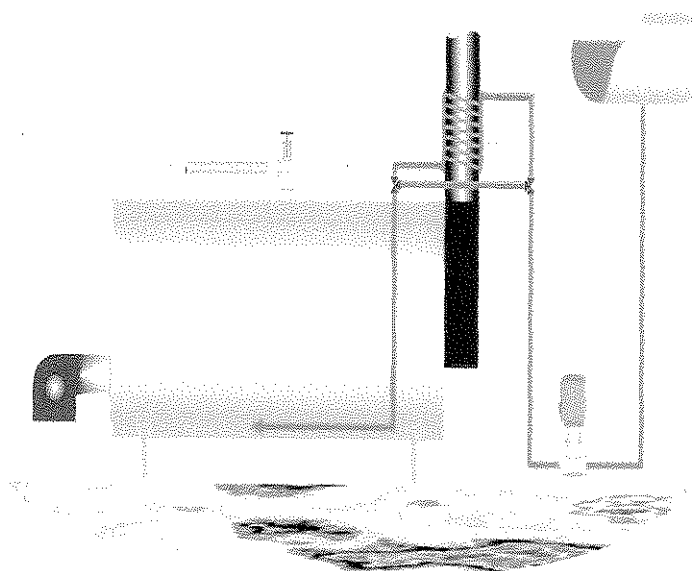




**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**Controle de Eficiência de Combustão em caldeiras
operando com carvão mineral na Fábrica Protal**



Autor: Élio Cardoso Malema

Maputo, Novembro de 2008



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabalho de Licenciatura

**Controle de Eficiência de Combustão em caldeiras
operando com carvão mineral na Fábrica Protal**

Autor: Élio Cardoso Malema

Supervisor: Eng^o. José Chissico

Co-Supervisora dr.^a Candida Aurora Cumbe

Co-Supervisor: dr. Manuel Chenene

Maputo, Novembro de 2008

Dedicatória

Aos meus pais Mário Cardoso Malema e Maria Chiveque,
aos meus irmãos Nino, Dininha, Licinia, Kikas, Solange, Décio e Milocas,
e aos meus sobrinhos Isa, Edinho, Jacyra e Vanito.

Declaração de Honra

Declaro por minha honra, que este trabalho foi completamente realizado com base no material que ao longo do texto se fez referência. As ideias originais nele expressas são da inteira responsabilidade do candidato.

Maputo, Novembro de 2008

Élio M. A. Cardoso Malema

(Élio Mendicinho de Aguiar Cardoso Malema)

Agradecimentos

O meu agradecimento especial vai para ao meu supervisor Eng. José Chissico aos meus Co-supervisores dr. Manuel Chenene (UEM) e a dr^a. Cândida Aurora Cumbe (Ministério da Energia), pela motivação, experiência transmitida, crítica e apoio científico prestado durante a preparação deste trabalho.

A todos os docentes do Departamento de Física em particular: Prpf. Uthui, dr. Cumbane, Prpf. Burdeny, Prpf. Tchernich, Prpf. Rakov, Prpf. Akil, Prpf. Maphossa, dr. Luís, dr. Malate, dr. Lucílio, Prpf. Sacate, pois sem eles não me teria formado.

Aos funcionários do Departamento de Física em especial, dona Rosa, dona Eulália, Sr. Narciso, dona Teresa, dona Fernanda, dona Etelvina, Sr. Elias, Sr. Armando, Sr. Jorge pelo apoio moral em todos os momentos.

A todos os meus colegas do curso em especial Marrengula, Balate, Orlindo, Vância, Ricardo, Machango, Patreque Gigo, Beleza, Salomão, Agostinho, Banga, Castro, Brás, Mauro, Tomé, Calisto, Couve, pela amizade, pelas ricas discussões sobre o presente trabalho e pelo companheirismo durante todo o curso.

Aos meus pais e irmãos que me apoiaram em todos os momentos da vida sem nenhuma hesitação. Ao ser superior que eu chamo Deus, aos meus protectores espirituais, por terem me protegido e me concedido força e sabedoria. E a todos os obstáculos que trouxeram a fé e coragem para seguir sempre em frente.

Abreviaturas e símbolos

A	- Área
CH ₄	- metano
CO ₂	- dióxido de carbono
CO	- monóxido de carbono
C	- carbono
C _p	- calor específico da mistura
GJ	- giga Joules;
K, C	- constantes de Seigert para tipo de combustível
NO _x	- óxidos de Nitrogénio
% Perdas	- perdas totais em percentagem nos gases de escape
%CO ₂	- CO ₂ como percentagem (por volume) do gás nos gases de escape
PCI	- poder Calorífico Inferior
PCS	- poder Calorífico Superior
Q _r	- calor transmitido por radiação
Q	- fluxo de perdas de calor
SO _x	- óxidos de Enxofre
T	- temperatura
T _{gs}	- Temperatura dos gases de saída da câmara de combustão
VOCs	- compostos orgânicos voláteis
ΔT	- diferença de temperatura (°C) entre o ar que entra e o ar de combustão
α	- coeficiente de excesso de ar

Lista de Figuras**Pag.**

Figura 1.1: Análise do consumo de carvão mineral Vs produção de leite.....	3
Figura 2.1: Vazão de ar para a combustão e as perdas de calor nos gases de combustão da caldeira (Georg, 2006).....	8
Figura 2.2: Transferência de calor por condução (Albuquerque et al., 2007).....	9
Figura 2.3: Transferência de calor por convecção (Albuquerque et al., 2007).....	10
Figura 2.4: Transferência de calor por radiação (Albuquerque et al., 2007).....	11
Figura 2.5: Balanço térmico da combustão (Pinheiro, 2007).....	16
Figura 2.6: Emissões de poluentes na combustão (Pinheiro, 2007).....	18
Figura 2.7: Produtos de combustão (Pinheiro, 2007).....	22
Figura 4.1: Consumo de carvão mineral vs produção de leite.....	31
Figura 4.2: Consumo do carvão mineral vs produção de leite condensado.....	32
Figura 4.3: Percentagem de O_2 e de CO_2 Vs Excesso de ar (AMEC, 2004).....	40
Figura 4.4: Escala para excesso de ar extremos (AMEC, 2004).....	40

