na descarga do moinho para as cinco diferentes posições do classificador.

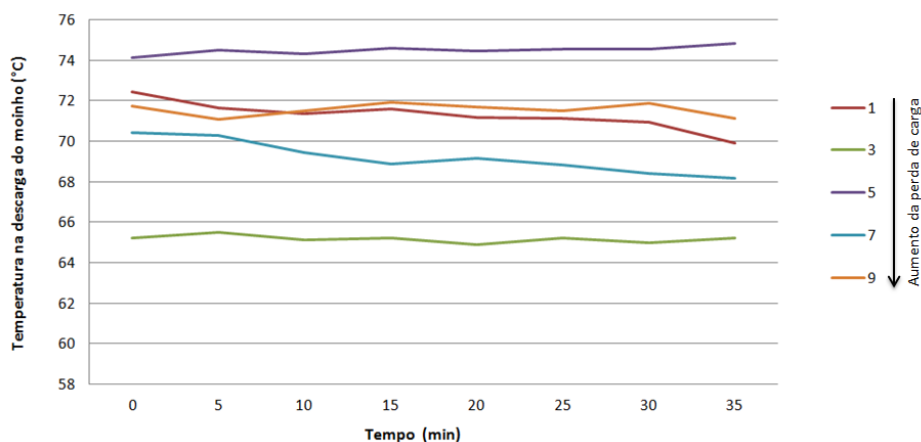


Figura 6.5 – Temperatura na descarga do moinho para as cinco posições do classificador

Observa-se que a maior temperatura ocorre quando a vazão de carvão era a menor (classificador na posição 5), o que era esperado, uma vez que essa temperatura tende a baixar na medida que há um maior fluxo de carvão que necessita ser secado.

Utilizando a Figura 6.1, as características do carvão e os valores obtidos nos testes de granulometria, torna-se possível fazer uma relação da capacidade dos moinhos para as cinco diferentes posições do classificador. A Figura 6.6 ilustra esses resultados. Pode-se observar também os limites máximo e mínimo referentes a variação da umidade do carvão de 14% a 18%, o que causa uma variação na eficiência.

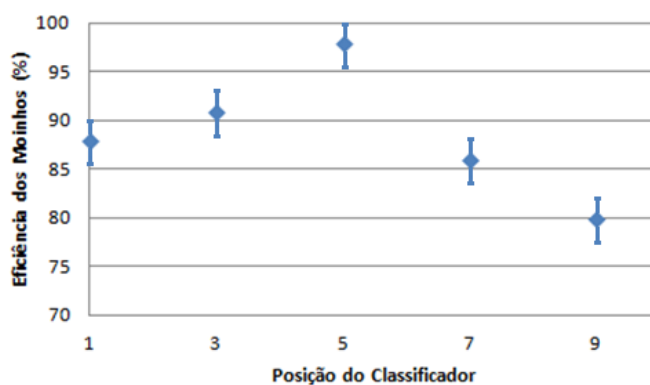


Figura 6.6 – Eficiência dos moinhos para as diferentes posições do classificador

6.3 Análise da vazão de ar

Com as análises feitas anteriormente, chegou-se à conclusão de que a vazão de ar é um parâmetro que influencia diretamente os resultados de granulometria, pois determina as características do escoamento no interior do moinho e influencia os outros fatores. Decidiu-se, dessa maneira, estimar o escoamento de ar e comparar os valores obtidos com as curvas fornecidas pelo fabricante.

