



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DO CARVÃO E DAS
CONDIÇÕES OPERACIONAIS NO PROCESSO DE
COMBUSTÃO DE UMA USINA TERMELÉTRICA

ANA PAULA RODRIGUES ALVES RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade Federal de
Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Humberto Jorge José

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina de Fátima Moreira

Florianópolis

2002

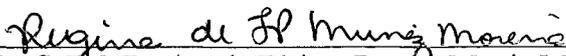
Influência da Qualidade do Carvão e das Condições Operacionais no Processo de Combustão de uma Usina Termelétrica

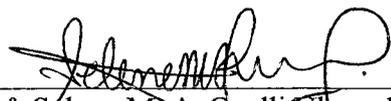
Por

Ana Paula Rodrigues Alves Ribeiro

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, área de concentração **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

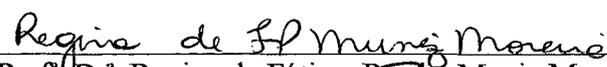

Prof. Dr. Humberto Jorge José
Orientador

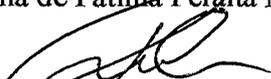

Prof.ª Dr.ª Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira
Co-orientadora

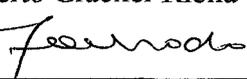

Prof.ª Dr.ª Selene M. A. Guelli Ulson de Souza
Coordenadora do CPGENQ

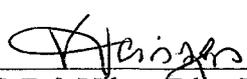
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Humberto Jorge-José


Prof.ª Dr.ª Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira


Prof. Dr. Humberto Gracher Riella


Prof. Dr. Ricardo Antonio Francisco Machado


Prof.ª Dr.ª Vilma Edite Fonseca Heinzen

Florianópolis, 08 de Fevereiro de 2002

AGRADECIMENTOS

Em especial à minha mãe por ser a pessoa mais importante em minha vida.

Ao professor Humberto pela orientação e confiança.

À Professora Regina pela co-orientação e apoio.

Aos meus amigos Rita, Carlos Darlan, Fátima e Rogério pelo incentivo e apoio.

Aos meus colegas de laboratório Gercino, Ticiane, Jean, Douglas, Isabela, Vivian, Andréia e Karine pelo companheirismo, e em especial ao Marcos pela ajuda.

À GERASUL e ANEEL pelo financiamento do projeto.

Ao engenheiro Carlos Humberto Dalsasso e aos funcionários da UTLA da GERASUL pela amizade e colaboração.

Ao doutorando Carlos Claumann do Laboratório de Controle de Processos pela parte de programação do *software* de gerenciamento.

Ao funcionário Edevilson pelo seu importante apoio.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	p.vii
LISTA DE TABELAS	p.ix
RESUMO	p.x
ABSTRACT	p.xi
1 INTRODUÇÃO	p.1
2 OBJETIVOS	p.2
2.1 Objetivos Gerais	p.2
2.2 Objetivos Específicos	p.2
3 REVISÃO DE LITERATURA	p.3
3.1 O Processo de Combustão	p.3
3.2 A Termodinâmica da Combustão	p.6
3.2.1 O Poder Calorífico de um Combustível	p.6
3.2.2 A Temperatura Adiabática de Chama	p.7
3.2.3 O Fenômeno da Dissociação	p.8
3.3 A Combustão de Sólidos	p.10
3.3.1 Mecanismos de Combustão de Sólidos	p.10
3.3.2 A Combustão de Carvão	p.12
3.3.2.1 O Carvão Mineral	p.12
3.3.2.2 Os Processos Industriais de Combustão de Carvão	p.13
3.3.2.2.1 A Combustão em Leito Fixo	p.13
3.3.2.2.2 A Combustão em Leito Fluidizado	p.14
3.3.2.2.3 A combustão de Carvão Pulverizado	p.14

3.3.2.3 Emissão de Poluentes no Processo de Combustão	p.17
3.3.2.3.1 Padrões de Qualidade do Ar	p.17
3.3.2.3.2 Óxidos de Enxofre	p.19
3.3.2.3.3 Monóxido de Carbono	p.21
3.3.2.3.4 Óxidos de Nitrogênio	p.22
3.3.2.3.4.1 NO Térmico	p.23
3.3.2.3.4.2 NO Ativo	p.24
3.3.2.3.4.3 NO Combustível	p.25
3.3.2.3.5 Carbono na Cinza Leve	p.29
4 METODOLOGIA	p.32
4.1 Análise de Combustíveis	p.32
4.2 Modelo de Gerenciamento do Processo de Combustão	p.32
4.2.1 Considerações do Modelo de Gerenciamento	p.33
4.2.2 Equações do Modelo de Gerenciamento	p.33
4.2.2.1 Balanço de Massa	p.33
4.2.2.2 Balanço de Energia	p.35
4.2.3 <i>Software</i> do Modelo de Gerenciamento	p.36
4.3 Ensaio de Combustão	p.41
4.3.1 Planta Experimental	p.42
4.3.2 Procedimento Experimental	p.44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	p.46
5.1 Caracterização dos Carvões	p.46
5.2 Testes de Combustão	p.52
5.2.1 Condições Operacionais	p.52

5.2.2	Influência da Composição do Carvão na Emissão de Poluentes	p.53
5.2.3	Influência do Excesso de Ar na Formação de Poluentes	p.55
5.2.3.1	Óxidos de Nitrogênio	p.55
5.2.3.2	Monóxido de Carbono	p.59
5.2.3.3	Carbono na Cinza Leve	p.63
5.3	Verificação do Modelo de Gerenciamento da Combustão	p.65
6	CONCLUSÕES	p.72
7	SUGESTÕES	p.74
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	p.75
9	ANEXOS	p.79
9.1	Relatório do Programa de Gerenciamento GERCOM 1.0	p.79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da análise energética do processo de combustão	p.3
Figura 2: Esquema simplificado do processo de moagem e transporte de carvão pulverizado	p.15
Figura 3: Queimador de carvão pulverizado	p.16
Figura 4: Comparação de dados estimados e experimentais como uma função do teor de nitrogênio do combustível em três razões combustível/ ar (0,8; 1.0 e 1,2)	p.26
Figura 5: Esquema simplificado da conversão do nitrogênio do carvão	p.28
Figura 6: Efeito do excesso de ar no carbono presente nas cinzas	p.30
Figura 7: Seção de condições operacionais e atmosféricas do <i>software</i> GERCOM ..	p.37
Figura 8: Seção de combustíveis do <i>software</i> GERCOM	p.38
Figura 9: Seção de resultados do <i>software</i> GERCOM	p.39
Figura 10: Influência da temperatura de saída da caldeira na eficiência térmica	p.40
Figura 11: Esquema simplificado da caldeira em estudo	p.43
Figura 12: Analisador de gases de combustão Greenline MK2	p.44
Figura 13: Análise elementar média do carvão de uma única mineradora	p.49
Figura 14: Análise imediata média dos carvões usuais de operação da usina	p.50
Figura 15: Histórico do poder calorífico dos carvões	p.51
Figura 16: Influência do teor de enxofre do carvão na emissão de SO ₂	p.54
Figura 17: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 50 MW	p.56
Figura 18: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 33 MW	p.58
Figura 19: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 50 MW	p.60
Figura 20: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 33 MW	p.62

Figura 21: Influência do excesso de ar na presença de carbono na cinza leve	p.64
Figura 22: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o CO ₂	p.68
Figura 23: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o CO	p.69
Figura 24: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o NO	p.69
Figura 25: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para a H ₂ O	p.70
Figura 26 - Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o O ₂	p.70
Figura 27: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o SO ₂	p.71
Figura 28: Valores medidos <i>versus</i> valores calculados para o N ₂	p.71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões nacionais de qualidade do ar	p.18
Tabela 2: Medições realizadas pelo analisador de gases	p.45
Tabela 3: Análise elementar do carvão de uma única mineradora	p.47
Tabela 4: Análise elementar dos carvões usuais de operação	p.47
Tabela 5: Análise imediata do carvão de uma única mineradora	p.48
Tabela 6: Análise imediata dos carvões usuais de operação	p.48
Tabela 7: Influência do teor de enxofre do carvão na emissão de SO ₂	p.53
Tabela 8: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 50 MW	p.56
Tabela 9: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 33 MW	p.58
Tabela 10: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 50 MW.....	p.59
Tabela 11: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 33 MW.....	p.61
Tabela 12: Influência do excesso de ar na presença de carbono na cinza leve	p.64
Tabela 13: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 17/04 ..	p.65
Tabela 14: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 14/05 ..	p.66
Tabela 15: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 18/05 ..	p.66
Tabela 16: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 29/05 ..	p.67

RESUMO

O processo de combustão é uma tecnologia antiga, o qual ainda fornece mundialmente o maior suporte de energia para as operações industriais, transformando energia química em energia térmica e sendo acompanhada, em geral, pela formação de gases poluentes. No presente trabalho foi estudada a influência do tipo de carvão e condições de operação no processo de combustão, através do desenvolvimento de um modelo de gerenciamento da combustão, para o qual foi desenvolvido um *software* específico, e também mediante a realização de testes experimentais na planta industrial de uma usina termelétrica de queima de carvão pulverizado. Foram estudadas as emissões dos poluentes SO_2 e NO como uma função da composição do carvão e também realizou-se experimentos onde variou-se individualmente o coeficiente de excesso de ar, analisando-se assim a influência desta variável nas emissões de CO e NO e na presença de carbono nas cinzas. Verificou-se, através da análise dos gases de combustão, que a emissão de SO_2 é diretamente proporcional ao teor de enxofre do carvão. Nos testes experimentais, observou-se que o excesso de ar exerce uma pequena influência na formação do NO total proveniente da combustão de carvão, sendo que um aumento desta variável diminui a emissão do NO . Em relação à emissão de CO , houve uma formação significativa deste poluente quando se utilizou um excesso de ar abaixo de 25% e a presença de carbono não queimado na cinza leve também foi diretamente influenciada pelo controle do excesso de ar. Comparando-se os resultados das análises dos gases de combustão medidos na planta industrial com os valores calculados pelo *software* GERCOM 1.0, verificou-se uma excelente concordância, confirmando a validade do modelo de gerenciamento.

ABSTRACT

Combustion process is an old technology, which still gives the greatest energy support to industrial operations worldwide, transforming chemical energy in thermal energy and being accompanied, in general, by the formation of pollutant gases. In the present work, the type of coal and the operational conditions in the combustion process were studied, through the development of a combustion management model, where specific software was developed, and also through experimental tests in a pulverized-coal-fired power plant. Pollutant emissions of SO₂ and NO were studied as a function of the coal composition and experiments were also carried out where the air excess coefficient was varied individually, analyzing this way, the influence of this variable in the emissions of CO and NO and in the presence of carbon in ashes. Through the analysis of combustion gases, the emission of SO₂ was verified to be directly proportional to sulphur content in the coal. In the experimental tests, the air excess was observed to have a small influence in the total NO formation coming from the coal combustion, and an increase of this variable decreases the NO emission. Concerning CO emission, there was a significant formation of this pollutant when an air excess under 25% was utilized and the presence of not burned coal in the light ash was also directly influenced by the air excess control. Comparing the results of the combustion gases analyses measured in the plant with the values calculated by the software GERCOM 1.0, an excellent concordance was verified, confirming the validity of the management model.

1 INTRODUÇÃO

A combustão é uma reação química utilizada há mais de um milhão de anos para a geração de energia. Atualmente, aproximadamente 90% de toda energia gerada no mundo é obtida a partir da combustão, o que justifica o crescente interesse pela pesquisa neste processo [1].

Nas usinas termelétricas, a principal operação térmica é a queima de combustíveis fósseis, principalmente o carvão mineral, o qual é o combustível mais abundante, mas também o mais poluente. A poluição industrial é a principal preocupação ambiental relacionada à queima de combustíveis, devido à decorrente emissão de poluentes atmosféricos, tais como NO_x, SO_x, CO, compostos orgânicos voláteis e material particulado.

Em função da crescente utilização de combustíveis fósseis, como o carvão, para a geração de energia, grandes esforços estão sendo feitos para conseguir-se amenizar os efeitos ambientais, sendo o modo mais eficiente e econômico de redução das emissões de poluentes a otimização dos processos de combustão [2].

Um trabalho recente, realizado em uma indústria de grande porte de Santa Catarina [3], mostrou que este tipo de estudo também pode contribuir significativamente para a redução do consumo de combustível.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho teve por objetivo estudar a influência da qualidade do carvão e das condições de operação no processo de combustão de carvão mineral, através do desenvolvimento de um modelo de gerenciamento da combustão e mediante a realização de testes experimentais na planta industrial de uma usina termelétrica.

2.2 Objetivos Específicos

Estudar as emissões dos poluentes SO_2 e NO como uma função da composição do carvão e também realizar testes de combustão para avaliar a influência da variável excesso de ar nas emissões de CO e NO e na presença de carbono nas cinzas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O Processo de Combustão

As reações de combustão são reações químicas que ocorrem quando os elementos presentes em um combustível reagem com o oxigênio, desprendendo grande quantidade de calor. O oxigênio necessário para a combustão é proveniente, geralmente, do ar atmosférico, o qual é constituído por cerca de 21% de O_2 e 79% de N_2 em volume.

O calor liberado na combustão completa de um combustível é aproveitado, em sua maioria, no aquecimento de um fluido, por exemplo da água, em um gerador de vapor.

A análise energética de um sistema de combustão (Figura 1) considera a energia liberada pela reação, a energia associada aos fluxos de combustível e ar e as perdas de energia com os gases de exaustão, cinzas, combustão parcial, purgas e fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento [4].

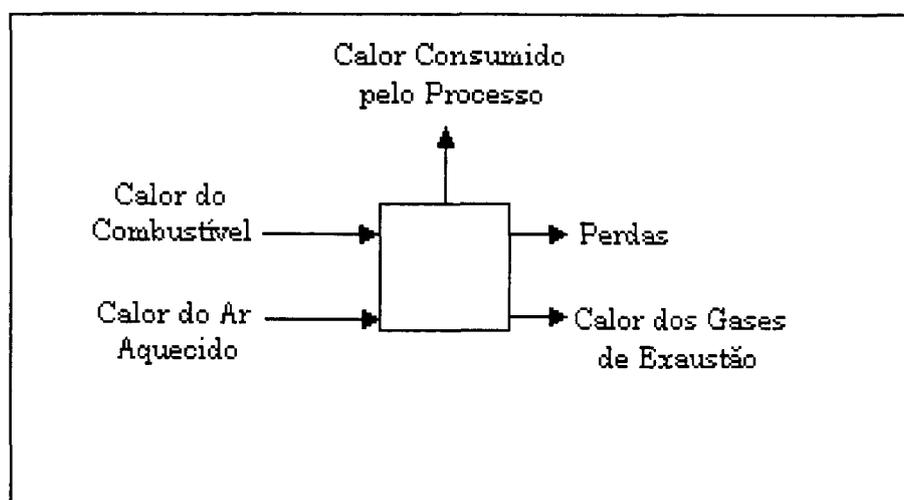
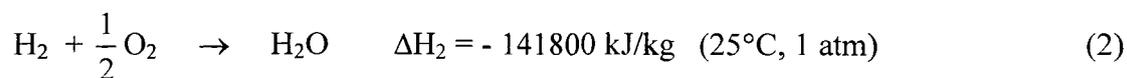


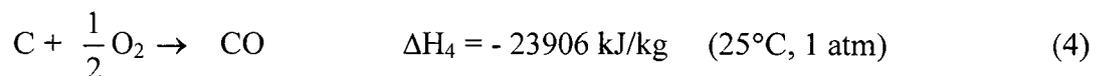
Figura 1: Esquema da análise energética do processo de combustão [5]

A maioria dos combustíveis industriais é composta principalmente de carbono, hidrogênio e, em alguns casos, de enxofre. A combustão completa é obtida quando o carbono queima convertendo-se em dióxido de carbono, o hidrogênio em água e o enxofre em dióxido de enxofre, sendo a quantidade de calor liberada em cada reação denominada de calor de combustão:



A combustão é incompleta quando nos produtos resultantes desta reação aparecem substâncias combustíveis, como por exemplo carbono nas cinzas, escórias e fuligem; gases combustíveis como monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos gasosos na fumaça [6].

A reação de combustão incompleta do carbono presente no combustível é representada pela equação:



Qualquer combustível industrial requer, de acordo com a sua composição, uma quantidade mínima de ar ($m_{AR\ min}$) que fornece o oxigênio suficiente para a combustão completa dos elementos presentes no combustível, dada por:

$$m_{AR\ min} = \left(\frac{100}{23,2} \right) \left[\left(\frac{32}{12} \right) x_C + 8 x_H - x_O + x_S \right] \quad (5)$$

onde,

x = Teores dos elementos químicos presentes no combustível [7].

A quantidade mínima de ar se refere a um consumo de ar teórico, correspondente a uma combustão ideal, na qual todas as partículas de combustível e oxigênio reagem completamente. Em condições reais, entretanto, em vista da dificuldade de contato perfeito entre as moléculas de combustível e oxigênio do ar, se utiliza na combustão uma quantidade de ar superior àquela calculada teoricamente.

A relação entre a quantidade real de ar utilizada e a quantidade mínima de ar calculada recebe o nome de coeficiente de excesso de ar (e). Logo,

$$e = \frac{m_{AR\ real}}{m_{AR\ min}} \quad (6)$$

Com esta definição, tem-se $e = 1$ para combustão estequiométrica, $e > 1$ para combustão com excesso de ar e $e < 1$ para combustão com deficiência de ar [8].