Lista de Tabelas**Pág.**

Tabela 2.1: Valores aproximados de PCS e PCI de alguns combustíveis (Geraldo et al., 2007).....	6
Tabela 2.2: Valores Usuais do Coeficiente de Excesso de ar (César et al., 2007).....	14
Tabela 3.1: Dados operacionais para o cálculo da eficiência de combustão das caldeiras.....	25
Tabela 3.2: Constantes de Seigert (AMEC, 2004).....	26
Tabela 4.1: Perdas nos gases de combustão nas caldeiras à carvão	33
Tabela 4.2: Ação e consequência de alguns poluentes resultantes na combustão de combustíveis.....	33
Tabela A.1: Dados do consumo de carvão mineral nos últimos 5 anos.....	38
Tabela A.2: Dados do consumo do marine diesel nos últimos 5 anos.....	38

0 Resumo

O presente trabalho tem como objectivo melhorar a eficiência da combustão da caldeira a carvão mineral da Protal para reduzir a níveis aceitáveis os consumos de carvão mineral, para permitir a utilização deste recurso em menores quantidades bem como os impactos que estão associados ao meio ambiente. Foram feitos estudos quanto à eficiência térmica das caldeiras, à estabilidade de combustão e às emissões das caldeiras. Foi em vista a melhorar estas eficiências que se levou a cabo este trabalho que viria a identificar as causas daqueles problemas e recomendar soluções. Apresentado o problema, a mitigação do mesmo começa com uma auditoria energética na instalação de produção, transporte e utilização do vapor, que descartou outras razões para o consumo excessivo do vapor tais como, fugas de vapor, perdas de condensado, não realização de purgas, isolamento das condutas de vapor, etc. O resultado da medição feita sobre as eficiências de combustão e da caldeira mostrou-se abaixo dos limites recomendáveis, e as causas mais prováveis são: baixos ou altos índices de excesso de ar, temperaturas elevadas nas superfícies de troca de calor nas caldeiras, estes são factores determinantes no presente estudo. As recomendações deixadas foram de verificações regulares e sistemáticas das caldeiras para se evitar perdas excessivas de combustível, uma vez que a regulação de combustão tem por objectivo minimizar perdas de energia e de calor, o que implica a redução da temperatura e do excesso do ar a valores mínimos.

Índice	Pag.
Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos	iii
Abreviaturas e símbolos	iv
Lista de Tabelas	vi
0 Resumo	vii
Capítulo I	1
Introdução e Objectivos.....	1
1.1 Introdução	1
1.2. Objectivos.....	2
1.2.1 Geral	2
1.2.3 Motivação	2
Capítulo II	4
Revisão Bibliográfica	4
2.1 Fundamentos da combustão.....	4
2.2 Eficiência de combustão	7
2.2.1 Temperatura dos gases de combustão.....	12
2.2.2 Eficiência da combustão	16
2.2.3 Parâmetros de eficiência energética.....	18
2.2.4 Influência de excesso do ar nos níveis de emissão.....	20
2.3 Perigos ambientais na descarga de carvão mineral e marine diesel nas caldeira	22
2.3.1 Monóxido de Carbono	22
2.3.2 Dióxido de Carbono.....	23
2.3.3 Dióxido de Enxofre.....	23
2.3.4 Óxido de Nitrogénio	24
Capítulo III	25
Material e Métodos	25
3.1 Localização da empresa.....	25
3.3 Métodos	26
3.4 Características das caldeiras	28

Capítulo IV	30
Resultados e discussões	30
4.1 Consumo de carvão mineral	30
Capítulo V	35
Conclusões e Recomendações	35
5.1 Conclusões	35
5.2 Recomendações	35
Referências bibliográficas	36
Apêndice A	39
Dados de consumo de Energia durante cinco anos.....	39
Apêndice B	40
Escalas para excessos de ar.....	40

Capítulo I

Introdução e Objectivos

1.1 Introdução

Ao longo de todo o processo de desenvolvimento industrial, tem sido observado que diversas técnicas de engenharia estão sendo empregues nas caldeiras, e sistemas térmicos de combustão, para permitir a utilização dos combustíveis em menores níveis de consumo, motivado pela necessidade de redução dos custos de produção, como também, dos impactos que os processos de combustão causam sobre o meio ambiente. O controle inadequado de um sistema de queima gera perdas excessivas de calor e combustível. A maior perda apresentada por uma caldeira dá-se pelos gases da combustão que são lançados pela chaminé. O principal problema dos gases lançados para a atmosfera está voltado para as repercussões que podem ter sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente (solo, água, ar e paisagens) (Carvalho, 2004).

O controle de poluição e o controle do rendimento térmico das caldeiras é normalmente realizado de forma independente pelos respectivos operadores. Assim, a inter relação entre o excesso de ar, rendimento térmico e emissão de poluentes é mal compreendida e não é otimizada. O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluentes (CO , SO_2 , NO_x) nas caldeiras.

A indústria de produção de leite condensado (Protal) encontra-se num estágio bastante diferente, percorrendo ao longo dos últimos anos, um caminho inverso no que se refere ao desenvolvimento produtivo, atingindo níveis de produtividade muito baixos. Nota-se que o aumento da produção não é proporcional ao aumento do consumo de carvão mineral. O ritmo de crescimento no consumo dos recursos energéticos é mais elevado que o do aumento da produção, e como resultado tem-se uma baixa eficiência e baixo rendimento das caldeiras. Este facto é mau, se considerar-se que num processo produtivo a produção deve crescer muito mais que os consumos energéticos.

O objectivo deste trabalho é estudar e melhorar a eficiência da combustão nas caldeiras da Protal na queima de carvão mineral para produção de vapor. Para o desenvolvimento da pesquisa de campo foram colhidos dados referentes ao consumo de carvão mineral e marine diesel durante cinco anos. Como resultado deste trabalho, espera-se que venha fornecer parâmetros aos operadores das caldeiras

para a regulação adequada de um sistema de queima, e para evitar perdas excessivas de calor e combustível, e definindo medidas para a gestão da qualidade de ar.

1.2. Objectivos

1.2.1 Geral

- ✓ Melhorar a eficiência da combustão da caldeira à carvão mineral para reduzir a níveis aceitáveis os consumos de carvão mineral.

1.2.2. Específicos

- ✓ Verificar os parâmetros de eficiência energéticos compatíveis às caldeiras da Protal;
- ✓ Encontrar valores óptimos dos indicadores da eficiência energética com vista o consumo de carvão naquela caldeira.

1.2.3 Motivação

O elevado consumo de carvão mineral na Protal afecta a gestão económica da empresa. Assim surge a necessidade de uma boa regulação dos equipamentos de queima de combustível, permitindo uma redução da demanda como também para se evitar perdas excessivas de calor e combustível, bem como os impactos que o processo de combustão causam para o meio ambiente.