Para essa análise, fez-se um balanço da troca de calor que ocorrem dentro do moinho, entre o ar e o carvão. O ar entra no moinho a uma certa temperatura, retira a umidade do carvão, esquenta o carvão e sai na descarga do moinho (juntamente com o carvão). A Equação 6.1 modela o balanço.

$$\dot{m}_{ar} \cdot c_{p ar} \cdot (T_e - T_s)_{ar} = \dot{m}_{ca} \cdot c_{p ca} \cdot (T_e - T_s)_{ca} + \dot{m}_{ca} \cdot w_i \cdot h_{lv \text{ água}} \quad (6.1)$$

Os dados para a determinação da vazão de ar foram coletados para dez situações, mantendo o classificador sempre na posição 5, que forneceu os melhores resultados anteriormente. Os dias referentes às dez situações e todos os dados utilizados na Equação 6.1 para a determinação do escoamento de ar são mostrados no Anexo III. Os resultados obtidos a partir dessa equação foram comparados com as curvas definidas pelo fabricante e, juntamente com a diferença relativa entre esses valores, são mostrados na Tabela 6.2

Tabela 6.2 – Comparação dos valores de vazão mássica teórica e da curva do fabricante

Situação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão mássica do ar (teórica) (ton/h)	40,1	46,6	43,4	40,5	44,0	45,6	42,8	44,0	39,0	39,1
Vazão mássica do ar (fabricante) (ton/h)	37,0	39,3	38,8	36,9	39,5	39,0	37,5	37,5	36,0	35,0
Diferença Relativa (%)	8,4	18,6	12,0	9,8	11,3	16,8	14,1	17,3	8,3	11,8

Observa-se que a vazão mássica teórica é sempre maior do que a vazão mássica definida pelas curvas do fabricante. Já era esperada uma diferença, devido ao tempo de funcionamento dos equipamentos e a . Mesmo assim, nota-se uma diferença relativa média de 12%, que pode ser considerado um valor pequeno.

Utilizando os valores mostrados na Tabela 6.2, realizou-se um ajuste linear dos resultados experimentais para que os mesmos pudessem ser mostrados em forma de uma reta da vazão de carvão em função da vazão de ar. Essa reta, juntamente com a reta fornecida pelo fabricante dos equipamentos, é mostrada na Figura 6.7.

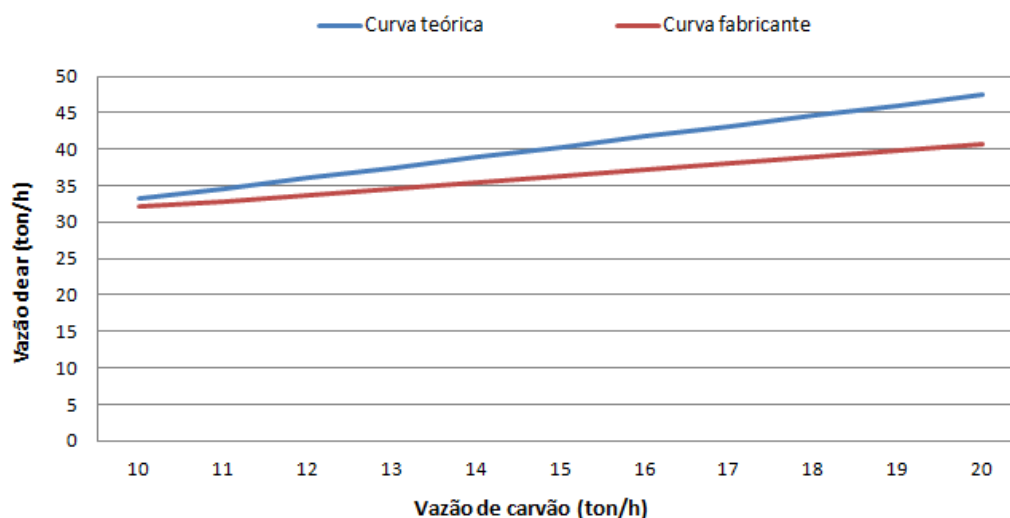


Figura 6.7 – Comparação das curvas de vazão de ar em função da vazão de carvão

Observa-se que a curva teórica resultou em valores maiores do que a curva dada pelo fabricante para toda a gama de vazões de carvão utilizada operacionalmente. Isso já era esperado, uma vez que foram desconsideradas as perdas e a quantidade de carvão que precisa é moída mais de uma vez dentro do moinho. Nota-se, porém, que a inclinação e a proximidade das retas são similares (diferença relativa média de 12%), o que mostra que as curvas definidas pelos fabricantes são válidas e podem ser utilizadas operacionalmente.