O ar necessário à combustão é classificado em ar primário e ar secundário. O ar primário é aquele que é misturado previamente com o combustível, controlando a taxa de combustão e determinando a quantidade de combustível que pode ser queimado. O ar secundário é aquele que envolve a chama e controla a eficiência da combustão através da queima do combustível na sua totalidade [3].

3.2 A Termodinâmica da Combustão

3.2.1 O Poder Calorífico de um Combustível

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada pela combustão completa do combustível, por unidade de massa (kcal/kg) ou de volume (kcal/m³) e nas condições normais de temperatura e pressão. Se esta quantidade de calor é obtida com os produtos de combustão na fase gasosa, obtém-se o poder calorífico inferior (PCI). Por outro lado, se a água nos produtos de combustão for considerada na fase líquida, ou seja, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, o calor liberado é denominado poder calorífico superior (PCS) [9].

O poder calorífico de um combustível é utilizado para o cálculo da potência liberada nas câmaras de combustão, da temperatura adiabática de chama e rendimentos energéticos [10].

Além disso, o poder calorífico sintetiza a análise elementar do combustível, uma vez que o mesmo pode ser calculado pela expressão:

$$PCS = 8100 \cdot x_C + 34400 \cdot \left(x_H - \frac{x_O}{8} \right) + 2500 \cdot x_S \quad (7)$$

onde:

PCS = Poder Calorífico Superior [kcal/kg]

x = Fração mássica de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre no combustível.

3.2.2 A Temperatura Adiabática de Chama

A temperatura adiabática de chama (T_{ad}) é definida como a temperatura máxima que seria atingida pelos gases de combustão, considerando-se a fornalha como um sistema adiabático e em condições de combustão completa, sendo calculada pela equação:

$$T_{ad} = T_{ref} + \frac{q_d}{M_g \cdot c_{pg}} \quad (8)$$

onde:

T_{ref} = Temperatura de referência (K)

q_d = Energia disponível na câmara de combustão (kcal/h)

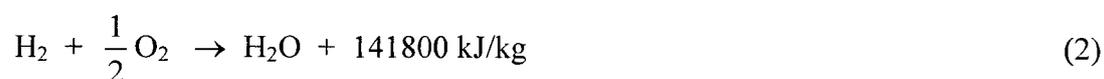
M_g = Vazão mássica dos gases de combustão (kg/h)

c_{pg} = Calor específico médio dos gases de combustão (kcal/kg.K)

Na prática, entretanto, a temperatura adiabática de chama nunca é atingida em função da combustão parcial do combustível e pelo fenômeno da dissociação [7].

3.2.3 O Fenômeno da Dissociação

A reação de combustão do hidrogênio presente no combustível, que se verifica com liberação de energia química em forma de calor:



é acompanhada da reação em sentido contrário, denominada de reação de dissociação da água, a qual se verifica com absorção de iguais parcelas de calor:



Nestas condições, durante a combustão do hidrogênio forma-se água, elevando-se a temperatura que, por sua vez, propicia a reação em sentido inverso, a qual limita a temperatura de combustão atingida.

A temperatura máxima é obtida quando a reação de combustão do hidrogênio termina, isto é, quando a reação química se verifica com a mesma velocidade tanto em um sentido como no outro:



Diz-se então que a reação atingiu o seu “equilíbrio químico”.

Nas condições de equilíbrio químico, a proporção entre as quantidades da substância reagente pode ser calculada a partir da constante de equilíbrio, a qual é função unicamente da temperatura atingida [8].

A constante de equilíbrio (K_p) é obtida utilizando-se as expressões:

$$\Delta G = - RT \cdot \ln K_p \quad (11)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (12)$$

onde:

ΔG = Energia livre de Gibbs (kcal/kgmol)

ΔH = Entalpia da reação (kcal/kgmol)

ΔS = Entropia (kcal/kgmol.K)

T = Temperatura da reação (K)

R = Constante universal dos gases (1,987 kcal/kgmol.K)

Os produtos da combustão que podem sofrer dissociação são o CO_2 , H_2O e N_2 , devendo-se levar em consideração, para temperaturas de combustão elevadas, a redução da liberação de energia química que estas reações ocasionam [11].

3.3 A Combustão de Sólidos

A combustão de sólidos se diferencia da combustão de gases e líquidos pela dependência de um maior número de parâmetros operacionais. Na combustão de gases os parâmetros mais importantes são a temperatura e a mistura entre os gases ou vapores regentes, enquanto na combustão de líquidos o diâmetro de gotas também passa a ser um parâmetro relevante. Na combustão de sólidos outros parâmetros, além dos citados, assumem importância, como umidade, teor de voláteis, geometria, porosidade da partícula, velocidade relativa gás-sólido, etc [1, 10].

3.3.1 Mecanismos de Combustão de Sólidos

Todos os combustíveis sólidos, em geral, ao entrarem em um região de combustão, passam pelas etapas de aquecimento, secagem, pirólise e combustão, sendo que a relevância de cada uma delas varia de acordo com o combustível sólido considerado.

Uma partícula ao ser colocada em uma região de combustão inicialmente troca calor por convecção e radiação com os gases quentes e sofre aquecimento.

Se esta partícula estiver dentro de uma câmara de combustão ela também troca calor por radiação com as paredes desta câmara. Quando a temperatura da superfície atinge a temperatura de saturação da água presente no sólido, inicia-se a etapa de secagem.

Um sólido orgânico seco, ao sofrer aquecimento contínuo, começa a sofrer decomposição térmica, conhecida como pirólise, a partir de uma certa temperatura. A fração volátil do combustível sólido se decompõem em compostos gasosos de baixo peso molecular (CO_2 , H_2O , CH_4 , H_2 , CO etc.) e vapores complexos de elevado peso molecular, denominados alcatrão. Os produtos de pirólise normalmente impedem a entrada de gases reagentes, como o oxigênio, no interior da partícula. Desta forma a combustão do resíduo carbonoso, resultante da pirólise da partícula, somente tem início após completada a etapa de pirólise. Os produtos de pirólise, por conterem produtos combustíveis, queimam do lado externo da partícula, auxiliando no seu aquecimento.

A partir do fim da pirólise, quando os fluxos de gases e vapores saindo da partícula se reduzem drasticamente, o oxigênio e outros gases reagentes podem entrar no interior do resíduo carbonoso e reagir com os componentes sólidos. O mecanismo predominante, nesta etapa, diferentemente das etapas de aquecimento, secagem e pirólise, é o de difusão dos gases reagentes presentes na atmosfera da câmara de combustão. Dependendo do teor e das propriedades da cinza do combustível sólido, pode-se imaginar dois modelos de combustão de resíduos carbonosos de sólidos: o de núcleo não reagido e o de núcleo exposto.

No modelo de núcleo não reagido existe uma camada de cinza ao redor da partícula, através da qual os gases têm de se difundir antes de atingir a região carbonosa, representando uma resistência adicional à sua difusão. Carvões minerais com elevados teores de cinza normalmente seguem este modelo.

No modelo de núcleo exposto quase não se observa a formação de uma camada de cinza sobre a partícula, como no caso de carvões onde o teor de cinzas é muito baixo.

A reação do carbono com oxigênio, em condições normalmente encontradas em queimadores de sólidos, é muito rápida, ocorrendo praticamente na superfície da partícula de carvão. O oxigênio praticamente não penetra no interior da partícula, sendo totalmente consumido na superfície e levando a uma diminuição da espessura da camada de carvão ao longo da combustão. No caso do modelo de núcleo não reagido a combustão do material carbonoso da partícula é acompanhada por um aumento de espessura da camada de cinza [1, 10].

3.3.2 A Combustão de Carvão

3.3.2.1 O Carvão Mineral

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

O carvão encontra-se distribuído por toda a crosta terrestre, com incidências superficiais ou profundas e com vários graus de pureza. O maior ou menor grau de pureza decorre de como se processou a mistura dos materiais celulósicos com as substâncias minerais [6].

O carvão fóssil tem suas características extremamente variáveis, principalmente levando-se em conta o teor de enxofre e de cinzas, os quais não são desejáveis por implicarem em uma série de problemas ambientais. Na Europa e nos Estados Unidos consegue-se um carvão com baixo teor de cinzas, inferior mesmo a 5%. No Brasil, cujas reservas de carvão situam-se principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em diversas minas o carvão apresenta teores de cinzas superiores a 40% [7].

3.3.2.2 Os Processos Industriais de Combustão de Carvão

Industrialmente existem três processos de combustão de carvão: a combustão em leito fixo, a combustão em leito fluidizado e a combustão em suspensão ou combustão de carvão pulverizado, sendo esta última estudada no presente trabalho [12].

3.3.2.2.1 A Combustão em Leito Fixo

Na combustão em leito fixo, utiliza-se uma granulometria do carvão na faixa de 1 a 10 cm para sua queima sobre grelhas, formando um leito fixo por onde passa o ar de combustão. Este processo se caracteriza por uma queima lenta [12].

3.3.2.2.2 A Combustão em Leito Fluidizado

Na combustão em leito fluidizado, as especificações granulométricas para a queima do carvão devem ser menores que 10 mm. As vantagens deste processo se resumem na eficiência verificada na queima do carvão e fácil controle da poluição ambiental. A combustão em leito fluidizado adapta-se muito bem para a queima de carvões com elevados teores de cinza.

No entanto, alguns estudos complementares ainda são necessários para um melhor entendimento deste processo, sendo este o fator limitante ao seu uso [12].

3.3.2.2.3 A Combustão de Carvão Pulverizado

O carvão pulverizado tem se apresentado como uma alternativa vantajosa para o uso no campo da termelétricidade. A combustão de carvão pulverizado ou combustão do carvão em suspensão se processa com maior velocidade que a combustão em grelhas, sendo o carvão finamente pulverizado, com granulometria abaixo de 0,1 mm. As temperaturas alcançadas no processo são mais homogêneas, facilitando a construção de grandes caldeiras [12].

Os queimadores de carvão pulverizado têm sido projetados evitando contatos da chama com as paredes da fornalha e sempre garantindo uma mistura rigorosa com o ar de combustão. O uso de carvão pulverizado exige, entretanto, alguns cuidados especiais com a estabilidade de chama e com a sua preparação, envolvendo o emprego de esteiras transportadoras, silos, moinhos e sistemas complementares de operação, conforme o esquema apresentado na Figura 2.

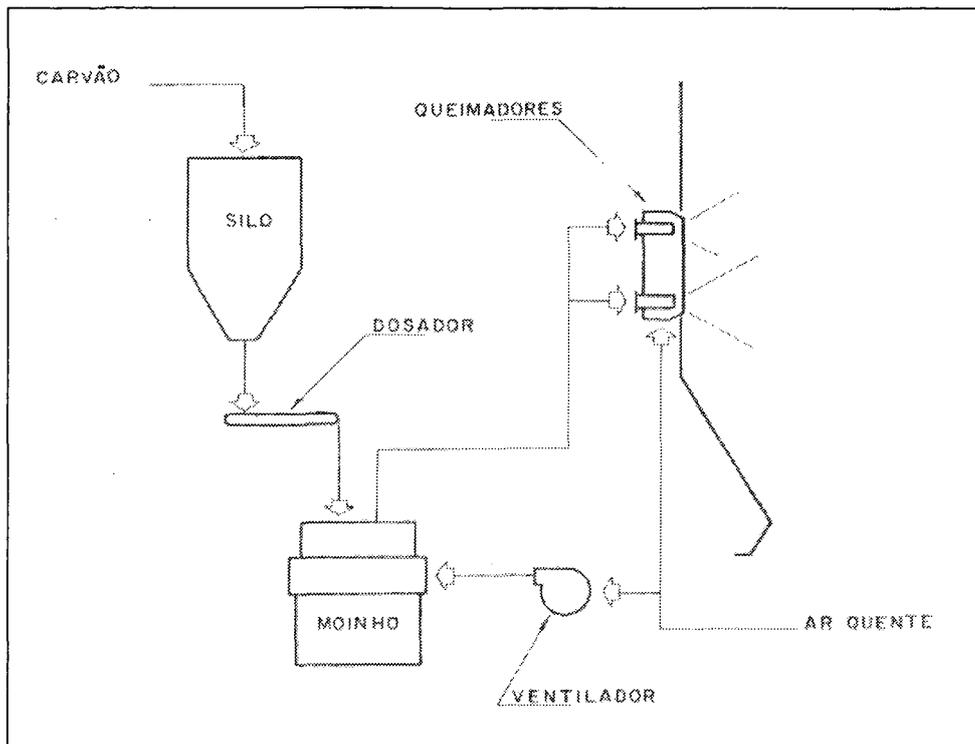


Figura 2: Esquema simplificado do processo de moagem e transporte de carvão pulverizado [7]

O ar utilizado na queima de carvão pulverizado é normalmente pré-aquecido pelos gases de combustão. Uma parte desse ar (ar primário) é desviado para transportar o pó de carvão do moinho para os queimadores, apropriadamente distribuídos nas paredes da fornalha.

Naturalmente que a opção por fornalhas de carvão pulverizado envolve investimentos adicionais com os equipamentos de moagem de carvão e com a remoção de cinzas arrastadas com os gases de combustão. Além disso, são significativos os custos adicionais com a operação e manutenção desses equipamentos.

Diversos tipos de queimadores estão disponíveis no mercado. A Figura 3 mostra o esquema de um queimador de carvão pulverizado que permite ainda o uso de óleo como combustível auxiliar. O pó de carvão, juntamente com o ar primário, é projetado de encontro ao ar secundário, diretamente na câmara de combustão. O ar primário compreende aproximadamente 20% de todo o ar utilizado na combustão.

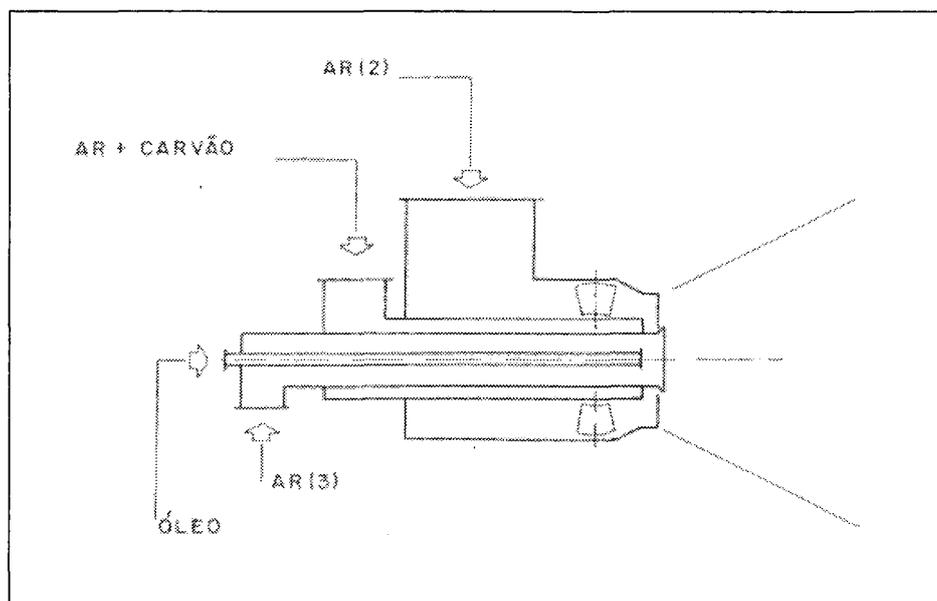


Figura 3: Queimador de carvão pulverizado [7]

A manutenção das condições de operação desejadas é um constante problema de ajuste ou de equilíbrio da unidade. Qualquer flutuação na demanda de vapor, por exemplo, tende a alterar a temperatura de saída dos gases de combustão [7].

A combustão de carvão para a geração de energia resulta também em problemas ambientais, em particular a emissão de óxidos de enxofre e nitrogênio, os quais estão envolvidos na formação de chuva ácida, além de cinzas e fuligem [13].

3.3.2.3 Emissão de Poluentes no Processo de Combustão

Rigorosamente é impossível atingir-se as condições para a combustão completa em processos reais e, conseqüentemente, além de CO_2 e H_2O , são formados e emitidos ao meio-ambiente alguns poluentes atmosféricos.

Assim, os processos de combustão produzem e emitem normalmente os seguintes poluentes atmosféricos: óxidos de enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e outros produtos de combustão incompleta [9].

3.3.2.3.1 Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar determinam os valores limites legais para as concentrações de poluentes no meio ambiente, sempre medidas em um certo período. Em cada país, a legislação sobre a poluição do ar estabelece tais limites.

No Brasil, a primeira legislação acerca do assunto surgiu em 1976 e estabeleceu padrões de qualidade do ar para os poluentes dióxido de enxofre, monóxido de carbono e partículas em suspensão. Posteriormente, em 1990, uma nova resolução, em vigor até hoje, ampliou o número de poluentes atmosféricos a serem controlados e estabeleceu padrões primários e secundários de qualidade do ar. Tais padrões são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Padrões nacionais de qualidade do ar [14]

Poluentes	Tempo de Amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas Totais em Suspensão	24 horas [*] MGA ^{**}	240 80	150 60
Dióxido de Enxofre	24 horas [*] MAA ^{***}	365 80	100 40
Monóxido de Carbono	1 hora [*] 8 horas [*]	40000 10000	40000 10000
Ozônio	1 hora [*]	160	160
Fumaça	24 horas [*] MAA ^{***}	150 60	100 40
Partículas Inaláveis	24 horas [*] MAA ^{***}	150 50	150 50
Dióxido de Nitrogênio	1 hora [*] MAA ^{***}	320 100	190 100

* Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

** Média Geométrica Anual

*** Média Aritmética Anual

Padrões primários de qualidade do ar são definidos como sendo as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, enquanto padrões secundários se referem às concentrações abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre a população e o meio ambiente em geral. Os primeiros são tidos como metas a serem atendidas a curto e médio prazo e os segundos como metas a longo prazo [14].