A figura 1.1 mostra os consumos de carvão mineral durante cinco anos na Protal. Da análise dos valores das intensidades de consumo de recursos energéticos apresentados na figura relativo à eficiência de combustão, nota-se que o aumento da produção não é proporcional ao aumento no consumo de carvão, sendo este maior que a produção.

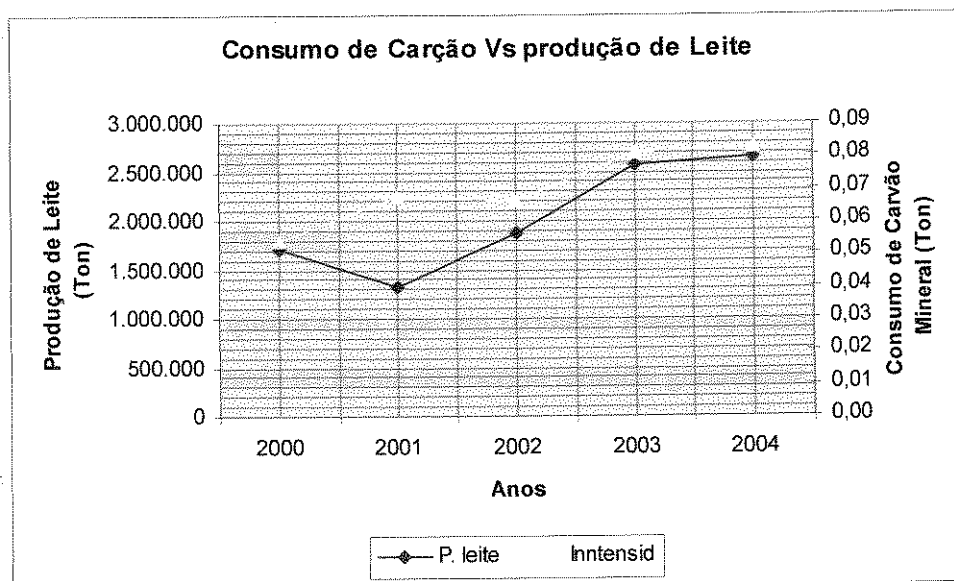


Figura1.1: Análise do consumo de carvão mineral Vs produção de leite

O excesso de ar proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deve ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Deve-se conhecer a quantidade ideal mínima possível de excesso a ser introduzida na queima, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama, sem contribuir para a reacção. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e conseqüentemente maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão.

A figura abaixo apresenta uma relação entre a vazão de ar para a combustão e as perdas de calor nos gases de combustão da caldeira. Pode-se observar que caminhando-se da esquerda para a direita, passa-se de uma zona onde as perdas de energia se dão através de combustíveis não queimados para outra onde estas perdas ocorrem por excesso de ar. Existe entretanto, na transição entre as duas curvas, uma zona de máxima eficiência de operação, ou seja, onde as perdas são mínimas. A largura desta faixa de perdas mínimas depende das particularidades da instalação, do tipo de queimadores e do combustível.

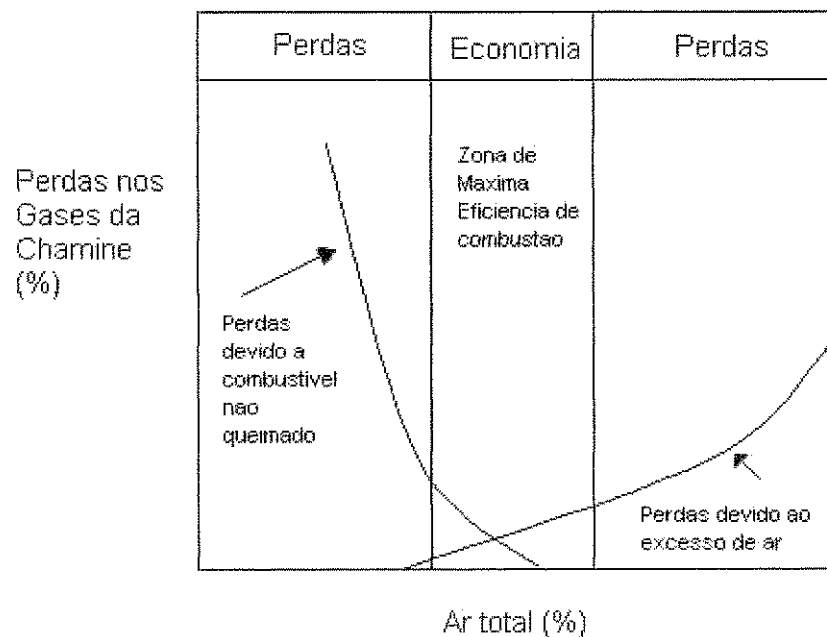


Figura 2.1: Vazão de ar para a combustão e as perdas de calor nos gases de combustão da caldeira (Georg, 2006)

Aliada a eficiência de combustão, a eficiência térmica é definida como a medida da eficácia da troca de calor (Arthur et al., 2004). Ela mede a habilidade em transferir calor do processo de combustão para a água ou vapor na caldeira. Por ser unicamente uma medida da eficácia da troca de calor da caldeira, ela não leva em conta a radiação e perdas por convecção da caldeira, coluna de água, ou outros componentes.

Eficiência da caldeira é a eficiência pura da transferência de calor do combustível para o vapor, a qual leva em conta a radiação e perdas por convecções. É uma indicação verdadeira da eficiência total da caldeira. A geração de vapor é uma importante operação industrial, presente em uma infinidade de processos e segmentos. Atualmente, o vapor constitui o modo mais econômico e prático de se transferir calor em processos industriais. Segundo (Anderson et al., 2007), os mecanismos de transferência de calor são:

Condução

É um método no qual o calor flui pelo contacto direto, molécula a molécula, do corpo. Ocorre normalmente em corpos sólidos. Nas caldeiras, a condução ocorre no metal dos tubos e dispositivos de troca térmica, onde o calor flui da face de maior temperatura (em contato com os gases quentes ou fornalha) para a de menor temperatura (por onde circula a água).