Para os cálculos das incertezas associadas ao resultado teórico obtido, considerou-se que todas as medidas de temperaturas foram realizadas com termopares do tipo K (chromel-alumel), instrumento que possui uma incerteza associada de $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$. Não foi possível a obtenção de nenhum dado referente a incerteza ligada ao medidor de vazão de carvão. Assim, considerou-se que a incerteza de medição do instrumento é igual a sua resolução (intervalo de confiança de um desvio padrão). Assim, a incerteza associada a vazão de carvão é de $\pm 0,056$ kg/s, para um intervalo de confiança de 95%. Com a posse desses dados, aplicou-se a teoria

da propagação da incerteza de medição para a Equação 6.1, utilizando os dados relativos a vazão de carvão, a temperatura de entrada e saída de ar e a temperatura de entrada e saída de carvão como variáveis. Dessa maneira, chegou-se em uma incerteza ligada a vazão de ar de $\pm 0,183$ kg/s, o que equivale a $\pm 0,66$ ton/h, para um intervalo de confiança de 94,55%.

6.4 Equação modelo

Dentre os parâmetros analisados, a posição dos classificadores é a única que é completamente independente das outras. Analisando os resultados obtidos anteriormente, concluiu-se que o classificador na posição 5 apresenta os melhores resultados. Assim, nessa parte do trabalho, fixou-se o classificador na posição 5 e buscou-se uma equação que relaciona a variável desejada Y (passante em *mesh* 200) em função das variáveis que interferem nesse valor: x_1 (pressão de descarga do moinho), x_2 (vazão de carvão) e x_3 (temperatura na descarga do moinho).

Os dados foram coletados em dez situações diferentes e em um período de cerca de dois meses. Vale ressaltar que o efeito do desgaste dos rolos, parâmetro que apresenta influência na granulometria, foi descartado nessa análise. Os valores referentes às dez situações analisadas são mostradas no Anexo IV.

A equação obtida tem a forma mostrada na Equação 6.2.

$$Y = A \cdot x_1 + B \cdot x_2 + C \cdot x_3 + D \cdot x_1 \cdot x_2 + E \cdot x_1 \cdot x_3 + F \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (6.2)$$

Os coeficientes da Equação 6.2 foram obtidos através de uma análise estatística obtidos a partir dos dados mostrados no Anexo IV e são mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valor dos coeficientes da equação de predição da quantidade em massa passante na peneira de *mesh* 200

A	B	C	D	E	F
0,8647	-11,8749	1,2385	-0,0026	-0,0120	0,1715

Observa-se nessa análise estatística um valor de r^2 ajustado = 0,75. Esse valor nos dá uma medida do sucesso da estimativa, é o grau de proximidade entre os valores estimados pela equação e dos valores reais. O Anexo V mostra os valores reais, os valores obtidos pela equação e os erros relativos. O valor máximo obtido é de 4%, o que mostra que a equação consegue prever com precisão os valores mássicos passantes na peneira de *mesh* 200.

Na prática, a vazão de carvão (x_2) é a variável que buscamos maximizar, e ela geralmente é limitada pela baixa temperatura na descarga dos moinhos (x_3). Com esses dois valores fixados, pode-se chegar facilmente a um valor de pressão na descarga do moinho que dará uma quantidade mássica passante de 80% na peneira de *mesh* 200, valor que otimiza o desempenho dos moinhos.