3.3.2.3.2 Óxidos de Enxofre

O enxofre é uma impureza encontrada na maioria dos combustíveis líquidos e sólidos usuais, principalmente em frações pesadas da destilação do petróleo e em carvões minerais.

Durante o processo de queima destes combustíveis, o enxofre reage com o oxigênio, se convertendo em sua maioria a SO₂, segundo a equação:



A formação de SO₃ pode ocorrer em duas regiões principais de um equipamento de combustão: no interior da chama e nas superfícies onde existem depósitos provenientes de impurezas do combustível, como as cinzas, os quais atuam como catalisadores da reação de oxidação de SO₂ a SO₃:



Esta reação ocorre também na atmosfera e é ativada pelos raios ultravioleta do sol [10].

Nas partes mais frias do processo ou após o efluente gasoso ter sido emitido para a atmosfera, a umidade dos gases ou do ar atmosférico reage com o trióxido de enxofre, produzindo ácido sulfúrico:



O ácido sulfúrico pode levar a taxas de corrosão elevadas nas superfícies metálicas localizadas no interior de equipamentos de combustão.

Esses compostos de enxofre, efluentes da região onde ocorre a combustão, quando não são removidos em sistemas de limpeza de gases, são lançados para a atmosfera. Os gases ácidos de enxofre são um dos principais causadores da chuva ácida, juntamente com os óxidos de nitrogênio. A emissão de óxidos de enxofre é altamente indesejável e seu controle e prevenção tem dispensado grandes esforços em tecnologia e investimentos.

Na queima de combustíveis contendo enxofre não há como evitar a formação de seus óxidos. O controle ambiental é feito através da absorção dos gases ácidos em uma corrente nebulizada de líquido alcalino, através de lavadores de gases, e neutralizando-os em sulfatos e sulfitos. Em alguns casos especiais, a absorção é feita utilizando-se a tecnologia de combustão em leito fluidizado com a adição de calcário, absorvendo o enxofre em meio sólido, no interior da câmara de combustão, através da produção de sulfatos [9].

3.3.2.3.3 Monóxido de Carbono

A formação de monóxido de carbono (CO) decorre da reação de oxidação parcial do carbono presente no combustível e depende principalmente de dois fatores: excesso de ar e mistura ar/combustível.

Os combustíveis sólidos são os que apresentam maior dificuldade de mistura com o ar de combustão e, conseqüentemente, requerem mais excesso de ar em relação aos demais combustíveis líquidos e gasosos [15].

Traçando perfis de concentração, Jones [16] verificou que a distribuição das emissões de CO nos gases de combustão dependia, basicamente, da razão ar/combustível empregada. Verificou também que uma das razões do aumento das emissões de CO era conseqüência do aumento no fluxo de combustível na reação de combustão.

Particularmente o monóxido de carbono apresenta o inconveniente adicional referente a efeitos fisiológicos. Concentrações superiores a 500 ppm (0,05%) passam a ter um efeito nocivo sobre os seres humanos. Seu maior problema é ser cumulativo e degenerativo no organismo humano, reagindo com a hemoglobina do sangue e matando a célula em um período relativamente pequeno de tempo[7].

O monóxido de carbono nos gases de chaminé pode ser medido continuamente com um analisador infravermelho ou, se a razão ar/combustível for ajustada para manter-se constante o teor de CO nestes gases, então o teor de oxigênio medido pode ser indicativo das condições dos queimadores em uma dada carga [2].

3.3.2.3.4 Óxidos de Nitrogênio

As emissões de óxidos de nitrogênio a partir da combustão de carvão são um dos principais problemas ambientais, uma vez que as mesmas contribuem para a formação de chuva ácida [17]. Como estes óxidos são predominantemente óxidos nítricos (NO), com uma pequena fração, usualmente menor do que 5%, aparecendo como dióxido de nitrogênio (NO₂), a soma equivalente dos óxidos de nitrogênio (NO_x) é denominada de “NO total” [18].

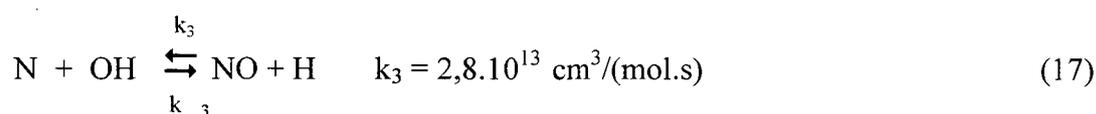
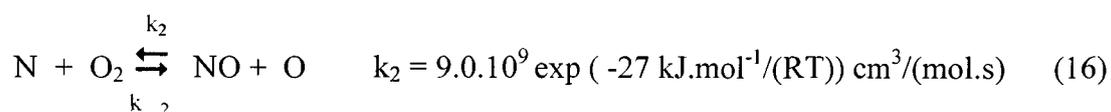
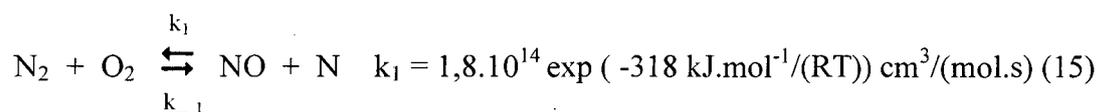
O estagiamento de ar ou de combustível é um dos métodos utilizados na redução destes poluentes formados no interior da fornalha. No entanto, para uma aplicação eficaz dos métodos para a redução das emissões de NO_x em escala industrial, os parâmetros que governam a formação de óxidos de nitrogênio devem ser conhecidos e avaliados cuidadosamente [17, 19].

As emissões de óxidos de nitrogênio da combustão de carvão são provenientes do combustível e do ar utilizado, a partir de três processos distintos: combinação de nitrogênio atmosférico e oxigênio a altas temperaturas (NO térmico); reações de radicais hidrocarbônicos derivados do combustível com N₂ (NO ativo) e oxidação do nitrogênio quimicamente ligado ao combustível (NO combustível). O NO térmico é altamente dependente da temperatura, mas é usualmente insignificante em temperaturas abaixo de 1800 K, podendo ser minimizado por abaixamento da temperatura de chama e redução do teor de oxigênio. O NO ativo ocorre em ambientes de chamas ricas e com pequenos tempos de residência. A principal fonte, entretanto, de produção de NO a partir da combustão de carvão pulverizado é o nitrogênio do combustível [20].

Embora somente de 30 a 50% do nitrogênio do carvão seja convertido a NO, isto corresponde a uma concentração de NO nos gases de combustão de 200 a 800 ppm, em comparação com menos de 50 ppm do NO térmico. Esta é a razão pela qual a maioria dos estudos recentes, relativos à combustão de carvão pulverizado, têm se dedicado a identificar os mecanismos dos processos de conversão do nitrogênio do carvão a NO, negligenciando a formação de NO térmico [21].

3.3.2.3.4.1 NO Térmico

O NO térmico é formado a partir das seguintes reações elementares propostas pelo mecanismo de Zeldovich [1]:



A taxa de formação de NO é dada pela equação:

$$\frac{d[\text{NO}]_r}{dt} = 2 \cdot k_1 \cdot [\text{NO}][\text{N}_2] \left\{ \frac{1 - [\text{NO}]^2 / K \cdot [\text{O}_2][\text{N}_2]}{1 + k_{-1} \cdot [\text{NO}] / k_2 \cdot [\text{O}_2] + k_3 \cdot [\text{OH}]} \right\} \quad (18)$$

onde $K = (k_1/k_{-1})(k_2/k_{-2})$ é a constante de equilíbrio para reação entre N_2 e O_2 .

O NO térmico é altamente dependente da temperatura, linearmente dependente da concentração de oxigênio e associado com longos tempos de residência. A formação de NO térmico só ocorre à altas temperaturas (≈ 1700 K) na chama, e é considerada insignificante durante a combustão de carvão, por exemplo, em leitos fluidizados a 1300 K [1,22].

3.3.2.3.4.2 NO Ativo

O NO ativo é formado a partir de reações do N_2 com radicais hidrocarbônicos derivados do combustível, em regiões próximas da zona da chama. Este tipo de NO ocorre em chamas ricas e está associado com pequenos tempos de residência. Várias espécies resultantes do combustível, por exemplo CH, CH_2 , C_2 , C_2H e C tem sido identificadas como os precursores da formação de NO ativo.

Os principais contribuintes, no entanto, são considerados os radicais CH e o CH_2 :



Os produtos da reação anterior podem levar à formação de aminas e compostos cianídricos, os quais podem então reagir para formar o NO:



A quantidade de NO ativo formada é proporcional ao número de átomos de carbono presente na molécula do combustível hidrocarbônico [23]

3.3.2.3.4.3 NO Combustível

Na combustão de carvão pulverizado, a maior parte das emissões de óxidos de nitrogênio, aproximadamente 80%, formam-se a partir do nitrogênio ligado quimicamente ao combustível e liberado durante os diferentes estágios da combustão do carvão [17].

Em experimentos realizados por Williams et al. [23], verificou-se que quando o teor de nitrogênio do carvão aumenta, a quantidade NO produzida também aumenta, o que pode ser visualizado na Figura 4, a qual apresenta as concentrações de NO como uma função do teor de nitrogênio do combustível.

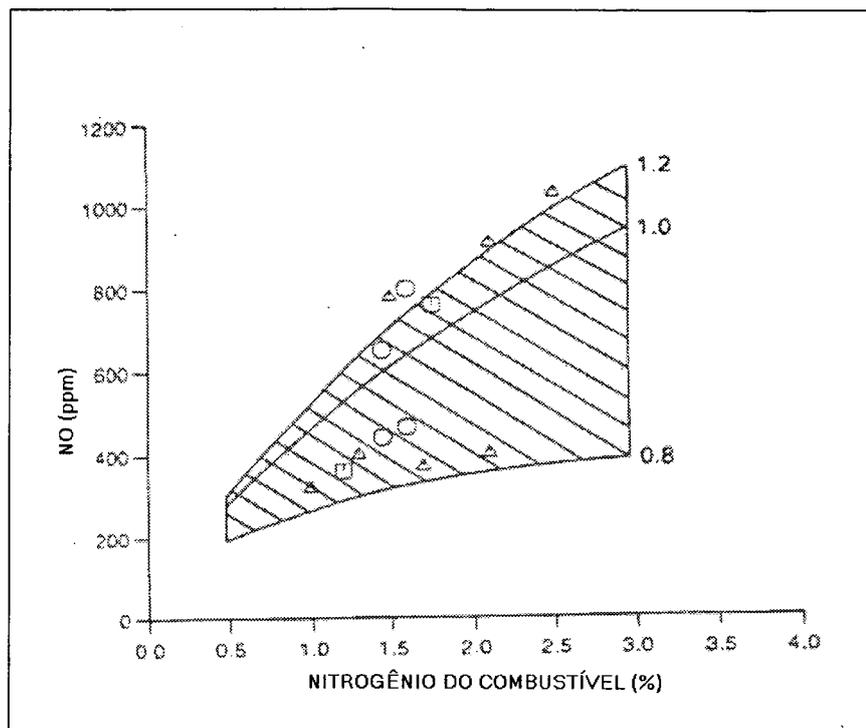


Figura 4: Comparação de dados estimados e experimentais como uma função do teor de nitrogênio do combustível em três razões combustível/ ar (0,8; 1,0 e 1,2) [23]

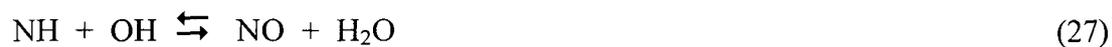
A estequiometria e a temperatura da chama são os fatores mais importantes que governam a conversão de nitrogênio do combustível a NO, embora em combustões de chamas pobres a dependência da temperatura é significativamente reduzida [23].

Sob condições de chama pobre, tem-se:





seguidas pelas reações



Dependendo do tipo, o carvão contém entre 0,5 e 2% de nitrogênio integrado na estrutura orgânica do mesmo, o qual é parcialmente convertido em óxidos de nitrogênio. Quando a partícula de carvão sofre devolatilização, o nitrogênio do carvão é particularmente liberado nos voláteis e parcialmente retido no coque. Sob condições típicas nas chamas de carvão pulverizado, a separação do nitrogênio entre o coque e os voláteis é cineticamente controlada com um aumento na temperatura e tempo de residência na zona de pirólise, favorecendo a conversão do nitrogênio volátil, principalmente do nitrogênio dos compostos na forma de ciano (-CN) e amino (-NH) [20]. A conversão do nitrogênio do carvão é esquematicamente ilustrada na Figura 5.

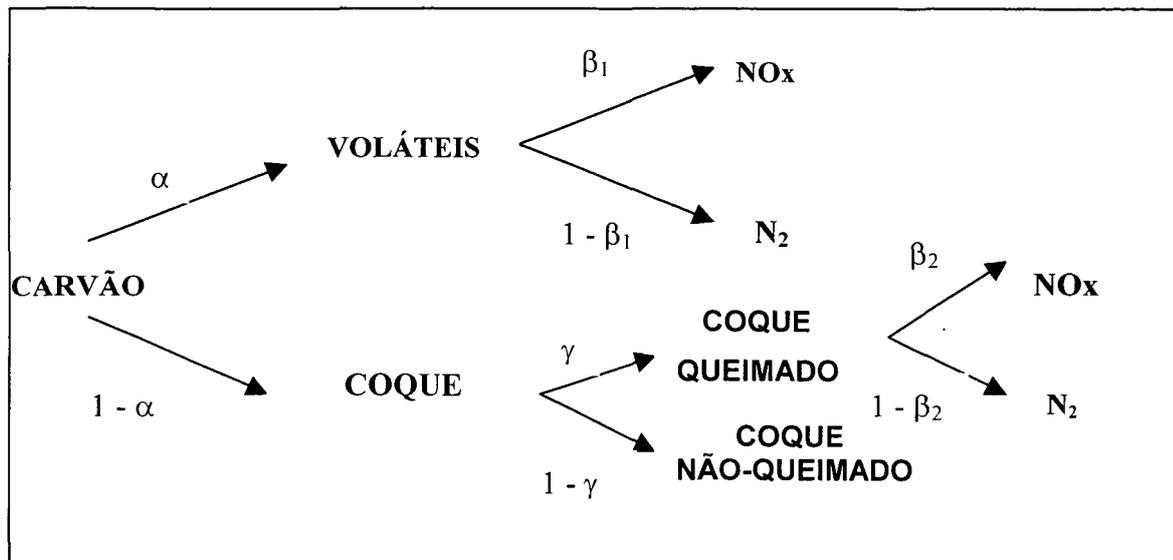


Figura 5: Esquema simplificado da conversão do nitrogênio do carvão [20]

É assumido que o nitrogênio dos voláteis e o nitrogênio do coque reagem independentemente devido a diferentes tempos de reação. A conversão global do nitrogênio do combustível a NO pode ser representada por:

$$\beta^* = \alpha \cdot \beta_1 + (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot \beta_2 \quad (29)$$

onde β^* é a conversão global do nitrogênio a NO, α é a fração de nitrogênio do carvão que é liberada nos voláteis, $(1 - \alpha)$ é a fração de nitrogênio do carvão retido no coque, γ é a fração do coque que é consumida, $\gamma \cdot \beta_2$ é a fração do nitrogênio do coque convertida a NO e β_1 é a fração do nitrogênio dos voláteis convertido a NO [20].

3.3.2.3.5 Carbono na Cinza Leve

A cinza leve é uma substância finamente dividida e produzida nas fornalhas de termelétricas de queima de carvão pulverizado. Ela é recuperada dos gases de chaminé por precipitadores eletrostáticos e outros equipamentos de controle de poluição. O principal componente da cinza leve é o SiO_2 . Entretanto, a cinza leve também contém outros óxidos diferentes (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) e carbono não queimado. As concentrações dos diferentes óxidos na cinza leve são dependentes do tipo de carvão, enquanto a quantidade de carbono depende das condições de operação da fornalha [24].

O carbono residual presente na cinza leve afeta muitos aspectos do desempenho e economia de uma usina termelétrica, incluindo a eficiência da caldeira, a operação do precipitador eletrostático e o valor de mercado da cinza leve como um subproduto rentável. Um alto teor de carbono na cinza representa uma perda de eficiência: apenas 1% de carbono não queimado em uma planta de 1000 MW pode representar aproximadamente 1 milhão de dólares em custo anual de combustível. Um alto teor de carbono também pode impedir a venda de cinza leve como matéria-prima para as indústrias de cimento ou construção civil [24, 25].

Na combustão de carvão pulverizado, as perdas apresentam um nível mínimo como uma função do oxigênio nos gases de combustão, sendo desejável operar próximo deste mínimo. Isto pode ser conseguido através do controle na caldeira das medições de oxigênio e monóxido de carbono nos gases de combustão.

Entretanto, a otimização do excesso de ar utilizando sensores de CO geralmente produz uma grande quantidade de carbono nas cinzas. Uma técnica alternativa é o controle da caldeira pela determinação do teor de carbono na cinza leve. Utilizando um sensor de carbono, a eficiência dos processos de combustão pode ser otimizada e o teor de carbono na cinza leve pode ser mantido em níveis baixos [26].