Exemplo:

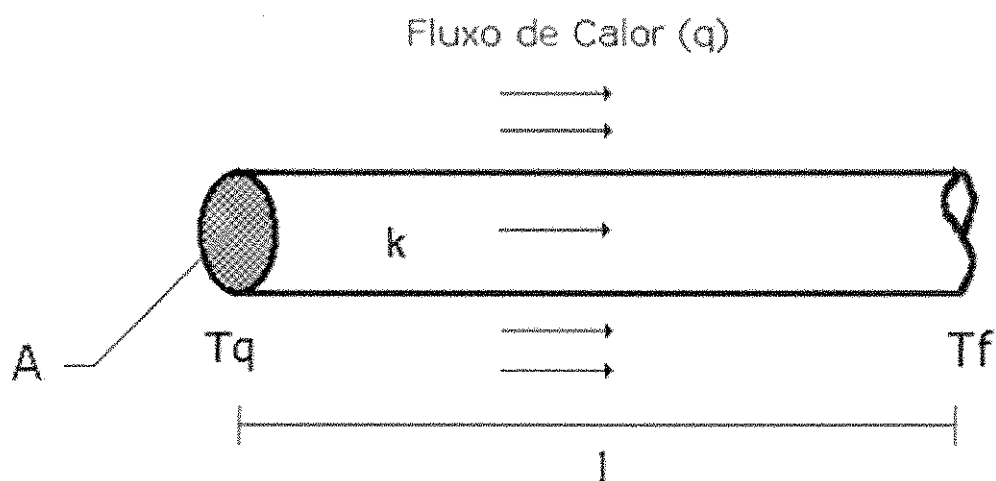


Figura 2.2: Transferência de calor por condução (Albuquerque et al., 2007).

Lei de Fourier

O processo de transferência de calor por condução ou condutibilidade térmica determina-se por lei de Fourier.

$$q = k \times A \frac{T_q - T_f}{l} \quad (2.12)$$

Onde

$$T_q > T_f$$

k- Condutibilidade térmica $\left(\frac{W}{h \times m^2 \times oC}\right)$

T- Temperatura

A- Área

Convecção

É um processo que consiste basicamente na transferência de calor envolvendo corpos fluidos (líquidos ou gases). A convecção é sinal de movimento, podendo ser natural ou forçada. Nas caldeiras, ocorre transferência de calor por convecção dos gases quentes para as superfícies dos tubos e das superfícies aquecidas dos tubos para a água. Exemplo:

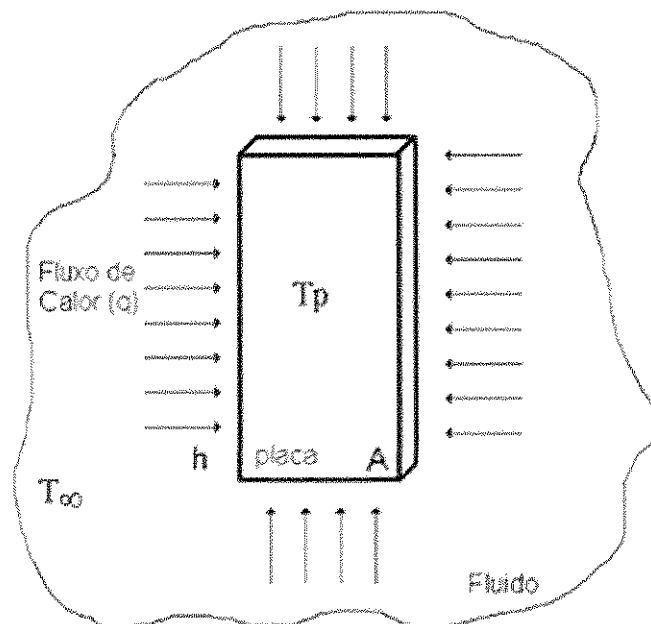


Figura 2.3: Transferência de calor por convecção (Albuquerque et al., 2007).

Lei do resfriamento de Newton

O processo de transferência de calor por convecção determina-se por lei de resfriamento de Newton.

$$q = h \times A \times (T_{\infty} - T_p) \quad (2.13)$$

Onde:

$$T_{\infty} > T_p$$

h- Coeficiente de transferência de calor por convecção ($\frac{W}{m^2 \times ^\circ C}$)

Radiação

É um processo predominante em temperaturas mais elevadas (acima de 500°C). O calor neste caso é transmitido por meio de ondas eletromagnéticas, altamente dependente da diferença de temperatura. Numa caldeira, ocorre transferência por radiação do fogo para a área irradiada da fornalha. As perdas de calor através das paredes – perdas por radiação – em caldeiras modernas podem ser, considerando os melhores índices, de cerca de 1% do poder calorífico do combustível. Poderão, entretanto, ser muito mais elevadas em caldeiras mais velhas, atingindo até 10% quando o isolamento está em más condições e o projecto é antigo. No caso específico da protal as perdas por radiação podem atingir valores elevados pelo facto das caldeiras serem antigas.

Exemplo:

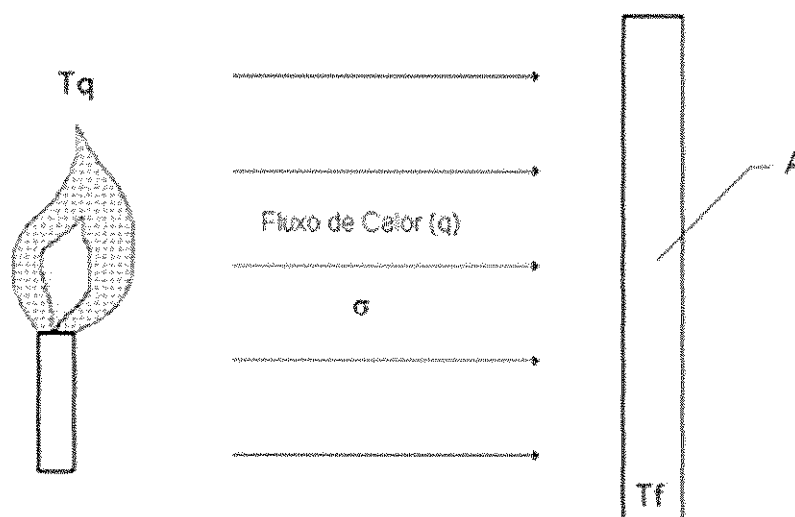


Figura 2.4: Transferência de calor por radiação (Albuquerque et al., 2007).

Lei da radiação

O processo de transferência de calor por radiação ou por ondas electromagnéticas determina-se por lei de Stefan-Boltzman.

$$q = \sigma \times \varepsilon \times A \times (T_q^4 - T_f^4) \quad (2.14)$$

ε - Emissividade

σ - Constante de Stefan-Boltzman ($5,669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \times K^4}$)

2.2.1 Temperatura dos gases de combustão

A temperatura dos gases é um factor importante no controle da eficiência e perdas da combustão, pois de nada adianta uma combustão ser completa e perfeita, se não for eficiente, isto é, se o calor por ela produzido não for o máximo. A temperatura dos gases é medida logo após a saída dos mesmos da câmara de combustão, o que significa que a partir dessa etapa a transferência de calor deixa de ser útil. O controle da combustão é extremamente importante, pois serve para evitar a perda de calor e, conseqüentemente de combustível, elevando a eficiência de queima dos equipamentos e diminuindo o consumo de combustível.