7. CONCLUSÕES

A eficiência de uma central térmica está diretamente relacionada à eficiência da queima de combustíveis. Em centrais térmicas a carvão, o desempenho dos moinhos, equipamentos responsáveis pela moagem do carvão e pelo seu transporte até a câmara de combustão, é um fator chave para o bom desempenho da planta. O desempenho dos moinhos está diretamente relacionado aos parâmetros do carvão queimado e à granulometria do carvão enviado à câmara de combustão, fator muito importante e que depende de diversas variáveis operacionais do equipamento, como a posição do classificador e o escoamento de ar dentro do moinho.

Neste trabalho, realizou-se uma análise das variáveis controláveis que interferem no desempenho dos moinhos e buscou-se analisar seus efeitos sobre a granulometria do carvão e, assim, sobre o desempenho dos moinhos. A posição do classificador que apresentou os

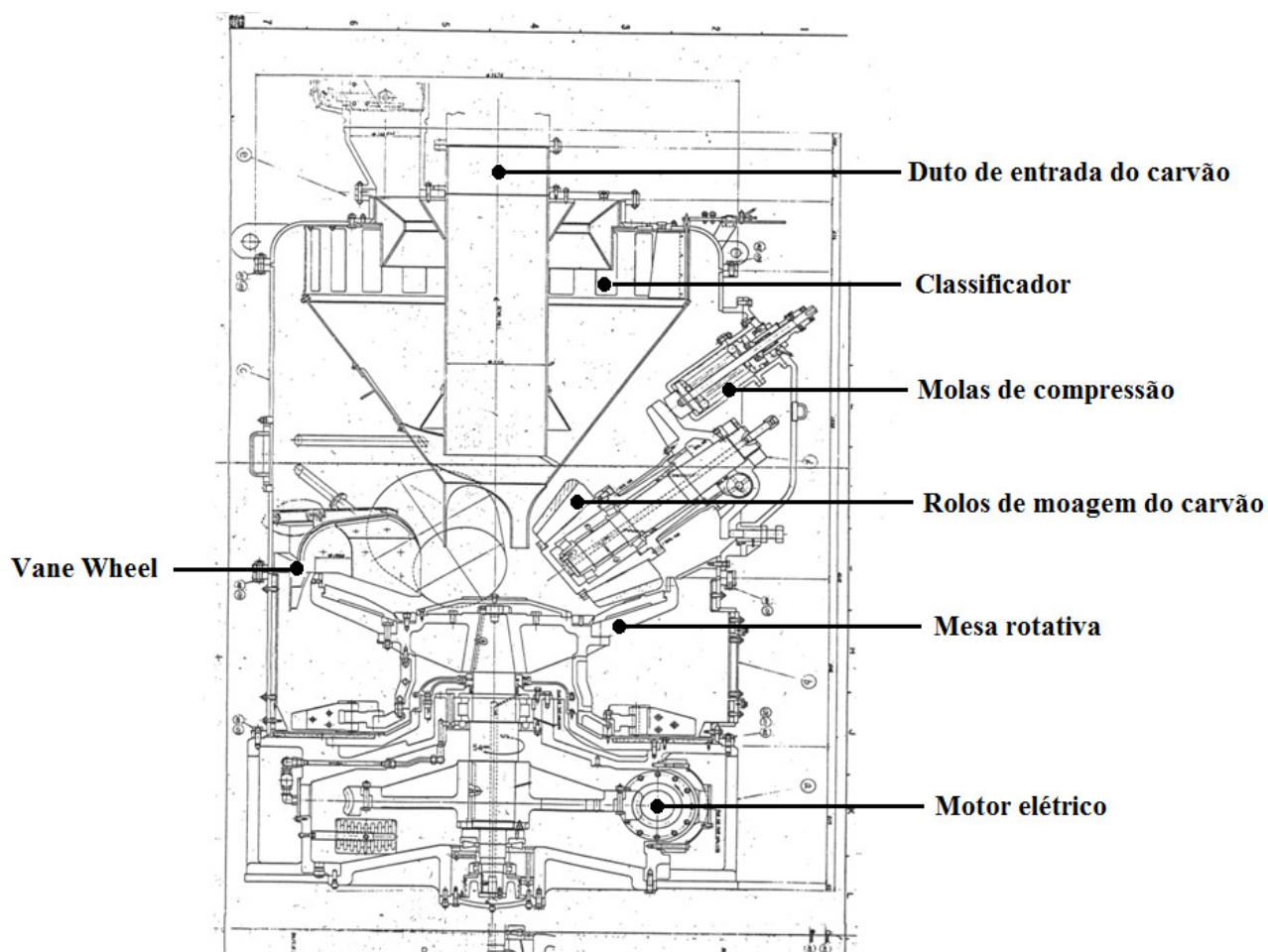
melhores resultados foi a posição 5, exatamente aquela utilizada na operação dos moinhos atualmente. Apesar de mostrar a sua influência, esse fator mostrou-se menos importante do que o esperado. Assim, buscou-se uma análise dos demais parâmetros que interferem no desempenho do moinho. Primeiramente fez-se uma análise das curvas de vazão de ar em função da vazão de carvão, comparando os valores do fabricante com valores teóricos. Essas curvas mostraram uma diferença considerável, o que era esperado uma vez que as perdas foram desconsideradas na análise teórica. As curvas, entretanto, mostraram uma boa similaridade, o que valida a utilização das curvas definidas pelo fabricante. Enfim, uma equação relacionando três parâmetros significativos no desempenho do moinho (pressão na descarga do moinho, vazão de carvão e temperatura na descarga do moinho) foi determinada, o que permite prever a quantidade de carvão passante na peneira de *mesh* 200 e, assim, prever o desempenho dos moinhos. Não foi possível chegar a nenhuma conclusão no que diz respeito à corrente no motor do moinho, o que era esperado no início do trabalho.