Em experimentos realizados por Hesselmann [27] com a combustão de carvão pulverizado, verificou-se que as perdas por carbono não queimado nas cinzas mostraram um acentuado aumento quando o excesso de oxigênio foi reduzido abaixo de 3%, apresentando uma menor sensibilidade quando se utilizou valores maiores de excesso de oxigênio (Figura 6).

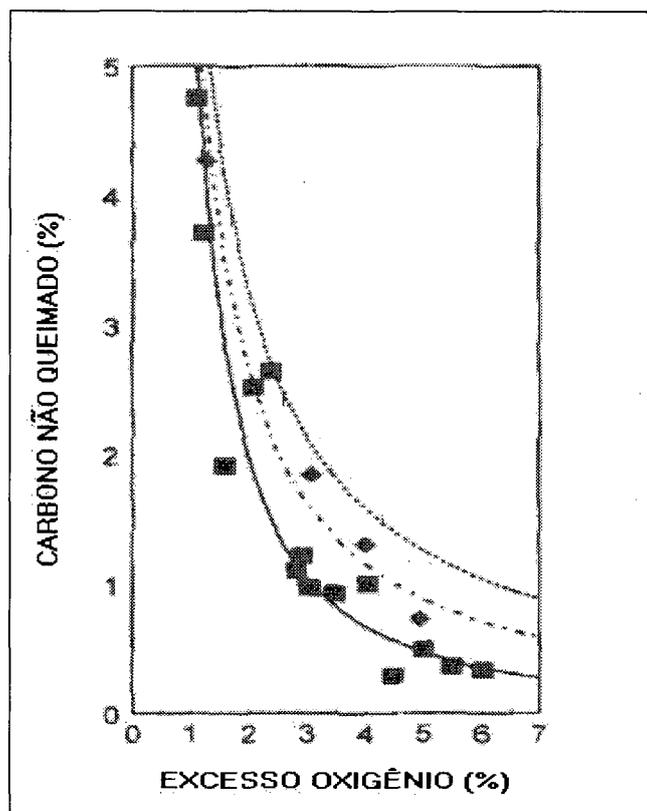


Figura 6: Efeito do excesso de ar no carbono presente nas cinzas [27]

Em estudos prévios realizados pelos autores [28], amostras de cinza leve de uma fornalha em escala piloto mostraram conter agregados esféricos, ricos em carbono e partículas microscópicas, indicando que o carbono não queimado na saída da fornalha consiste de duas morfologias de partícula distintas. Estas partículas observadas consistem de uma mistura de fuligem e coque. O coque se refere à partículas porosas ricas em carbono, as quais permanecem na fase sólida ou líquida durante toda a combustão, enquanto a fuligem se refere aos agregados ricos em carbono de partículas primárias ultrafinas produzidas a partir dos precursores na fase gasosa.

A combustão de carvão pulverizado inicia com um rápido aquecimento da partícula de combustível, seguido pela decomposição em coque e voláteis. Os voláteis em seguida se decompõem para a produção de fuligem, a qual origina uma zona luminosa, e coque, o qual continua a queimar após a combustão dos voláteis. A maioria dos estudos sobre o carbono residual na cinza leve enfocam a oxidação do coque. O tamanho das partículas de coque encontradas na cinza leve varia desde microns até o diâmetro das partículas de carvão pulverizado, dependendo da mistura e fragmentação do carvão [28].

4 METODOLOGIA

4.1 Análise de Combustíveis

Durante o período de testes, foram coletadas amostras de carvão pulverizado na entrada da caldeira em operação, em um mesmo horário fixo. Após a coleta, estas amostras eram misturadas e em seguida realizado um quarteamento, a fim de obter-se uma única amostra representativa do carvão que estava sendo queimado em cada dia de teste.

A caracterização química das amostras de carvão pulverizado foi realizada através da análise elementar (determinação de C, H, N, O e S), utilizando os equipamentos CHN-O e LECO (enxofre), da análise imediata (determinação de umidade, cinza, matéria volátil e carbono fixo) e determinação do poder calorífico superior, segundo metodologias oficiais da ABNT.

4.2 Modelo de Gerenciamento do Processo de Combustão

Visando-se o acompanhamento e controle das variáveis envolvidas no processo de combustão de carvão mineral, foi desenvolvido um modelo de gerenciamento, avaliando-se a influência no processo das propriedades do carvão e condições operacionais de queima.

O modelo de gerenciamento do processo de combustão, utilizando balanços de massa e energia, fornece ao operador as condições ideais de operação dos queimadores, a composição dos efluentes gasosos e a eficiência térmica do sistema para o combustível que está efetivamente sendo queimado.

4.2.1 Considerações do Modelo de Gerenciamento

- Operação em regime permanente;
- Pressão total constante;
- Fornalha operando em condições de mistura perfeita, desconsiderando-se os perfis de temperatura e trabalhando-se com um valor médio desta variável.

4.2.2 Equações do Modelo de Gerenciamento

4.2.2.1 Balanço de Massa

Para os cálculos do balanço de massa, considerou-se as equações de combustão dos elementos químicos presentes no combustível, no caso, carbono, hidrogênio, enxofre e nitrogênio:





Através destas equações químicas, foi possível a determinação dos fluxos mássicos dos gases de combustão, levando-se em consideração a estequiometria da reação. A vazão mássica total dos gases de combustão, em kg/h, foi obtida utilizando-se a expressão:

$$M_g = M_{\text{CO}_2} + M_{\text{SO}_2} + M_{\text{NO}} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{N}_2} + M_{\text{O}_2} \quad (31)$$

A partir dos coeficientes estequiométricos das reações de combustão e dos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre no combustível, obteve-se a massa mínima de ar necessária para a combustão completa do combustível:

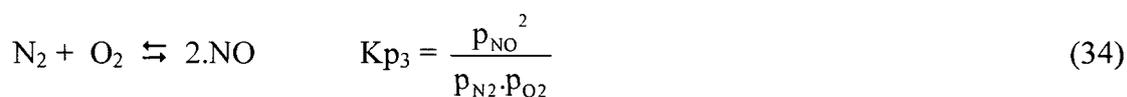
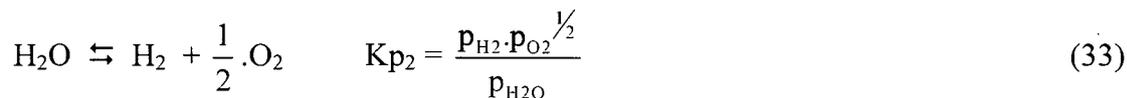
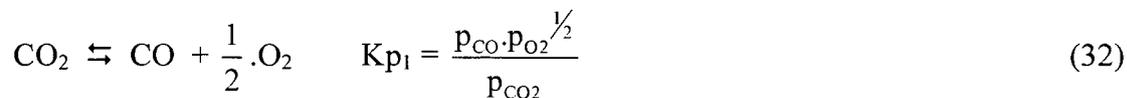
$$m_{\text{AR min}} = \left(\frac{100}{23,2} \right) \cdot \left[\left(\frac{32}{12} \right) \cdot X_C + 8 \cdot X_H - X_O + X_S \right] \quad (5)$$

sendo o coeficiente de excesso de ar dado pela expressão:

$$e = \frac{m_{\text{arreal}}}{m_{\text{ar min}}} \quad (6)$$

4.2.2.2 Balanço de Energia

Para os cálculos do balanço de energia, considerou-se a ocorrência das seguintes reações de dissociação:



As concentrações de CO_2 , CO , H_2O , H_2 , N_2 , O_2 , SO_2 e NO , no equilíbrio químico, foram calculadas considerando-se inicialmente os fluxos mássicos dos gases de combustão, calculados a partir das equações (1), (2), (3) e (29) e, em seguida, determinando-se a fração de cada gás que é dissociada em uma determinada temperatura, mediante a utilização das respectivas expressões das constantes de equilíbrio (K_p) para as equações (31) a (33).

A constante de equilíbrio foi obtida utilizando-se as expressões:

$$\Delta G = - RT \cdot \ln K_p \quad (11)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (12)$$

Para o cálculo da temperatura adiabática de chama (T_{ad}) utilizou-se a equação:

$$T_{ad} = T_{ref} + \frac{q_d}{M_g \cdot c_{Pg} + M_{CINZA} \cdot c_{PCINZA}} \quad (8)$$

sendo a energia disponível na câmara de combustão (q_d) obtida por:

$$q_d = M_{CARVÃO} \cdot PCI + M_{CARVÃO} \cdot c_{PCARVÃO} \cdot (T_{CARVÃO} - T_{REF}) + M_{AR} \cdot c_{PAR} \cdot (T_{AR} - T_{REF}) \quad (35)$$

4.2.3 *Software* do Modelo de Gerenciamento

Uma vez definido o modelo de gerenciamento da combustão, através de equações matemáticas e termodinâmicas, foi desenvolvido um *software* para esse modelo, intitulado GERCOM 1.0, o qual foi programado em linguagem Object Pascal utilizando como compilador o *software* Delphi 5.0.

O *software* GERCOM 1.0 apresenta três seções distintas: a seção de condições operacionais e atmosféricas (Figura 7), a seção de combustíveis (Figuras 8) e a seção de resultados (Figura 9).

Na seção de condições operacionais e atmosféricas, a qual é a janela principal do programa, o usuário fornece as informações relativas ao ar atmosférico e às variáveis operacionais de queima, como depressão na fornalha, temperaturas dos gases e do ar de combustão, e o excesso de ar desejado.

The screenshot displays the GERCOM 1.0 software window, which is divided into several functional panels. The top-left panel, titled 'Condições Operacionais', contains input fields for 'Depressão Fornalha' (12 mmH2O), 'Temperatura Fornalha' (1300 °C), 'Temperatura Saída Caldeira' (315 °C), 'Temperatura Ar Primário' (90 °C), 'Temperatura Ar Secundário' (290 °C), and 'Excesso Ar' (30 %). The top-right panel, 'Ar Atmosférico', shows 'Composição' (21% O2, 79% N2) and 'Umidade' (1.13804), with options for 'Teor Volumétrico' and 'Base Seca'. The bottom-left panel, 'Parâmetros da Simulação', includes a checkbox for 'Variar Condição de Operação' and a table for simulation parameters: 'Excesso de Ar' (10 to 50, 5 points). The bottom-right panel, 'Combustível', features buttons for 'Dados', 'Análise Imediata', and 'Resultados' (Exibir).

Condições Operacionais		
Depressão Fornalha	12	mmH2O
Temperatura Fornalha	1300	°C
Temperatura Saída Caldeira	315	°C
Temperatura Ar Primário	90	°C
Temperatura Ar Secundário	290	°C
Excesso Ar	30	%

Ar Atmosférico	
Composição	%
O2	21
N2	79
Umidade	1.13804

Parâmetros da Simulação		
<input type="checkbox"/> Variar Condição de Operação		
Excesso de Ar %		
Valor Inicial	Valor Final	Número de Pontos
10	50	5

Figura 7: Seção de condições operacionais e atmosféricas do *software* GERCOM

Na seção de combustíveis (Figuras 8) o usuário fornece ao programa os valores referentes às propriedades químicas do carvão mineral e condições operacionais de queima do mesmo, como vazão e temperatura.

O modelo de gerenciamento oferece a opção de realizar os cálculos através da análise elementar ou somente através da análise imediata do combustível.

The screenshot shows the 'Carvão Mineral' software window. It is divided into several sections for data entry:

- Composição do Carvão**:
 - Análise Elementar**: A table with columns for element symbols and their percentages.

C	46,29
H	3,06
O	4,09
N	0,95
S	2,01
Cinza	43,6
Σ	100
 - Análise Imediata**: A table with columns for analysis types and their percentages.

Carbono Fixo	31,6
Matéria Volátil	24,8
Cinza	43,6
Σ	100
- Umidade do Pulverizado**: Input field with value 1,318.
- Teor Mássico**: Dropdown menu set to 'Base Seca' and a percentage dropdown set to '%'. The percentage field is currently empty.
- Condições Operacionais do Carvão**:
 - Vazão**: Dropdown menu set to 'Vazão', input field with value 36, and unit dropdown set to 't/h'.
 - Base**: Dropdown menu set to 'Base Seca'.
 - Temperatura do Pulverizado**: Input field with value 90 and unit dropdown set to '°C'.
- Incombusto**:
 - Cinza Leve**: Input field with value 5.
 - Cinza Pesada**: Input field with value 10 and a percentage dropdown set to '%'. The percentage field is currently empty.
- Buttons**: 'Cancel' (with a red X icon) and 'OK' (with a green checkmark icon).

Figura 8: Seção de combustíveis do *software* GERCOM

Na seção de resultados (Figura 9) o programa, utilizando as informações requeridas nas seções anteriores, fornece ao operador do queimador as condições para melhor controlar a queima do carvão. Entre estas se destacam a vazão de ar total (ar primário + ar secundário) que garante o excesso de ar necessário, a vazão e composição dos gases de combustão e a eficiência térmica da caldeira. Nesta seção de resultados também é possível a impressão de um relatório, contendo as informações de entrada fornecidas pelo usuário e os resultados apresentados nesta janela (modelo de relatório em anexo).

RESULTADOS

Arquivo

Salvar
Configurar impressão
Imprimir
Sair

Massa específica 0,616 kg/m³

Base Úmida

Temperatura Adiabática 1807,4 °C

Composições

Composição Equilíbrio (Temperatura Fornalha)		Composição Equilíbrio (Temperatura Adiabática)	
%		%	
CO ₂	13,02126244	CO ₂	13,0076662
CO	8,55189E-4	CO	0,0134614
H ₂ O	6,50385902	H ₂ O	6,5006856
H ₂	1,40731E-4	H ₂	2,8165E-3
N ₂	75,54332081	N ₂	75,4232186
O ₂	4,63333773	O ₂	4,52629
SO ₂	0,21181792	SO ₂	0,2118007
NO	0,08540616	NO	0,314061

Teor Volumétrico Base Úmida

Ar Atmosférico

Razão Ar/Combustível 6,234 kg Ar/kg Comb

Ar Primário

Vazão 59,12 t/h

Calor Adicional 9,446E5 kcal/h

Ar Secundário

Vazão 236,49 t/h

Calor Adicional 1,574E7 kcal/h

Ar Total

Vazão 295,61 t/h

Calor Adicional 1,668E7 kcal/h

Base Úmida

Combustível

Potência Térmica 1,615E8 kcal/h

Calor Específico 0,275 kcal/kg.°C

PCI 4428,878 kcal/kg

PCS 4594,87 kcal/kg

Base Úmida

Análise Energética

Calor Total Disponível 1,789E8 kcal/h

Perdas Gases Combustão 2,464E7 kcal/h

Perdas Incombusto 1,056E7 kcal/h

Eficiência Caldeira 80,321 %

Figura 9: Seção de resultados do *software* GERCOM

Além disso, o *software* também permite, mediante visualização gráfica ou na forma de tabelas, analisar a influência das principais variáveis operacionais, como excesso de ar, pressão na fornalha, temperatura do ar primário e secundário, temperatura do carvão, temperatura da fornalha, temperatura de saída da caldeira e vazão mássica de carvão no processo de combustão.

A Figura 10 mostra a influência da temperatura dos gases de saída da caldeira na eficiência da mesma.

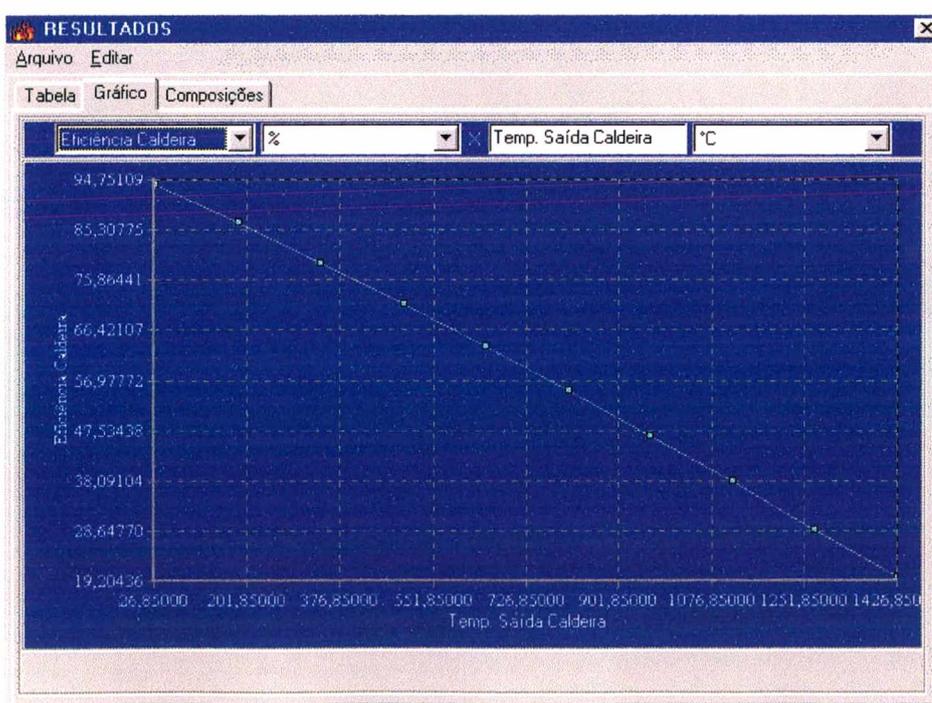


Figura 10: Influência da temperatura de saída da caldeira na eficiência térmica

4.3 Ensaio de Combustão

Os ensaios de combustão foram realizados nas dependências da Usina Termelétrica Jorge Lacerda A da GERASUL, em uma caldeira de uma unidade geradora de 66 MW. Através destes ensaios foi possível a verificação do modelo de gerenciamento da combustão e também avaliar-se a influência do tipo de carvão e condições operacionais no processo de queima, mediante a análise das emissões gasosas (produtos de combustão) e carbono não queimado presente nas cinzas.