As perdas podem também ocorrer devido à admissão de quantidades excessivas de combustível nas caldeiras. Quando o combustível é colocado em excesso, parte deste acaba saindo pela chaminé sem ser queimado. Nestes casos, vê-se uma fumaça muito negra a ser escapada da chaminé. Estas perdas são geralmente associadas a um ajuste errado de queimadores e/ou a superfícies para a transferência de calor sujas.

Baixos índices de admissão de combustível são facilmente detectáveis dado que a produção da caldeira torna-se baixa. Uma verificação regular da temperatura da chaminé pode assegurar uma optimização da produção do queimador.

A experiência tem mostrado que muitos queimadores são ajustados erradamente, em particular sob condições de carga baixa. O ajuste de ligações, bombas de combustível, afecta o desempenho do equipamento de conversão de energia. A verificação regular da combustão pode identificar quaisquer defeitos de manutenção, limpezas, etc.

Na combustão o objectivo é obter o máximo possível de calor. Não basta porém que o rendimento calorífico atenda às necessidades requeridas, é preciso que isto seja feito de forma económica. A fim de maximizar-se o rendimento da combustão, deve-se obter o melhor aproveitamento possível do potencial energético do combustível através de alguns factores operacionais, como:

- Regular a relação ar-combustível;
- Proporcionar uma perfeita mistura ar-combustível.

A melhor mistura do combustível com o ar aumenta a superfície de contacto entre ambos e têm influência decisiva na velocidade de combustão. Quanto melhor a união dos elementos, melhor a combustão.

A quantidade de ar que fornece o oxigénio teoricamente suficiente para a combustão completa do combustível é chamada de "ar teórico" ou "ar estequiométrico". As quantidades teóricas de oxigénio e ar para a combustão podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas:

$$\begin{aligned}
 MTO_2 &= 2.66 C + 8 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 1 S \text{ (\% em peso)} \\
 MTar &= 11.5 C + 34.8 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4.35 S \\
 VTO_2 &= 1.86 C + 5.6 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0.7 S \text{ (\% em volume)} \\
 VTar &= 8.85 C + 26.65 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.33 S
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Onde:

MTO_2 - é a massa teórica do oxigénio (% de oxigénio no combustível).

$MTar$ - é a massa teórica do ar (% de hidrogénio no combustível).

VTO_2 - é o volume teórico do oxigénio (de oxigénio no combustível).

$VTar$ - é o volume teórico do ar (% de S no combustível).

A quantidade teórica de ar necessária à combustão pode ser calculada com boa aproximação, pela seguinte fórmula:

$$\text{Kg} \frac{\text{Ar}}{\text{Kg}} \text{ combustível} = 11,5 C + 34,7 H_2 + 4,3 S$$

Onde o C, H_2 e S representam, respectivamente, as percentagens de carbono, hidrogénio e enxofre no combustível.

Na prática, sabe-se que é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico. Se utilizarmos somente o "ar teórico", há grande probabilidade do combustível não queimar totalmente (haverá formação de CO ao invés de CO_2) e conseqüentemente a quantidade de calor libertada será menor.

Para se garantir a combustão completa recorre-se a uma quantidade adicional de ar além do estequiométrico, garantindo desse modo que as moléculas de combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigénio para completar a combustão. Essa quantidade de ar adicional utilizada é chamada de excesso de ar. O excesso de ar é a quantidade de ar fornecida além da teórica. O coeficiente de excesso de ar (α) é um modo de se expressar a relação ar-combustível, e é a razão da quantidade total de ar utilizada na combustão (V_{ar}) (kJ/Kg de combustível ou m^3/Kg de combustível) e a quantidade de ar estequiométrica V_{ar}^o .

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^o} \quad (2.16)$$

O valor de α pode ser calculado a partir da composição volumétrica (%) dos produtos de combustão:

$$\alpha = \frac{\%CO_{2\text{estequiométrico}}}{\%CO_2} \quad (2.17)$$

$$\alpha = 20,9[20,9 - (\%O_2 - \%CO_2)] \quad (2.18)$$

O excesso de ar é factor determinante da eficiência de combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos de combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, porque diminui a temperatura da chama, e aumenta as perdas de calor devido a entalpia dos gases efluentes

(Q_2), reduzindo a eficiência térmica, além de diminuir o comprimento da chama. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na formação de monóxido de carbono (CO), fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando riscos de explosão.

O valor óptimo do excesso de ar é aquele onde estes dois parâmetros estão em equilíbrio suficientemente baixo, para minimizar as perdas de calor Q_2 sem produzir combustão incompleta. Assim o valor óptimo depende da eficiência de combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para NO_x e CO , e é obtido experimentalmente pela análise dos produtos de combustão durante o ajuste do equipamento de combustão.

$$Q = V_g \times C_{Pg} \times T_g - V_{ar}^0 \times C_{Par} \times T_{ar} \quad (2.19)$$

Onde;

V_g , C_{Pg} e T_g são respectivamente o volume (m^3/kg CNTP), calor específico e temperatura de saída dos gases efluentes ($^{\circ}C$).

Tabela 2.2: Valores Usuais do Coeficiente de Excesso de ar (César et al., 2007).

Combustível	Tipo de fornalha ou queimador	α
Carvão pulverizado	Aquatubular completa	1,15-1,20
	Aquatubular parcial fundo seco	1,15-1,40
Carvão britado	Fornalha ciclone	1,10-1,15
Carvão	Grelha fixa	1,30-1,60
	Grelha vibratória	1,30-1,60
	Grelha rotativa	1,15-1,151
	Grelha fixa alimentação por baixo	1,20-1,15
Diesel	Queimadores de óleo tipo registo	1,05-1,15
	Queimadores multi-combustíveis	1,05-1,20
Gás natural	Queimadores tipo registo	1,05-1,10
Bagaço	Todas as fornalhas	1,25-1,35
Madeira	Grelha	1,20-1,25

2.2.2 Eficiência da combustão

A eficiência da combustão (η_c) é dada por (Da Silva, 2005):

$$\eta_c = \left(\frac{Q_{\text{disp}} - Q_2 - Q_3}{Q_{\text{disp}}} \right) \quad [\text{adm}] \quad (2.20)$$

Onde: Q_{disp} é a energia disponível para a combustão, Q_2 é a entalpia dos gases efluentes e Q_3 a perda de calor devido a combustão incompleta.

$$Q_3 = 126,4 \times V_{\text{gs}} \times \%CO \quad [\text{kJ/Kg de combustível}] \quad (2.21)$$

Onde V_{gs} é o volume dos produtos da combustão secos em (m^3/kg CNTP).