É de grande interesse a continuação desse trabalho e uma análise mais aprofundada de cada parâmetro separadamente, através de uma metodologia fatorial que permitiria chegar em um ponto ótimo de funcionamento. Além disso, uma análise pontual e mais aprofundada da perda de carga imposta pelo classificador e do desgaste dos rolos de moagem pode ser feita, a fim de dar continuidade aos estudos dos moinhos de carvão da UNIB-RS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÇENGEL, Y. A. e BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Lisboa: McGraw-Hill, 2007.
- WYLEN, G.V., SONNTAG, R. & BORGNAKKE, C., **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 6ª Edição, 2004.
- GARCIA, R., **Combustíveis e Combustão Industrial**. São Paulo: Editora Interciência, Edição 1, 2002.
- WILLIAMS, A., POURKASHANIAN, M., JONES, J.M. & SKORUPSKA, N., “**Combustion and Gasification of Coal (Applied Energy Technology Series)**”. New York: Taylor & Francis, 2000.
- MUIRA, T., “**Advanced Coal Combustion**”. New York: Nova Publishers, 2001.
- PINHEIRO, P.C.C. e CERQUEIRA, S. A. A. G., **Método de Cálculo do Balanço Térmico de Caldeiras**. XVII Seminário de Balanços Energéticos e Utilidades, 1995.
- SHAH, K.V.; VUTHALURU, R.; VUTHALURU, H.B.; “**CFD based investigations into optimization of coal pulverizer performance: Effect of classifier vane settings**”, Fuel Process Technology, vol. 90, pp 1135-1141, 2009.
- VUTHALURU, H.B.; PAREEK, V.K.; VUTHALURU, R.; “**Multiphase flow simulation of a simplifier coal pulverizer**”, Fuel Process Technology, vol. 86, pp 1195-1205, 2005.
- TRIMBLE, A. S., HOWER, J.C.; “**Studies of the relationship between coal petrology and grinding properties**”. International Journal of Coal Geology 54, pp 253-260, 2003.
- SCIEZKA, S. F., “**A Technique to Investigate Pulverizing Properties of Coal**”; Powder Technology, vol. 43, pp 89-102, 1985.
- WEIRAN, Z., YUEMIN, Z., YAQUN, H., FENGNIAN S., CHENLONG, D., “**Relationship between coal size reduction and energy input in Hardgrove mill of Coal**”; International Journal of Mining Science and Technology, vol. 22, pp 121-124, 2012.
- MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTDA; “**Instruction Manual – Operating and Maintenance Instructions**”, Triunfo, 1981.
- MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTDA; “**Project Book (Basic Engineering Data)**”, Triunfo, 1981.
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE; “**Pulverizer Maintenance Guide**”, Palo Alto, CA: 2004.
- TRIOLA, M.F, **Introdução à Estatística**, LTC - Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1999
- SCHNEIDER, P., Notas de Aula de Medições Térmicas (ENG03108), UFRGS, Porto Alegre, 2011.