Realizou-se experimentos em que procurou-se manter as condições operacionais constantes durante o intervalo de testes, visando-se avaliar somente a influência da composição do carvão no processo de combustão. Também realizou-se experimentos em que variou-se individualmente o excesso de ar total, procurando-se manter as demais condições operacionais constantes, analisando-se assim a influência desta variável nas emissões gasosas e carbono presente nas cinzas.

Durante o período de testes, trabalhou-se em condições de carga alta e de carga baixa na turbina, uma vez que, em função desta carga ativa, as condições operacionais na caldeira são bem distintas, o que influi no processo de combustão.

4.3.1 Planta Experimental

A caldeira em estudo é uma caldeira aquotubular equipada com um conjunto de 12 queimadores de carvão pulverizado, dispostos em quatro níveis, sendo três queimadores por nível. A capacidade máxima da caldeira é de 230 t/h de vapor superaquecido a 145 atm e 540°C. A capacidade normalmente utilizada é de cerca de 200 t/h, sendo operados três dos quatro níveis de queimadores.

O carvão consumido na caldeira é pulverizado em quatro moinhos verticais e enviado por meio de transporte pneumático até os queimadores. A cada nível da caldeira corresponde um moinho, de tal forma que cada moinho abastece três queimadores. O combustível pulverizado é alimentado juntamente com o ar primário (ar de transporte/secagem) através do centro dos queimadores. O ar primário é suprido em cada moinho pelo respectivo ventilador, sendo que esse ar é uma mistura de ar pré-aquecido com ar à temperatura ambiente. O restante do ar de combustão é suprido por dois ventiladores de ar forçado. O ar secundário é pré-aquecido, trocando calor com os gases de combustão, em dois trocadores regenerativos do tipo Ljungstrom.

A referida caldeira opera com a câmara de combustão em pressão negativa devido à ação de ventiladores de exaustão. A caldeira conta com dois ventiladores de exaustão que succionam os gases da câmara de combustão, fazendo-os passar pelos superaquecedores, reaquecedores, economizadores, pré-aquecedores de ar e precipitadores eletrostáticos e, em seguida os enviam à chaminé.

Um esquema simplificado da caldeira em estudo é apresentado na Figura 11.

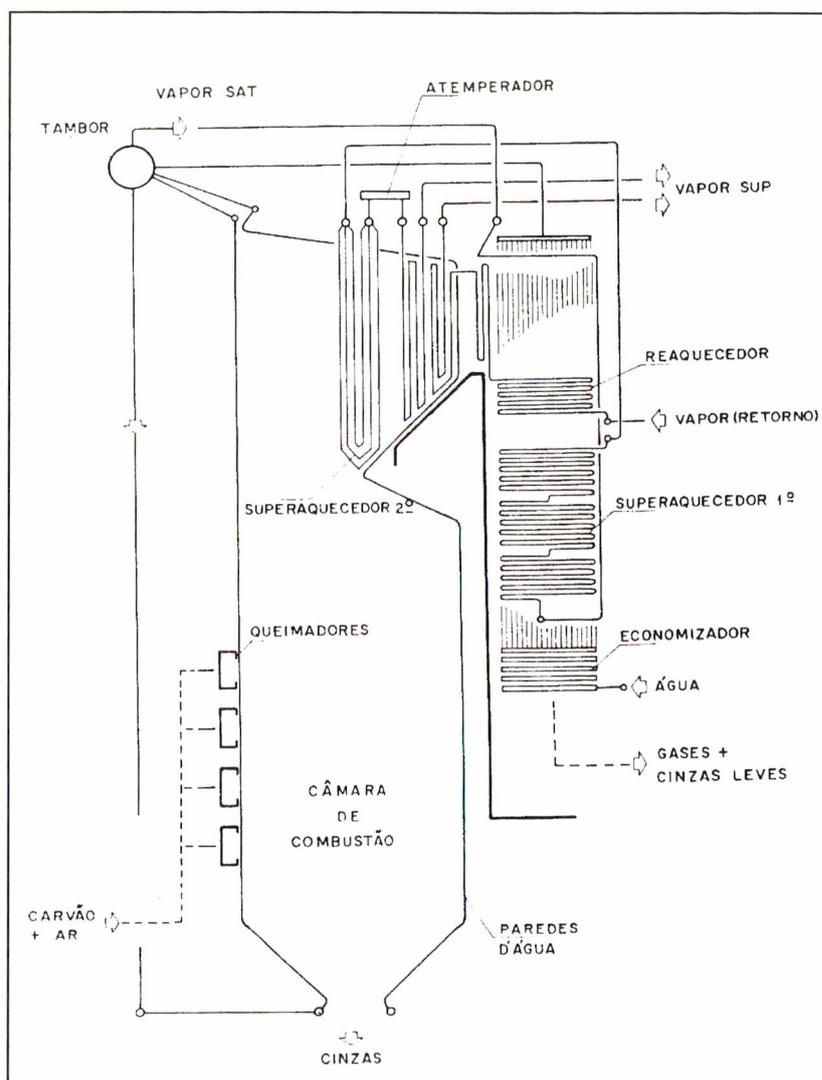


Figura 11: Esquema simplificado da caldeira em estudo

Nos testes de combustão realizados na referida caldeira, o ponto de amostragem dos gases de combustão foi saída do economizador.

4.3.2 Procedimento Experimental

A composição dos gases de combustão na saída da caldeira foi obtida através da utilização de um analisador de gases modelo Greenline MK2 da firma EUROTRON (certificado de calibração nº ANRC 17310), o qual é mostrado na Figura 12.



Figura 12: Analisador de gases de combustão Greenline MK2

As emissões medidas e os respectivos sensores de detecção utilizados pelo analisador são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Medições realizadas pelo analisador de gases

Emissões	Sensor
CO (ppm)	Eletroquímico
O₂ (%)	Eletroquímico
SO₂ (ppm)	Eletroquímico
NO (ppm)	Eletroquímico
NO₂ (ppm)	Eletroquímico
CO₂ (%)	Calculado através do %O ₂

A amostragem dos gases de combustão foi realizada nos dutos na saída da caldeira utilizando uma sonda de 1,5 m com um termopar acoplado, segundo a norma NBR 10702 da ABNT, em dois pontos localizados na saída do trocador de calor denominado economizador (Figura 11).

A determinação do teor de umidade nos gases de combustão foi realizada segundo a NBR 11967 da ABNT.

Obteve-se uma estimativa do consumo de combustível, para o cálculo dos balanços de massa e energia no programa de gerenciamento GERCOM, mediante controle pelos silos de carvão, e também realizou-se a medição das temperaturas no interior da fornalha com a utilização de um pirômetro óptico.

As demais informações referentes às condições operacionais da caldeira no período de testes, as quais foram necessárias para a verificação do modelo de gerenciamento proposto, foram obtidas através de instrumentação já instalada na planta industrial.

Também foram feitas coletas de amostras de cinza leve no precipitador eletrostático da caldeira para a realização da análise de carbono não queimado nas mesmas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos Carvões

A natureza do combustível deve ser considerada quando pretende-se analisar as condições de operação de um queimador. Um queimador projetado para operar com um fluxo satisfatório de combustível pode ter problemas se o fluxo ou a composição do mesmo variar, comprometendo o equipamento e, provavelmente, emitindo uma maior quantidade de gases poluentes, além de perdas significativas de energia no processo. As variações nas propriedades dos carvões queimados resultam em variações nas emissões da planta industrial [29].

Para avaliar-se a qualidade de um carvão mineral para a sua aplicação como combustível na geração de vapor, é importante o conhecimento de suas características físico-químicas. A análise de uma amostra de carvão pode ser realizada de duas maneiras. A primeira, conhecida como análise imediata, fornece as porcentagens de umidade, matéria volátil, carbono fixo e das cinzas presentes no carvão. A segunda, conhecida como análise elementar, fornece as porcentagens de carbono, enxofre, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio presentes no carvão [4].

Durante os testes de combustão realizados na planta industrial trabalhou-se inicialmente com um carvão, previamente separado pela empresa, de uma única mineradora, no período de 14 a 31 de maio. Nos demais dias de teste, foram queimados os carvões usuais de operação da usina, ou seja, carvões de diferentes minas que são alimentados ao sistema sem uma mistura prévia.

A caracterização química desses carvões, através das análises elementar e imediata, é apresentada nas Tabelas 3 a 6.

Tabela 3: Análise elementar do carvão de uma única mineradora

Dia	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
14/05	47,28	3,26	0,98	5,13	1,51
15/05	48,29	3,29	1,01	4,06	1,66
16/05	46,85	3,24	0,98	5,69	1,53
17/05	47,46	3,27	0,99	4,69	1,85
18/05	46,66	3,24	0,99	5,55	1,77
29/05	47,03	3,26	0,97	5,79	1,53
30/05	46,59	3,22	0,99	6,19	1,46
31/05	44,24	3,14	0,95	7,69	1,67
Média	46,80	3,24	0,98	5,60	1,62

Tabela 4: Análise elementar dos carvões usuais de operação

Dia	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
17/04	44,34	3,12	1,02	6,51	1,65
18/04	45,64	3,12	1,04	5,01	1,76
19/04	45,69	3,21	1,01	5,00	1,79
1/06	46,00	3,24	0,99	4,80	1,77
22/06	43,54	3,19	0,89	7,32	1,62
25/06	46,15	3,28	0,95	5,12	1,71
26/06	46,08	3,24	0,94	5,52	1,61
27/06	44,36	3,25	0,91	6,89	1,62
28/06	42,33	3,04	0,86	9,14	1,77
29/06	45,47	3,28	0,93	4,64	1,74
5/07	42,15	3,07	0,85	10,06	1,76
20/07	44,32	3,21	0,91	7,40	1,51
Média	44,67	3,19	0,94	6,45	1,69

Tabela 5: Análise imediata do carvão de uma única mineradora

Dia	Cinza (%)	Matéria	Carbono
		Volátil (%)	Fixo (%)
14/05	41,84	21,35	38,46
15/05	41,69	21,25	38,65
16/05	41,71	21,39	38,71
17/05	41,74	21,48	38,54
18/05	41,79	21,69	37,96
29/05	41,42	21,43	38,72
30/05	41,55	21,57	38,49
31/05	42,31	21,84	37,58
Média	41,76	21,50	38,39

Tabela 6: Análise imediata dos carvões usuais de operação

Dia	Cinza (%)	Matéria	Carbono
		Volátil (%)	Fixo (%)
17/04	43,34	19,96	36,68
18/04	43,41	19,87	36,71
19/04	43,28	19,93	36,78
1/06	43,2	22,12	36,68
22/06	43,44	21,52	36,54
25/06	42,79	22,01	36,61
26/06	42,61	21,58	37,03
27/06	42,97	21,94	36,19
28/06	42,86	21,92	36,31
29/06	43,94	21,35	35,72
5/07	42,11	21,58	37,53
20/07	42,65	21,60	37,06
Média	43,05	21,28	36,65

Verifica-se pela análise elementar (Tabelas 3 e 4) que o carvão separado de uma única mineradora, no período de 14 a 31 de maio, apresentou-se de melhor qualidade em relação aos carvões usuais de operação da usina, o que pode ser observado em função do maior teor de carbono (valor médio de 46,80%) e menor teor de enxofre (valor médio de 1,62%) em comparação com os valores médios de 44,67% de C e 1,69% de S dos demais carvões.

Observa-se pela análise imediata (Tabelas 5 e 6) que esse mesmo carvão de uma mesma mineradora apresentou um menor teor de cinzas (valor médio de 41,76%) e maior teor de carbono fixo (valor médio de 38,39%) em relação aos valores médios de 43,05% de cinzas e 36,65% de carbono fixo dos demais carvões, confirmando o maior valor energético desse carvão em relação aos usualmente queimados.

Utilizando-se os valores médios obtidos na análise elementar do carvão de uma única mineradora e dos carvões usuais de operação da usina, obteve-se o gráfico da análise elementar média dos mesmos, conforme é apresentado nas Figuras 13 e 14, respectivamente.

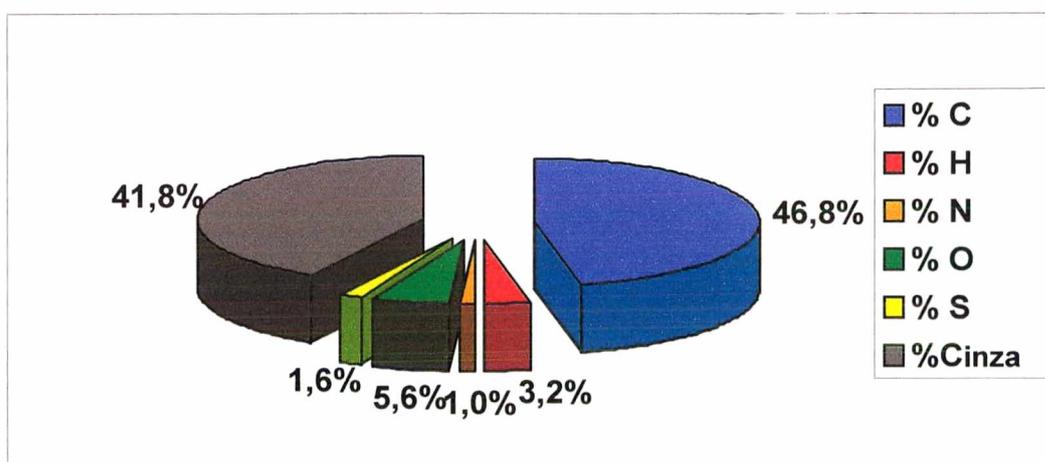


Figura 13: Análise elementar média do carvão de uma única mineradora

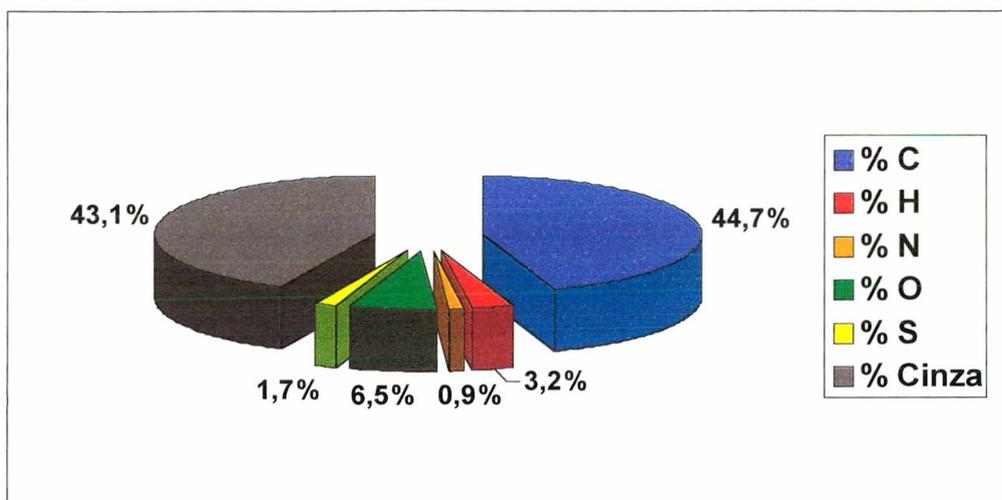


Figura 14: Análise imediata média dos carvões usuais de operação da usina

Para a determinação e previsão do comportamento de um determinado combustível sólido em um equipamento de combustão, uma das propriedades de maior importância é o poder calorífico deste combustível, o qual é utilizado para o cálculo da potência liberada na fornalha, da temperatura adiabática de chama e rendimentos térmicos [10].

A Figura 15 apresenta a variação do poder calorífico dos carvões avaliados no período de testes.

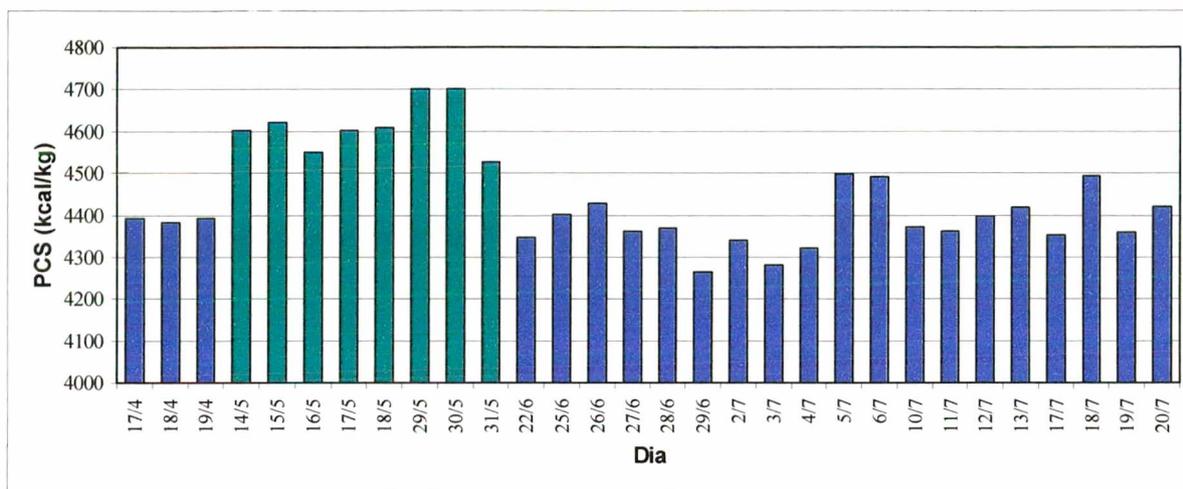


Figura 15: Histórico do poder calorífico dos carvões

Verifica-se pela Figura 15 que ocorreu uma considerável variação na qualidade dos carvões analisados, no que diz respeito ao poder calorífico, mesmo em pequenos intervalos de tempo, demonstrando a importância de se ter um maior controle e homogeneização dos carvões utilizados para se garantir uma maior estabilidade no processo de combustão. Esta variação na qualidade do carvão é decorrente da não realização de uma mistura prévia dos carvões no abastecimento dos moinhos da caldeira em estudo.