A eficiência de combustão é obtida minimizando $Q_2 + Q_3$. Estas perdas de energia são funções da composição e temperatura dos produtos de combustão, isto é, pelo excesso de ar nas caldeiras. Uma vez que as emissões são componentes do produto de combustão, a análise completa e a temperatura dos produtos é necessária para determinar a eficiência da combustão e os níveis de emissão. Geralmente a eficiência da combustão depende mais do método operacional do que dos queimadores e equipamentos auxiliares, ou seja a eficiência do processo de combustão está ligada a precisão do ajuste do excesso de ar de combustão.

Excesso de ar ótimo

A dificuldade da análise e do controle do processo de combustão real, é devido ao facto que o coeficiente de excesso de ar afecta a eficiência e os níveis de emissão de maneiras diferentes. Assim, para simplificar, o efeito de coeficiente de excesso de ar será analisado em quatro faixas. As figuras 2.4 e 2.5 representam valores típicos de eficiência e níveis de emissão.

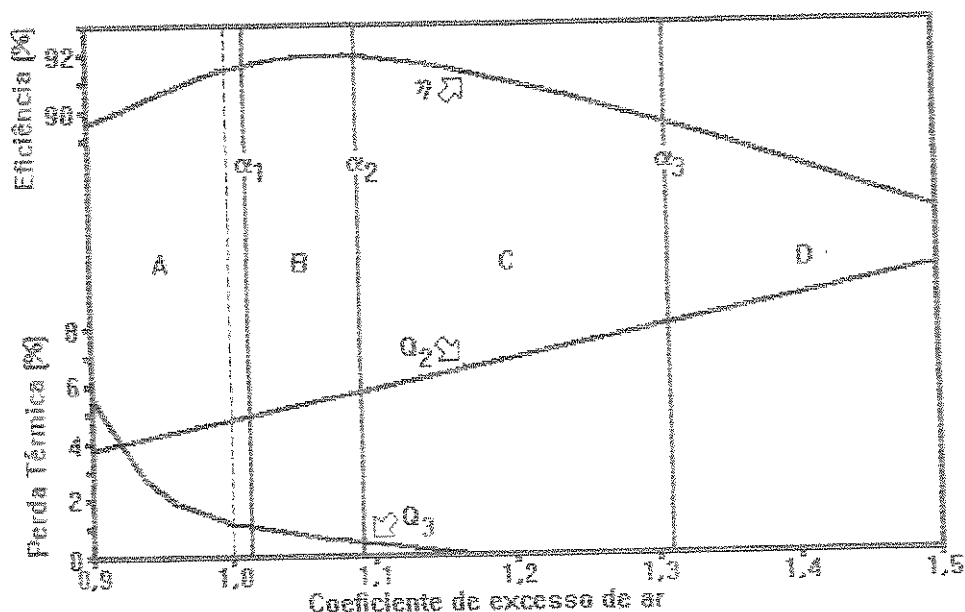


Figura 2.5: Balanço térmico da combustão (Pinheiro, 2007).

A combustão com excesso de ar inferior a α_1 (faixa A), não é aceitável, porque o teor de CO nos produtos de combustão excede os limites. Com excesso de ar entre α_1 e α_2 (faixa B), tem-se uma combustão quase completa e um baixo α . Esta faixa é ideal devido as baixas emissões de CO e NO_x , é a alta eficiência de combustão. Entretanto, para operar na faixa B é necessário ajustar os queimadores ou modificar radicalmente o processo de combustão.

Na faixa C, os níveis de emissão de NO_x excedem os limites da norma, e a operação só é possível com equipamento de tratamentos dos gases efluentes. A eficiência de combustão é inferior a da faixa B, mas ainda é aceitável. Na faixa D, os níveis de emissão de CO e NO_x , encontram-se dentro dos limites, mas a eficiência é baixa.

Pela análise da figura 2.5, verifica-se que a operação deve ser realizada nas faixas B ou C. Entretanto para operar nestas faixas muitas vezes é necessário implementar modificações no processo, ou instalar equipamentos de pós-combustão dos produtos. O balanço económico (investimento/operação) vai determinar a instalação destes equipamentos, ou mesmo determinar a operação fora da região de eficiência óptima (faixa D).

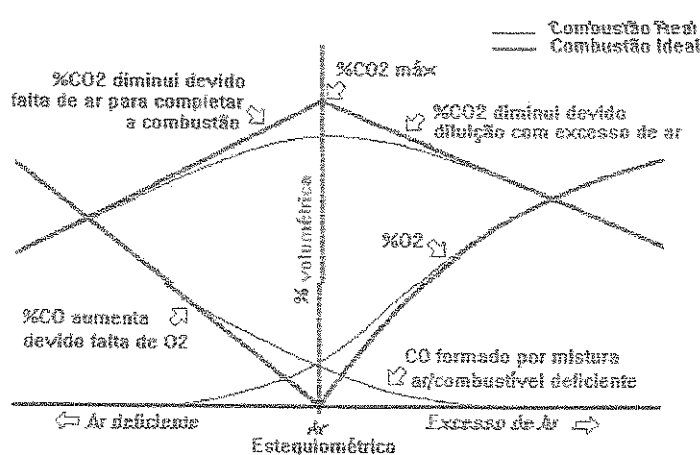


Figura 2.7: Produtos de combustão (Pinheiro, 2007).

O controle de excesso de ar pode ser realizado a partir da análise do teor de CO_2 (equação 2.16). Analisadores de O_2 têm sido muito usados no controle da combustão, pois são de baixo custo, possuem tempo de resposta pequeno, baixa manutenção e medem directamente o excesso de ar na chaminé. A formação de CO é devido a uma quantidade de ar local insuficiente para completar a combustão. Se a combustão é completa, o nível de CO tende a zero uma vez que a mistura ar/combustível perfeita não é realizáveis, os níveis práticos de CO são, para qualquer combustível ou combinação de combustíveis, a qualquer carga entre 120 e 250 ppm.