ANEXO I - Principais elementos que compõem o moinho a carvão da UNIB-RS



ANEXO II – Informações típicas do carvão CE-4700

Análise Imediata	
PCS base seca	4721 kcal/kg
PCI base seca	4527 kcal/kg
Teor de umidade total	14,0 a 18,0 %
Análise Elementar	
Carbono base seca	49,70%
Hidrogênio base seca	3,80%
Nitrogênio base seca	0,90%
Oxigênio base seca	10,80%
Enxôfre total	1,00%
Moabilidade	
Índice de Hardgrove	76

ANEXO III – Dados utilizados para a determinação da vazão de ar

- Datas e horas das coletas das situações analisadas

Situação	Dia e hora
1	08/10 as 6:00
2	15/10 as 6:00
3	22/10 as 6:00
4	29/10 as 6:00
5	05/11 as 6:00
6	21/11 as 14:30
7	21/11 as 15:30
8	26/11 as 6:00
9	03/12 as 6:00
10	03/12 as 22:00

- Dados Constantes

Dados	Valor	Unidade
Calor específico do ar	0,2402	kcal/kg °C
Calor específico do carvão	0,31	kcal/kg °C
Entalpia vaporização da água	525	kcal/kg
Umidade	0,16	kg _{água} /kg _{carvão}

- Dados Variáveis

Situação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pressão descarga (mmH ₂ O)	348	432,5	419,7	333,7	412,1	401	391	466,2	326	345,5
Temp. entrada ar (°C)	222,9	220,4	226	219,6	228,9	222,8	224,5	220	224,2	219,3
Temp. de saída ar (°C)	65,2	64	68	64,8	63,5	64,5	69,2	69	74	78,2
Temp. de entrada carvão (°C)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Temp. de saída carvão (°C)	65,2	64	68	64,8	63,5	64,5	69,2	69	74	78,2
Vazão mássica do carvão (kg/s)	4,44	5,14	4,78	4,42	5,14	5,08	4,61	4,61	4,00	3,72

ANEXO IV – Dados utilizados para a determinação dos coeficientes da Equação 5.2

	Y	x1	x2	x3
	Passante 200 (%)	Pressão na descarga (mmH2O)	Vazão carvão (ton/h)	Temp. na descarga (°C)
1	84,4	348	16	65,2
2	86,4	432,5	18,5	64
3	84,6	419,7	17,2	68
4	84	333,7	15,9	64,8
5	81	412,1	18,5	63,5
6	79	401	18,3	64,5
7	84,9	391	16	69,2
8	80	466,2	16	69
9	81	326	14,4	74
10	81	345,5	13,4	78,2

ANEXO V – Valores reais e valores teóricos de Y (quantidade mássica passante em *mesh* 200) e erro relativo

Valor real (%)	Valor teórico (%)	Erro relativo
84,4	83,753	0,77%
86,4	83,504	3,35%
84,6	82,121	2,93%
84	83,348	0,78%
81	82,787	2,21%
79	82,164	4,00%
84,9	82,666	2,63%
80	82,416	3,02%
81	83,584	3,19%
81	79,946	1,30%