Observou-se que os carvões com um maior poder calorífico superior foram queimados no período de 14 a 31 de maio, conforme é destacado na Figura 15, confirmando que o carvão separado de uma única mineradora apresentou-se de melhor qualidade em relação aos carvões usualmente utilizados pela usina.

Um dos principais problemas de não se operar com um carvão de composição uniforme ocorre em função de que, a cada mudança de composição do mesmo, as condições operacionais deveriam ser novamente ajustadas para essa nova condição de queima. No entanto, isso usualmente não é realizado, contribuindo ainda mais para a instabilidade do sistema, conforme foi verificado durante os testes na planta.

5.2 Testes de Combustão

5.2.1 Condições Operacionais

Durante a realização dos testes de combustão na Usina Termelétrica Jorge Lacerda A da GERASUL, encontrou-se dificuldades na execução dos experimentos, principalmente em função de problemas inerentes à planta em estudo, a qual é uma unidade antiga, apresentando paradas rotineiras devido à manutenção de equipamentos.

O processo de geração térmica na Unidade em questão é um processo dinâmico onde, somente por curtos intervalos de tempo, se consegue manter as condições operacionais constantes, uma vez que as mesmas dependem da carga ativa da turbina solicitada, do tipo de carvão utilizado, da disponibilidade ou não funcionamento pleno dos equipamentos (como moinhos, precipitadores eletrostáticos, etc.) além da preocupação ambiental, onde muitas vezes são necessárias alterações imediatas nas condições operacionais, visando-se a redução das emissões na chaminé, decorrentes dos problemas anteriormente citados.

Esses problemas inerentes à planta industrial dificultaram a análise dos dados coletados, resultando, em alguns casos, em gráficos de influência das variáveis em estudo com poucos pontos.

5.2.2 Influência da Composição do Carvão nas Emissões de SO_2 e NO_x

Entre as emissões provenientes da combustão do carvão encontram-se os óxidos de nitrogênio e os óxidos de enxofre, os quais representam um sério problema ambiental [30].

Avaliou-se nos testes experimentais a influência do teor de enxofre dos carvões na emissão de dióxido de enxofre (SO_2), cujos resultados são apresentados na Tabela 7 e na Figura 16.

Tabela 7: Influência do teor de enxofre do carvão na emissão de SO_2

S Carvão (%)	SO_2 (ppm)
1,368	1713
1,398	1732
1,408	1757
1,44	1774
1,669	1951
1,836	2301
1,996	2316
2,113	2372
2,211	2472

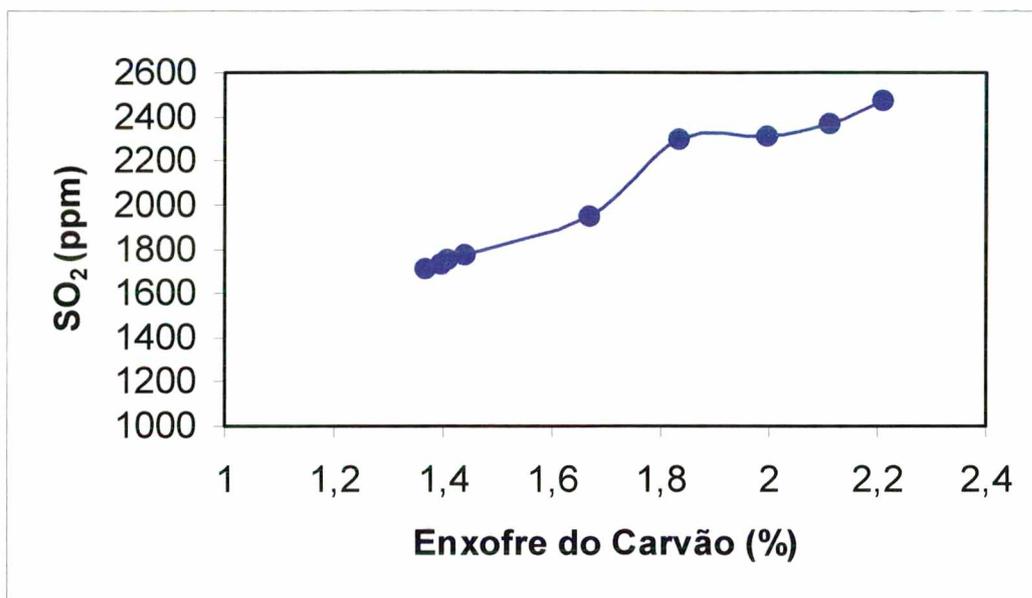


Figura 16: Influência do teor de enxofre do carvão na emissão de SO₂

Observou-se pela Figura 16 que a emissão de dióxido de enxofre aumenta com o aumento do teor de enxofre presente no carvão. Logo, a emissão desse poluente pode ser reduzida somente pelo controle do tipo de carvão. Isso demonstra a importância do combustível utilizado nos problemas ambientais provenientes da combustão, os quais podem ser minimizados pela utilização, por exemplo, de carvões de melhor qualidade.

Em relação às emissões de óxido de nitrogênio, verificou-se que quando o teor de nitrogênio do carvão aumenta, a quantidade de NO produzida também aumenta [23]. Van der Lans et al. [31] investigaram 48 tipos de carvões e verificaram que um aumento de 1 a 2% no nitrogênio do carvão resultou em aproximadamente 50% a mais de NO sendo formado.

Durante o período de testes, no entanto, observou-se que o teor de nitrogênio se manteve praticamente constante nos diferentes tipos de carvão queimados pela usina (Tabela 3) e, portanto, a variação das emissões de óxidos de nitrogênio somente foi avaliada em função dos diferentes valores de excesso de ar utilizados.

5.2.3 Influência do Excesso de Ar na Formação de Poluentes

5.2.3.1 Óxidos de Nitrogênio

Durante a realização dos testes de combustão, analisou-se a influência do excesso de ar nas emissões de NO total para uma carga ativa alta na turbina (50 MW) e para uma carga ativa baixa (33 MW), uma vez que, em função desta carga ativa, as condições operacionais da caldeira são bem distintas.

Também mediu-se na fornalha da caldeira a temperatura na chama, cujo valor médio encontrou-se em torno de 1300°C para carga ativa alta e de 1000°C para carga ativa baixa.

Nestas medições, não foi detectada a presença de dióxido de nitrogênio (NO₂) nos gases de combustão na saída da caldeira, reforçando o fato de que os óxidos de nitrogênio provenientes da queima de carvão são predominantemente óxidos nítricos (NO).

Os resultados destes testes para a carga ativa de 50 MW e para a de 33 MW são apresentados nas Tabelas 8 e 9 e nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Tabela 8: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 50 MW

O ₂ (%)	Excesso Ar (%)	NO (ppm)
4,9	30,43	440
5,2	32,91	425
5,5	35,48	419
5,6	36,36	410
5,7	37,25	386

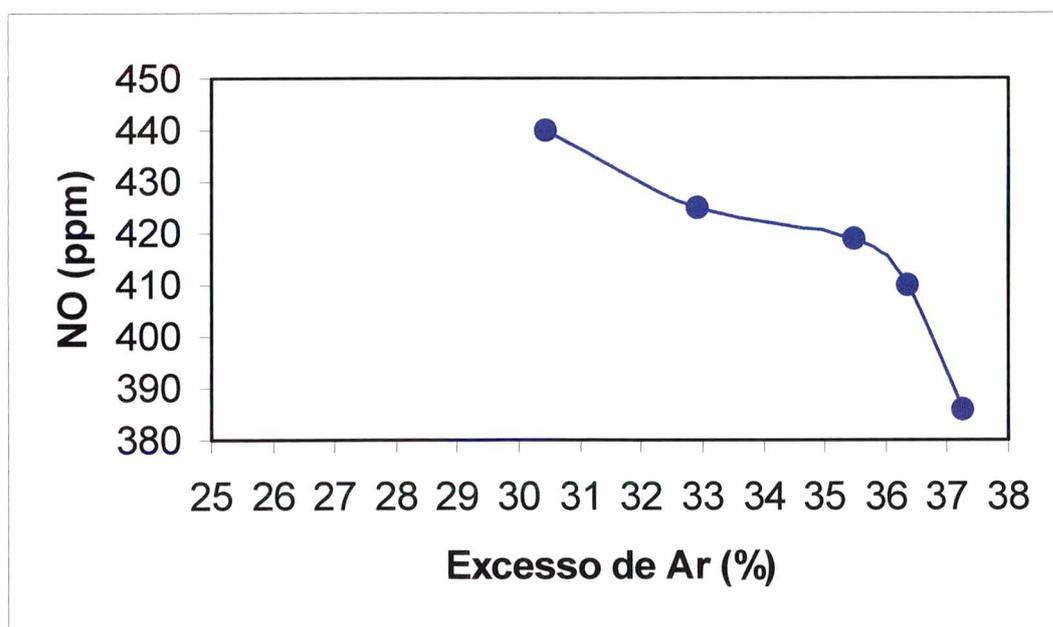


Figura 17: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 50 MW

Verificou-se pela Figura 17 que o aumento do excesso de ar utilizado na combustão de carvão pulverizado, na temperatura média de chama de 1300°C, diminui a emissão de NO total na saída da caldeira. Observa-se que uma variação de excesso de ar na faixa de 30 a 37% resultou em uma diminuição no teor de NO de apenas 50 ppm, o que mostra que esta variável exerce uma pequena influência na formação de NO proveniente da queima de carvão pulverizado.

Isso ocorre em função de que mais de 80% do NO total formado durante a combustão de carvão pulverizado é proveniente do NO combustível, sendo o NO térmico pouco significativo na temperatura em torno de 1300°C. Logo, ao aumentar-se o excesso de ar, houve uma diminuição na temperatura de chama e, conseqüentemente, uma redução do NO térmico, o qual sofre uma acentuada influência pela temperatura. Como o NO térmico encontra-se em pequena concentração, verificou-se uma redução de apenas 50 ppm na emissão total de NO com o aumento do excesso de ar. Além disso, temperaturas menores também diminuem a velocidade das reações de combustão e, conseqüentemente, a conversão de nitrogênio do carvão a NO. No entanto, a redução de NO combustível não foi muito significativa pelo fato de este ser bem menos sensível à temperatura do que o NO térmico.

Os resultados dos testes para a influência do excesso de ar total nas emissões de NO, para uma carga ativa baixa de 33 MW, são apresentados na Tabela 9 e na Figura 18.

Tabela 9: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 33 MW

O ₂ (%)	Excesso Ar (%)	NO (ppm)
4,8	29,62	361
4,9	30,43	333
6,8	47,88	319
7,3	53,28	313

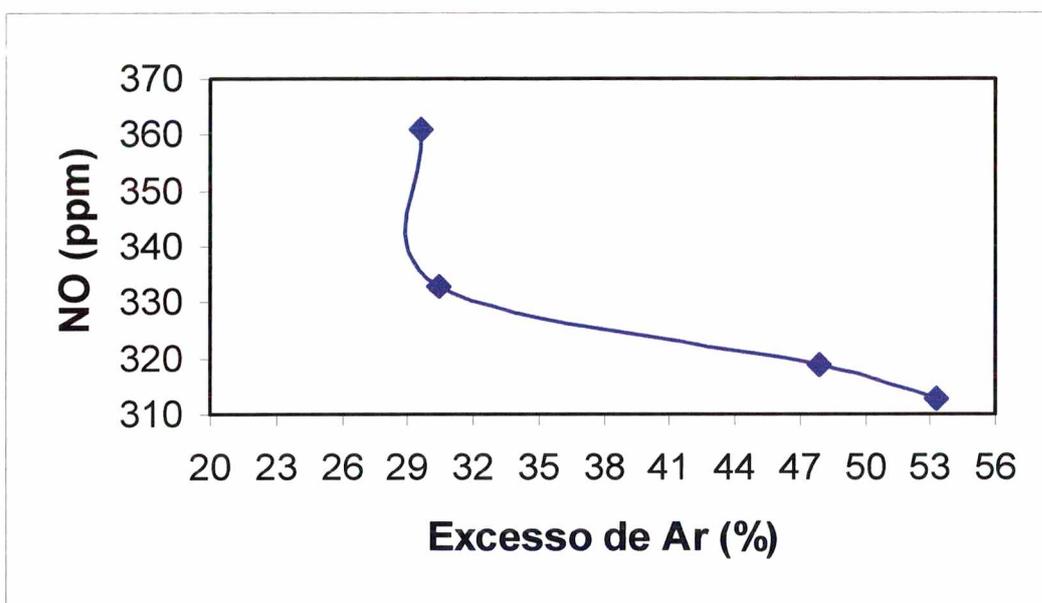


Figura 18: Influência do excesso de ar na emissão de NO para carga de 33 MW

Na carga ativa de 33 MW, observou-se para a combustão de carvão a mesma tendência de redução da emissão de NO com o aumento do excesso de ar utilizado, como havia sido verificada na carga de 50 MW.

Portanto, verificou-se que a variável excesso de ar exerce uma pequena influência na formação de NO total proveniente da combustão de carvão pulverizado na temperatura de chama na faixa de 1000 a 1300°C.

5.2.3.2 Monóxido de Carbono

A emissão de monóxido de carbono (CO) é proveniente da combustão incompleta do carbono presente no combustível ou da reação de dissociação do CO₂, a qual ocorre em altas temperaturas. A prática mostra que a formação de CO é sempre acompanhada pela formação de outros produtos de combustão incompleta [9].

Nos experimentos realizados na planta industrial, analisou-se a influência do excesso de ar total na emissão de CO para uma carga ativa alta na turbina (50 MW) e para uma carga ativa baixa (33 MW), cujos resultados são apresentados nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Tabela 10: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 50 MW

O ₂ (%)	Excesso Ar (%)	CO (ppm)
3,33	18,84	580
4,28	25,59	139
4,48	27,11	101
4,84	29,95	96
4,90	30,43	50

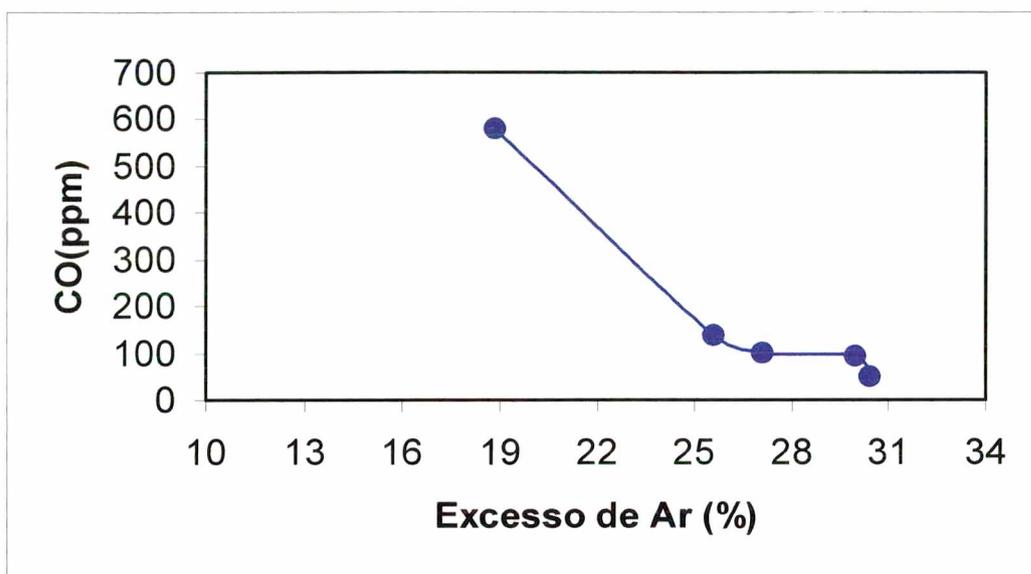


Figura 19: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 50 MW

Observou-se pela Tabela 10 e pela Figura 19 que, para uma carga ativa de 50 MW, a emissão de CO, como era esperado, diminuiu com a utilização de maiores valores de excesso de ar, ocorrendo uma formação significativa de CO quando se utilizou um excesso de ar abaixo de 25%, o que equivale a um teor de oxigênio abaixo de 4% na saída da caldeira. Vale ressaltar que queimadores industriais bem regulados emitem CO da ordem de 30 a 150 ppm e, um aumento nesta taxa de emissão, é normalmente acompanhado pela emissão de fuligem e outros poluentes [9].