2.3 Perigos ambientais na descarga de carvão mineral e marine diesel nas caldeira

Todos os métodos de queima de carvão mineral e marine diesel causam algum impacto ambiental. Os principais poluentes e seus efeitos emitidos pelas chaminés das caldeiras na combustão de carvão mineral e marine diesel são:

2.3.1 Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro, incolor, insípido produzido por queima incompleta de combustíveis que contém átomos de carbono. Sua toxicidade foi uma das primeiras a ser intensamente investigada. O monóxido de carbono é um gás inerte, não constituindo grande ameaça à vegetação ou aos materiais expostos à atmosfera. No entanto, se aspirado em determinadas quantidades pode causar a morte. No sangue ele possui um efeito muito perigoso quando forma um complexo estável com a hemoglobina: se aproximadamente 2% dela estiver ligada ao CO, a

- Às perdas dos gases de combustão;
- Às perdas de calor para o meio ambiente (perdas por radiação);
- Às perdas de “descarga de fundo”.

Pode-se exprimir esse somatório em forma da equação:

$$RTC = 100\% - (\% PPGC + \% PPR, \text{ect.} + \% PPP) \quad (3.2)$$

Onde;

RTC - Rendimento térmico da Caldeira;

PPGC - perdas nos gases de combustão;

PPR - perdas por radiação;

PPP - perdas por purgas.

Tabela3.2: Constantes de Seigert (AMEC, 2004)

Tipo de combustível	K	C
Gasóleos	0,56	6,5
Carvão mineral	0,63	5,0
Gás natural	0,38	11,0

Para o cálculo da eficiência físico-termodinâmico foi utilizada a seguinte fórmula:

$$IFTEE = \frac{\text{Quantidade total de energia térmica}}{\text{Quantidade total de leite produzido}} \quad (3.2)$$

Onde: IFEE é indicador físico termodinâmico de eficiência energética.

O carvão utilizado possui, segundo a terminal de carvão de Matola, a seguinte composição química: Carbono total 66,43 %, cinzas 15,20 %, água combinada 9,40 %, hidrogénio 4,07 %, humidade 2,5 %, enxofre 1,23 % e nitrogénio 1,17 %. Devido a escassez de informação não foi possível obter

informações referentes a características de marine diesel. A seguir descreve-se o princípio básico de funcionamento dos equipamentos de medição:

Termómetro sem contacto (Infravermelho)

Este tipo de aparelhos de medida serve para medir a temperatura de gases de combustão, medindo a quantidade de radiação infravermelha emitida. O aparelho possui um filtro especial que elimina as interferências do vapor de água e do dióxido de carbono existentes na atmosfera, e um conjunto óptico que direcciona os raios infravermelhos para um detector que, por sua vez, gera uma tensão directamente proporcional à quantidade de energia infravermelha recebida (Aníbal, 2005).

Analizador de gases de combustão

Em termos simples o seu funcionamento consiste em aspirar os gases de combustão pela bomba e passa através do purgador de condensados de modo a evitar a degradação das células de medida. O termopar colocado na sonda de aspiração de gases mede a temperatura dos gases de combustão.

3.4 Características das caldeiras

Com o objectivo de melhor descrever o processo de operação da caldeira escolhe-se começar pela condição de caldeira totalmente fria. Seu processo de aquecimento para obter a temperatura ideal de ignição da mistura ar-combustível depende do sistema eléctrico de pré-aquecimento, que é empregue para aquecer o combustível. A fim de se conseguir a estabilidade do processo de combustão e, também, do processo de vaporização, a caldeira deve funcionar com um escoamento de água adequadamente regulado para cada condição de operação. No sistema de alimentação de água, existe uma válvula que interrompe e deixa fluir água no seu interior, não há tratamento da água fornecida às caldeiras e não há controle da quantidade da água de alimentação. O corpo da caldeira possui dois orifícios por onde escapa a energia, as condutas de distribuição do vapor não estão totalmente isoladas em alguns troços. Naturalmente, a distribuição de temperatura dentro da caldeira vai formando um perfil, em que os trocadores de calor contribuem fortemente nas perdas de calor.

Características da caldeiras à carvão:

Marca: John Thompson Africa

Tipo: Flamotubular

Combustível: Carvão mineral

Capacidade da caldeira: 10 ton/h

Pressão máxima do vapor: 7.5 bar

Tipo de vapor: Saturado

Capítulo IV

Resultados e discussões

Neste capítulo faz-se uma apresentação dos resultados obtidos na pesquisa de campo. Neste capítulo, são analisados a evolução do consumo de energia térmica, e os parâmetros físico-termodinâmico de eficiência energética.

De acordo com Yolanda (2003), o consumo energético no sector industrial é determinado pelo nível de actividade, estrutura do sector e a eficiência energética. As mudanças no consumo de energia das indústrias não são exclusivamente relacionadas a melhoramentos em eficiência energética nos processos industriais, mas também a vários outros factores, políticos e ambientais.

4.1 Consumo de carvão mineral

O carvão mineral, queimado para geração do vapor, é o recurso energético mais usado na fábrica Protal, e portanto deve-se tomar muita atenção nos registos do seu uso e se de facto a caldeira à carvão funciona em períodos estritamente necessários.

Observando a figura 4.1, verifica-se variações nos níveis de produção de leite condensado, registando-se entre os anos 2001 a 2002 e 2003 a 2004 um aumento de produção de leite, isto é, registou-se grandes níveis de consumo de carvão naquele período.

A tendência de consumo de carvão mineral tende sempre a aumentar aumentando assim as perdas de calor. As grandes perdas de energia são devido a vários factores: superfícies de troca de calor sujas, ainda que as quantidades mínimas de excesso de ar sejam necessárias para assegurar uma boa combustão, excesso de ar demasiado elevado conduz a diminuição da eficiência térmica, dado que grandes quantidades de gases de escape são produzidas e descarregadas para a atmosfera.