Observou-se nessa carga que, para um excesso de ar de 18%, o teor de CO analisado foi de 580 ppm, o que representa uma perda significativa de energia, uma vez que a reação que forma CO consome muito mais combustível do que a reação que forma CO₂, dado ao fato de a última ser mais exotérmica.

A temperatura média da chama, a qual também foi medida durante os testes, foi em torno de 1300°C, sendo que, neste valor de temperatura, a emissão de CO pela reação de dissociação do CO₂ é pequena em comparação com o CO formado pela combustão incompleta do carbono do combustível em função do excesso de ar utilizado. Isso porque a dissociação do CO₂ somente se torna mais acentuada sob temperaturas superiores à 1500°C [7].

Os resultados dos testes experimentais para a carga ativa de 33 MW são apresentados na Tabela 11 na Figura 20.

Tabela 11: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 33 MW

O₂ (%)	Excesso Ar (%)	CO (ppm)
3,70	21,38	424
3,90	22,80	297
4,48	27,11	114
4,87	30,19	106
5,99	39,90	23
6,44	44,23	19

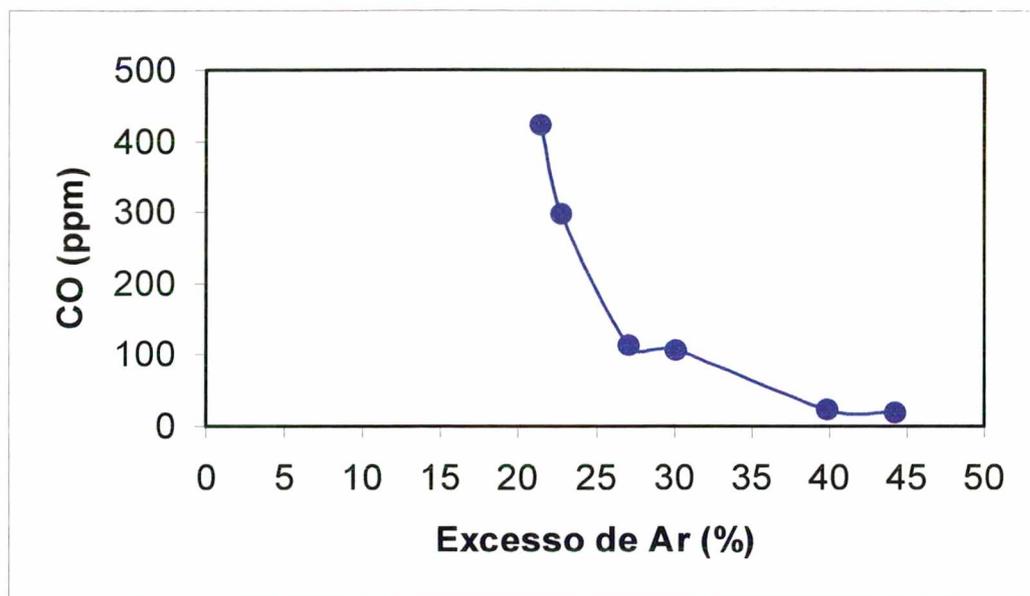


Figura 20: Influência do excesso de ar na emissão de CO para carga de 33 MW

Para uma carga ativa de 33 MW, detectou-se emissão de CO acima de 150 ppm quando se utilizou excesso de ar abaixo de 27%, o que equivale a um teor de oxigênio na saída da caldeira abaixo de 4,5%.

Portanto, verificou-se que para se manter as emissões de CO em valores bem abaixo do limite máximo recomendável deve se utilizar um teor de O_2 na saída da caldeira em torno de 5% para carga ativa alta e em torno de 6% para carga ativa baixa. A utilização de um maior valor de excesso de ar para a condição de carga baixa se justifica pelo fato de, nesta condição, a caldeira operar sob temperaturas mais baixas em função do menor consumo de combustível, o que dificulta as reações de combustão. Logo, para favorecer estas reações utilizou-se a alternativa de aumentar a concentração de um dos reagentes, no caso o oxigênio, alimentando o sistema com um maior excesso do mesmo, fornecido pelo ar atmosférico.

5.2.3.3 Carbono na Cinza Leve

O teor de carbono na cinza leve normalmente está na faixa de 2 a 5%, embora a mesma possa conter até 20% de carbono. Quantidades excessivas de carbono residual nesta cinza representam uma significativa perda de energia. A venda de cinza leve contendo excessiva quantidade de carbono residual é muito difícil. Por outro lado, a cinza leve é uma matéria-prima de valor para a indústria da construção civil, isto é, para a produção de cimento, se o teor de carbono não queimado se encontra abaixo de 5%. Em função da grande quantidade produzida e custo investido, a cinza leve é importante tanto economicamente quanto por razões ambientais [24].

O carbono na cinza leve se constitui de partículas de coque que saem na cinza após a combustão incompleta do carvão na fornalha, resultando em uma cinza leve fora das especificações de mercado. Se o teor de cinza pode ser diminuído pelo ajuste das condições operacionais, mais cinza leve se encontrará disponível com a qualidade requerida [33, 34].

A Tabela 12 e a Figura 21 apresentam os resultados obtidos para o teor de carbono não queimado presente na cinza leve, utilizando diferentes valores de excesso de ar para uma carga ativa de 57 MW.

Tabela 12: Influência do excesso de ar na presença de carbono na cinza leve

O₂ (%)	Excesso Ar (%)	Carbono na Cinza Leve (%)
2,1	11,11	15,55
2,3	12,29	10,86
2,5	13,51	11,36
2,6	14,13	12,00
2,9	16,02	9,98
3,2	17,97	11,62
5,3	34,35	4,20
5,4	34,61	3,50

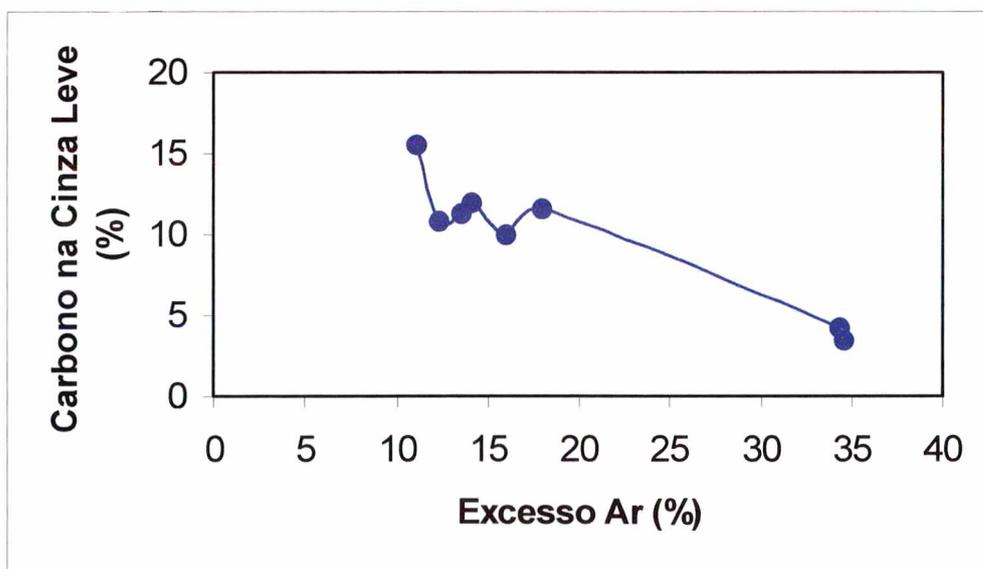


Figura 21: Influência do excesso de ar na presença de carbono na cinza leve

Verificou-se pela Figura 21 que a quantidade de carbono não queimado presente na cinza leve diminui com o aumento do excesso de ar total, sendo que o menor valor encontrado foi de 3,5% de carbono, utilizando-se um excesso de ar em torno de 34%, o que equivale a um teor de oxigênio na saída da caldeira em torno de 5,4%.

Portanto, verificou-se que o excesso de ar é uma variável operacional muito importante na otimização do processo de combustão, exercendo uma grande influência tanto no aspecto de conservação de energia, podendo reduzir o consumo de combustível, quanto no aspecto ambiental, o qual pode minimizar a emissão de poluentes.

5.3 Verificação do Modelo de Gerenciamento da Combustão

Visando-se a verificação do modelo de gerenciamento proposto, foram realizadas medidas experimentais na planta industrial no período de 17 de abril a 29 de maio, coletando-se dados reais referentes à composição dos gases de combustão, os quais foram comparados com os dados calculados pelo modelo (através da análise elementar ou imediata do carvão e condições operacionais), conforme apresentado nas Tabelas 13 a 16.

Tabela 13: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 17/04

Emissões	Valor Calculado com Análise Elementar	Valor Calculado com Análise Imediata	Valor Medido
CO₂ (%)	15,76	15,73	16,0
CO (ppm)	9,18	9,17	32,0
N₂ (%)	80,94	80,97	80,8
O₂ (%)	2,99	2,99	2,9
SO₂ (ppm)	2369,40	2376,12	2316,0
NO (ppm)	628,13	628,24	436,0

Tabela 14: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 14/05

Emissões	Valor Calculado com Análise Elementar	Valor Calculado com Análise Imediata	Valor Medido
CO₂ (%)	12,76	12,84	13,0
CO (ppm)	3,35	3,37	14,0
H₂O (%)	6,53	6,55	6,3
N₂ (%)	80,66	80,58	80,5
O₂ (%)	6,34	6,33	6,3
SO₂ (ppm)	1527,24	1565,32	1551,0
NO (ppm)	800,64	799,91	410,0

Tabela 15: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 18/05

Emissões	Valor Calculado com Análise Elementar	Valor Calculado com Análise Imediata	Valor Medido
CO₂ (%)	13,85	13,91	14,1
CO (ppm)	0,52	0,52	12,0
H₂O (%)	7,96	7,95	8,42
N₂ (%)	80,80	80,74	80,68
O₂ (%)	5,10	5,10	5,0
SO₂ (ppm)	1969,13	1995,01	1786,0
NO (ppm)	370,82	370,57	382,0

Tabela 16: Composição calculada e medida dos gases de combustão no dia 29/05

Emissões	Valor Calculado com Análise Elementar	Valor Calculado com Análise Imediata	Valor Medido
CO₂ (%)	13,18	13,22	13,4
CO (ppm)	5,02	5,03	22,0
H₂O (%)	8,19	8,06	8,3
N₂ (%)	80,66	80,63	80,7
O₂ (%)	5,90	5,90	5,8
SO₂ (ppm)	1606,60	1604,25	1603,0
NO (ppm)	858,32	857,95	306,0

Verifica-se pelas Tabelas 13 a 16 que houve uma excelente concordância entre os valores calculados pelo programa GERCOM 1.0 e os valores medidos experimentalmente.

Pequenos desvios nos valores das emissões de CO foram observados, geralmente valores baixos, bem como para as emissões de NO, o que não chega a ser muito significativo, considerando-se que a própria instabilidade do sistema resulta em grandes desvios aparentes e que a unidade de medida é em ppm. Se estes valores fossem apresentados em % isto seria insignificante. Por exemplo, 10.000 ppm = 1% .

Representando-se graficamente os valores calculados e medidos para as emissões de CO₂, CO, NO, H₂O, O₂, SO₂ e N₂, obtém-se as Figuras 22 a 28, respectivamente, onde observa-se mais claramente a validade do modelo.

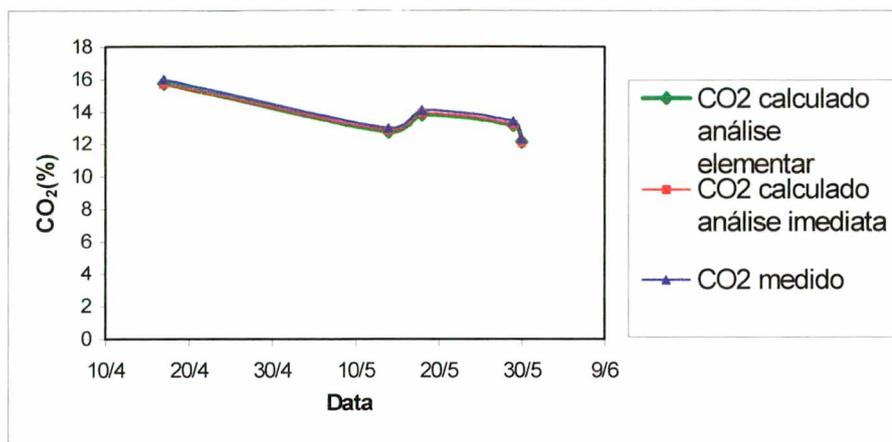


Figura 22: Valores medidos *versus* valores calculados para o CO₂

Os valores do teor de CO₂ medidos, os quais foram obtidos através de estimativa a partir do teor de oxigênio efetivamente medido, apresentaram uma ótima concordância com os valores calculados pelo programa GERCOM 1.0.

As emissões de CO e NO medidas na saída da caldeira foram comparadas com os valores calculados pelo programa (Figuras 23 e 24), onde verificou-se desvios entre as curvas experimental e calculada. Esta diferença entre as curvas foi obtida em função dos teores de CO e NO serem dados em ppm, onde a própria instabilidade do sistema resulta em grandes desvios aparentes.

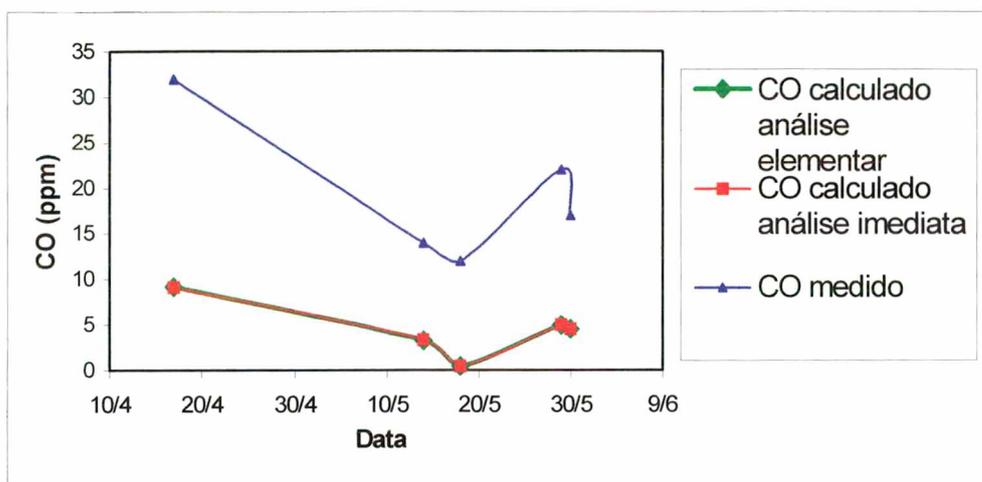


Figura 23: Valores medidos *versus* valores calculados para o CO

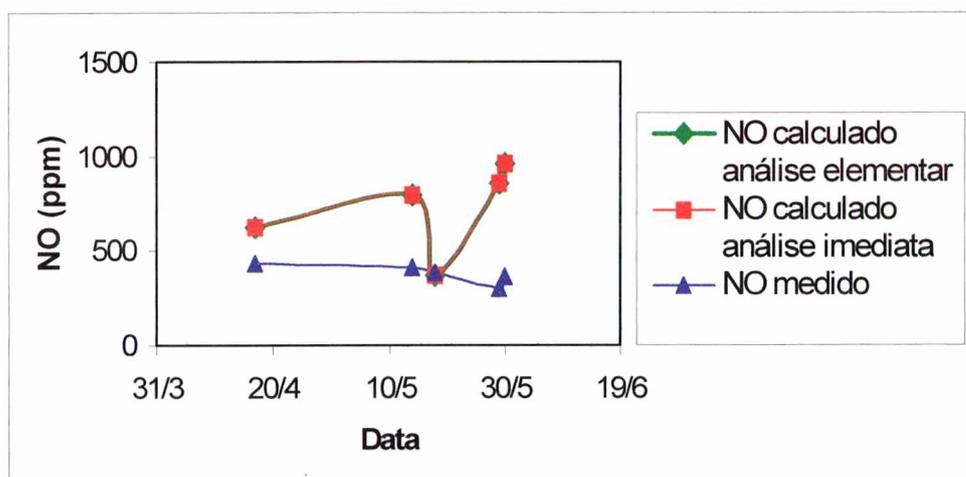


Figura 24: Valores medidos *versus* valores calculados para o NO

Os teores de H_2O , O_2 e SO_2 medidos na saída da caldeira também foram comparados graficamente com os valores estimados pelo modelo, apresentando uma boa concordância, conforme observa-se nas Figuras 25 a 27.

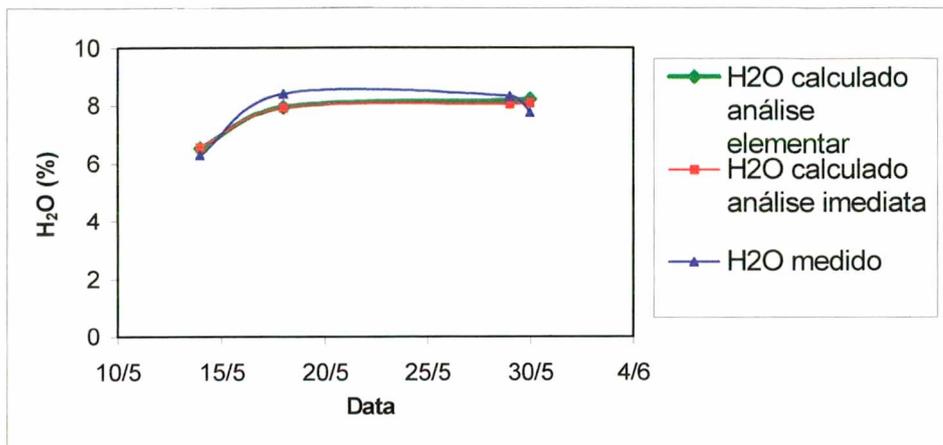


Figura 25: Valores medidos *versus* valores calculados para a H₂O

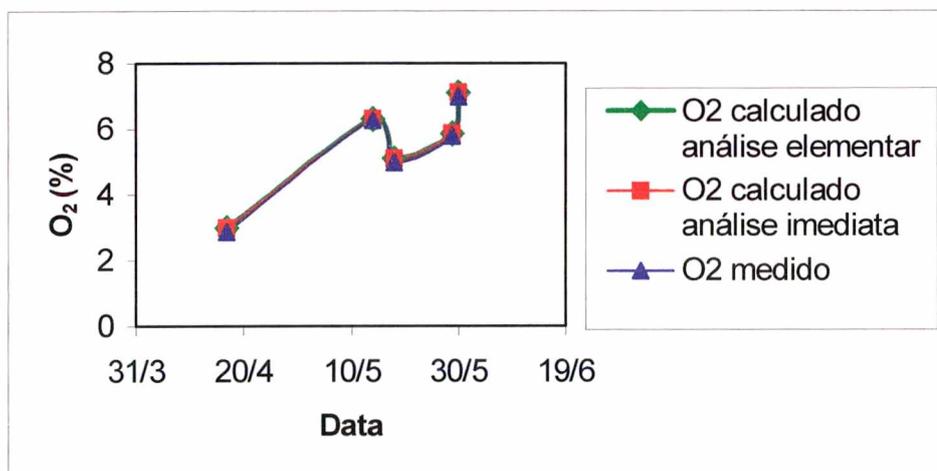


Figura 26 - Valores medidos *versus* valores calculados para o O₂

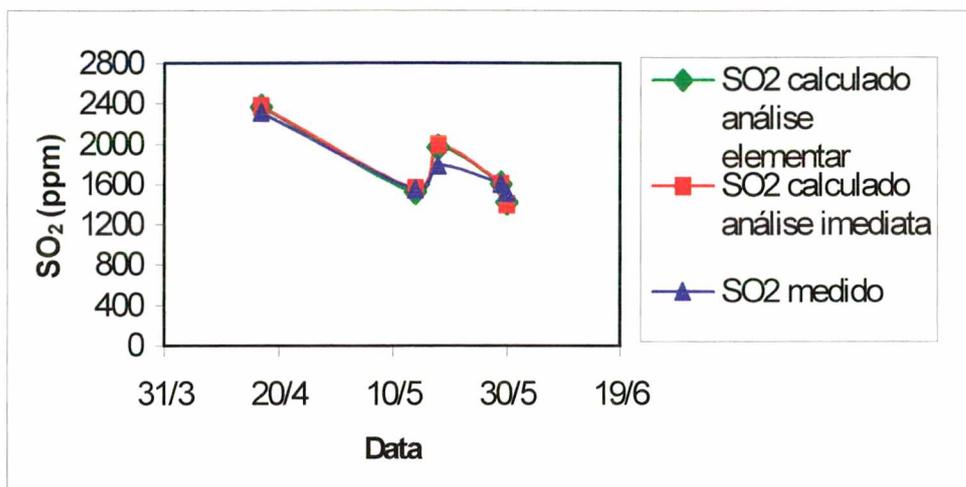


Figura 27: Valores medidos *versus* valores calculados para o SO₂

Os valores de N₂ medidos, os quais foram obtidos por diferença utilizando os teores dos outros gases efetivamente medidos, apresentaram uma boa concordância com os valores calculados pelo programa GERCOM 1.0, conforme verifica-se pela Figura 28.

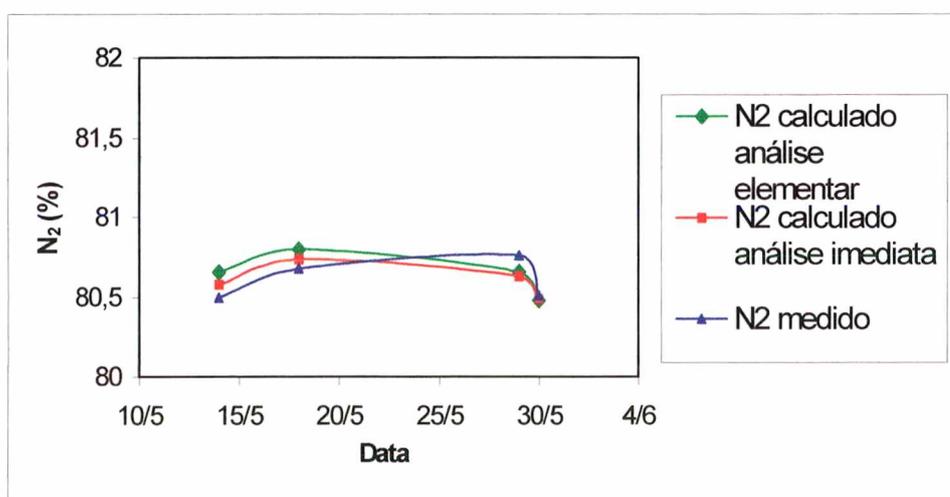


Figura 28: Valores medidos *versus* valores calculados para o N₂

6 CONCLUSÕES

Os carvões utilizados durante a realização deste trabalho apresentaram considerável variação de qualidade, no que diz respeito à composição e ao poder calorífico dos mesmos, o que ocorre em função da utilização de carvões de diferentes minas, sem uma mistura prévia.

O carvão separado de uma única mina mostrou-se de melhor qualidade em relação aos demais carvões, apresentando maior teor de carbono e menores teores de enxofre e cinzas e, conseqüentemente, maior poder calorífico, resultando em menor consumo de combustível.

Através da composição dos carvões que estavam sendo queimados e da análise dos gases de combustão, foi possível verificar que a emissão de SO_2 é diretamente proporcional ao teor de enxofre do carvão, podendo-se então reduzir a emissão desse poluente somente pelo controle do tipo carvão.

Considerando-se que o nitrogênio quimicamente ligado ao carvão é o principal responsável por mais de 80% do NO formado e que, este teor se manteve praticamente constante nos diferentes tipos de carvão utilizados no período de testes, logo, a variação desta emissão foi relacionada aos diferentes valores de excesso de ar.

Nos testes experimentais, verificou-se que o aumento do excesso de ar utilizado na combustão de carvão pulverizado, na temperatura média de chama na faixa de 1000 a 1300°C, diminui a emissão de NO total na saída da caldeira. No entanto, a variação da emissão deste poluente em função do aumento da variável excesso de ar é relativamente pequena, o que demonstra que a mesma exerce uma pequena influência na formação do NO total proveniente da combustão de carvão pulverizado.

Observou-se, mediante a análise dos gases de combustão, que a emissão de CO, cujo valor máximo medido foi de 580 ppm, aumenta com a redução do excesso de ar, ocorrendo uma formação significativa deste poluente quando se utilizou um excesso de ar abaixo de 25%, o que equivale a um teor de oxigênio abaixo de 4% na saída da caldeira. Logo, verificou-se que a emissão deste poluente pode ser mantida bem abaixo de 150 ppm, o qual é o teor máximo recomendável para queimadores de carvão pulverizado [3], através do controle do teor de oxigênio na saída da caldeira (excesso de ar), o qual deve ser mantido em torno de 5% para carga alta e de 6% para carga baixa.

Durante a realização dos experimentos, observou-se que a quantidade de carbono não queimado presente na cinza leve é diretamente influenciada pelo excesso de ar, sendo que o menor valor encontrado nas cinzas foi de 3,5%, utilizando-se um excesso de ar em torno de 34%, o que equivale a um teor de oxigênio na saída da caldeira em torno de 5,4%.

A partir dos resultados dos testes de combustão, concluiu-se que o excesso de ar é uma variável operacional muito importante na otimização do processo de combustão, exercendo uma grande influência tanto no aspecto de conservação de energia, podendo reduzir o consumo de combustível, quanto no aspecto ambiental, podendo minimizar a emissão de poluentes.

Comparando-se os resultados das análises dos gases de combustão medidos na planta industrial com os valores calculados pelo programa GERCOM 1.0, verificou-se uma excelente concordância, o que confirma a validade do modelo de gerenciamento, tornando o mesmo uma ferramenta útil e confiável para o acompanhamento e controle do processo de combustão.

7 SUGESTÕES

- Implementar um sistema supervisorio para trabalhar com o *software* GERCOM 1.0, possibilitando o acompanhamento em rede do processo de combustão na usina.
- Estudar a influência da composição do carvão na quantidade de carbono não queimado presente nas cinzas.
- Analisar o efeito de outras variáveis, como tiragem e vazão de ar primário no processo de combustão de carvão mineral.
- Avaliar a influência da composição do carvão na emissão de monóxido de carbono.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R. W. **Combustion**. Springer, cap. 1, 17, Berlim, 1999.
- [2] BEËR, J. M. **Stationary Combustion: The Environmental Leitmotiv**. In Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, p. 7-13, 1988.
- [3] RANGEL, L. P.; JOSÉ, H. J.; MOREIRA, R. F. **Efficient Use of GLP in Ceramic Furnaces over Fixed Burners**. Journal of the Institute of Energy, v. 73, n° 497, 2000.
- [4] VAN WYLEN, G. J. **Fundamentals of Classical Thermodynamics**. J. Wiley, New York, 1985.
- [5] KATZ, D.; LEE, R. L. **Natural Gas Engineering: Production and Storage**. McGraw-Hill, cap. 3, p. 105, 1990.
- [6] TORREIRA, R. P. **Geradores de Vapor**. Editora Libris, cap. 11-12, p. 320-355, São Paulo, 1995.
- [7] BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Editora da UFSC, cap. 3, p. 21-35, Florianópolis, 1995.
- [8] COSTA, E. C. **Física Industrial**. Editora Globo, cap. 1, p. 57-59, Porto Alegre, 1973.
- [9] **Workshop sobre Combustão Industrial**. Confor Instrumentos de Medição Ltda, Porto Alegre, 2000.

- [10] **Curso de Combustão Industrial.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2000.
- [11] KUO, K. K. **Principles of Combustion.** Jhon Wiley & Sons, cap. 1, p. 72 –74, New York, 1986.
- [12] JÜNTGEN, H. **Coal Characterization in Relation to Coal Combustion.** Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-Chemie, Bd.40, Heft 4, 1987.
- [13] HARDING, A. W.; BROWN, S. D.; THOMAS, K. M. **Release of NO from the Combustion of Coal Chars.** Combustion and Flame 107, p. 336, 1996.
- [14] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA, **Resolução nº 3** de 28/06/1990.
- [15] GLASSMAN, I. **Combustion.** Academic Press, Inc., Orlando, 1987.
- [16] JONES, H. R.; LENG, J. **The Influence of Fuel Composition on Emissions of CO, NO and NO₂ from a Gas-Fired Pulsed Combustor.** Combustion and Flame 104, p. 419, 1996.
- [17] FÖRTSCH, D.; KLUGER, F.; HEIN, K. **A Kinetic Model for the Prediction of NO Emissions from Staged Combustion of Pulverized Coal.** In Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, p. 3037-3039, 1998.
- [18] PHONG-ANANT, D.; WALL, T. F. **Nitrogen Oxide Formation from Australian Coals.** Combustion and Flame 62, p. 21-22, 1985.
- [19] ZAMANSKY, V; SHELDON, M.; MALY, P. **Enhanced NO_x Reduction by Interaction of Nitrogen and Sodium Compounds in the Reburning Zone.** In Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, p. 3001, 1998.

- [20] JONES, J. M.; PATTERSON, P. M.; WILLIAMS, A. **Approaches to Modeling Heterogeneous Char NO Formation/ Destruction during Pulverized Coal Combustion.** Carbon 37, p. 1545-1546, 1999.
- [21] OKAZAKI, K.; SUGIYAMA, K. **Formation Mechanism of Thermal NO_x in Pulverized Coal Combustion.** JSME International Journal, v.34, n.4, p. 533, 1991.
- [22] HAYHURST, A. N.; LAWRENCE, A. D. **The Amounts of NO_x and N₂O Formed in a Fluidized Bed Combustor during the Burning of Coal Volatiles and Also of Char.** Combustion and Flame 105, p. 341, 1996.
- [23] WILLIAMS, A.; POURKASHANIAN, M.; NORMAN, J. **Modeling of Coal Combustion in Low-NO_x p.f. Flames.** Fuel, v.73, n.7, p. 1012-1013, 1994.
- [24] SCHNEIDER, A.; AUMÜLLER, A. **Optical Sensor System for the On-line Measurement of Carbon in Fly-Ash.** Sensors and Actuators A 67, p. 24, 1998.
- [25] HURT, R.; DAVIS, K.; MITCHELL, G. **Residual Carbon from Pulverized-Coal-Fired Boilers.** Fuel, v.74, n.9, p. 1297, 1995.
- [26] WIGLEY, F.; WILLIAMSON, J.; GIBB, W. **The Distribution of Mineral Matter in Pulverized Coal Particles in Relation to Burnout Behavior.** Fuel, v.76, n.13, p. 1283, 1997.
- [27] HESSELMANN, G. **Optimization of Combustion by Fuel Testing in a NO_x Reduction Test Facility.** Fuel, v.76, n.13, p. 1271, 1997.

- [28] VERANTH, J. M.; FLETCHER, T. H.; SAROFIM, A. F. **Measurement of Soot and Char in Pulverized Coal Fly Ash.** Fuel, v.79, p. 1067, 2000.
- [29] AFONSO, R.; DUSATKO, G.; POHL, J. **Measurements of NO_x Emissions from Coal Boilers.** Combustion Science and Technology, v. 93, p. 41-42, 1993.
- [30] NAIR, R. B.; YAVUZKURT, S. **Modeling Sulfur Dioxide Capture in a Pulverized Coal Combustor.** Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v.119, p. 291, 1997.
- [31] VAN DER LANS, R. P.; GLARBORG, P.; HEPBURN, P. **Influence of Coal Quality on Combustion Performance.** Fuel, v.77, p. 1322, 1998.
- [32] VISONA, S. P.; STANMORE, B. R. **Modeling NO_x Release from a Single Coal Particle.** Combustion and Flame 105, p. 93, 1996.
- [33] MANZ, O. **Coal Fly Ash: A Retrospective and future Look.** Fuel, v.78, p. 135, 1999.
- [34] PAYÁ, M.; AMAHJOUR, F. **Thermogravimetric Methods for Determining Carbon Content in Fly Ashes.** Cement and Concrete Research, v.28, p. 675, 1998.

9 ANEXOS

9.1 Relatório do Programa de Gerenciamento GERCOM 1.0

DIA: 17/04/01

HORA: 11:00

Combustível: Carvão Mineral Blendado

Composição Ar Atmosférico % Teor Mássico Base Seca

O₂ = 23,29

N₂ = 76,71

H₂O = 1,4

Condições Operacionais

Depressão Fornalha = 12 mmH₂O

Temperatura Fornalha = 1272,4 °C

Temperatura Ar Primário = 90 °C

Temperatura Ar Secundário = 282 °C

Excesso Ar 16 %

Análise Elementar % Base Seca

C = 44,11

H = 3,14

O = 6,77

N = 1

S = 1,77

Cinza = 43,21

Umidade do Pulverizado = 1,812

Análise Imediata % Base Seca

Carbono Fixo = 35,33

Matéria Volátil = 21,46

Cinza = 43,21

Condições Operacionais

Vazão 37,02 t/h

Temperatura do Pulverizado= 90 °C

Incombusto %

Cinza Leve= 10,43

Cinza Pesada= 14,41

Gases de Combustão

Vazão Saída Caldeira = 279,73 t/h

Massa específica (Saída Caldeira) = 0,621 kg/m³

Temperatura Adiabática= 1895,34 °C

Composição equilíbrio (Temperatura fornalha) % Teor Volumétrico Base Seca

CO₂= 15,7615402

CO= 9,18189E-4

H₂O= 9,46585H₂= 1,89311E-4N₂= 80,9437612O₂= 2,9938398SO₂= 0,2369392

NO= 0,0628121

Composição equilíbrio (Temperatura adiabática) % Teor Volumétrico Base Seca

CO₂= 15,7322172

CO= 0,0265809

H₂O= 9,45669H₂= 7,1422E-3

N₂= 80,8060206

O₂= 2,8905329

SO₂= 0,2368821

NO= 0,3006241

Ar Atmosférico Base Úmida

Razão Ar/Combustível= 5,902 kg Ar/kg Comb.

Ar Primário

Vazão= 51,61 t/h

Calor Adicional = 8,292E5 kcal/h

Ar Secundário

Vazão = 206,43 t/h

Calor Adicional = 1,339E7 kcal/h

Ar Total

Vazão = 258,04 t/h

Calor Adicional = 1,422E7 kcal/h

Combustível Base Úmida

Potência Térmica= 1,559E8 kcal/h

Calor Específico= 0,27 kcal/kg.°C

PCS= 4309,198 kcal/kg

PCI= 4137,062 kcal/kg

Análise Energética

Calor Total Disponível= 1,708E8 kcal/h

Perdas Gases Comb.= 12,679 %

Perdas Incombusto= 4,585 %

Eficiência Caldeira= 82,736 %