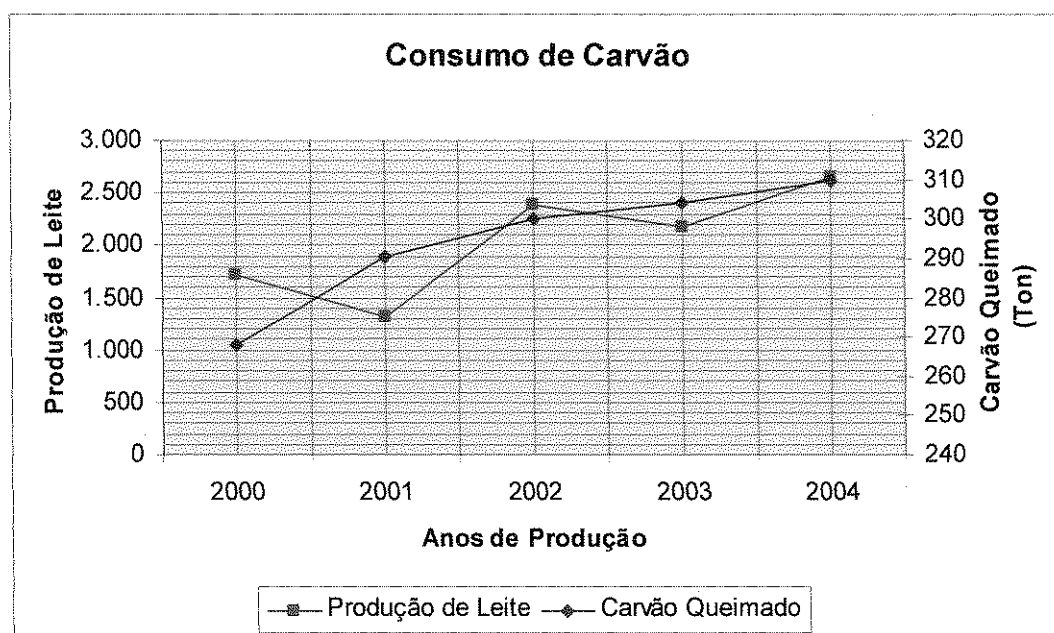


Figura 4.1: Consumo de carvão mineral vs produção de leite

De forma semelhante discute-se nas figuras 4.3 e 4.4 os consumos de recursos energéticos relativos às intensidades. Da análise dos valores das intensidades de consumo de recursos energéticos apresentados na figura 4.3 relativo a eficiência de combustão, nota-se em algumas faixas do gráfico que o aumento da produção não é directamente proporcional ao aumento no consumo de carvão mineral, isto é, verifica-se uma baixa eficiência de combustão.

Uma boa eficiência de combustão deve ser alcançada com menor intensidade de energia e elevados níveis de produção, o que se verifica na caldeira à carvão mineral é o contrário quanto ao desenvolvimento produtivo, atingindo mesmos níveis de produção mas com elevado consumo de carvão. Uma vez que não há tratamento de água fornecida às caldeiras, verifica-se superfícies de aquecimento sujas ou incrustações nas superfícies do lado da água. As superfícies sujas diminuem a transferência de calor e como consequência verifica-se uma rejeição de grandes quantidades de calor para a chaminé junto com os gases de escape a temperaturas elevadas resultando numa baixa eficiência de combustão.

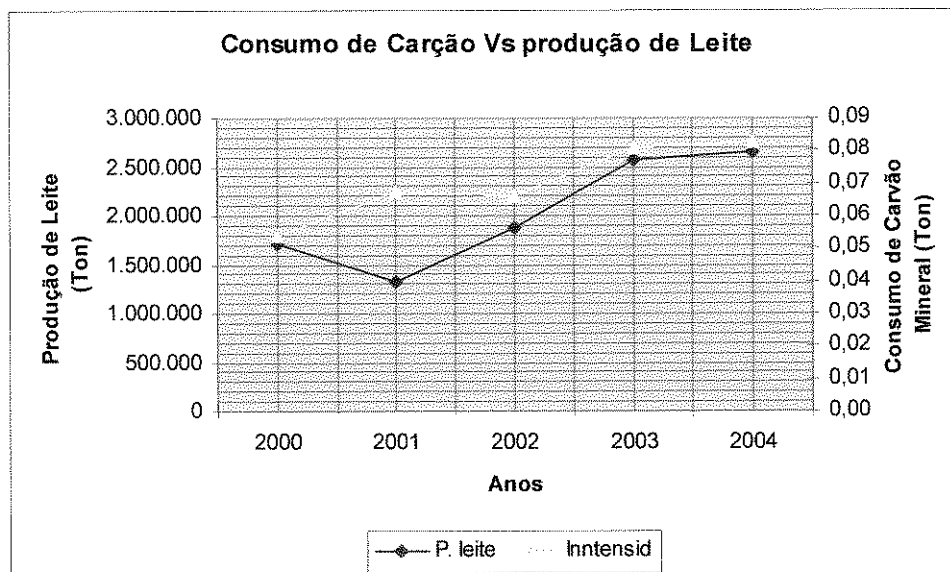


Figura 4.2: Análise do consumo de carvão mineral Vs produção de leite

Cálculo de perdas nos gases de escape na caldeira à carvão mineral

As perdas nos gases de combustão são calculadas segundo os dados medidos, vide a tabela 3.1. Na última etapa usou-se a fórmula de Seigert 3.1 dada no capítulo 3.1

A formula de Seigert da uma aproximação das perdas nos gases de combustão através de medição de percentagem de oxigénio e dióxido de carbono.

$$\%perda = \frac{K \times \Delta T}{\%CO_2} + C$$

Onde K e C são constantes chamadas constantes de Seigert para tipo de combustível.

Perdas: Medição 1

Temperatura dos gases de escape TGE(°C)= 300

Temperatura ambiente TA(°C)=32

Excesso de ar $\alpha = 150$ correspondente a $\%CO_2$ de 7,5% segundo o gráfico no apêndice 2.

K=0,63 para carvão mineral

C=5

$\Delta T = 300 - 32 = 268$ °C

As perdas por radiação são de 5%

Perdas por purgas estimas são de 5%

Substituindo esses valores na formula de Seigert temos:

$$\%perda = \frac{K \times \Delta T}{\%CO_2} + C$$

$$\%perda = \frac{0,63 \times 268}{7,5} + 5 = 27,5\%$$

$$\% \text{ Produção} = 100 - 27,5 = 72,5\%$$

A média das perdas nos gases de combustão (PPGC) é de 29,6% correspondente a uma eficiência de 70,4%. Admitindo perdas por radiação (PPR), convecção, condução e perdas por purgas (PPP) estimadas em 10%, o rendimento térmico da caldeira calcula-se pela fórmula 3.2 do capítulo 3:

$$RTC = 100\% - (\% PPGC + \% PPR, \text{ect.} + \% PPP)$$

$$RTC = 100\% - (29,6 + 5 + 5) = 60,4\%$$

A tabela 4.1 mostra resumidamente as perdas nos gases de combustão de carvão mineral calculadas segundo a fórmula de Seigerte 3.1 dada no capítulo III. Na queima térmica são perdidos em media 29,6% de carvão mineral correspondente a uma eficiência 70,4%. Admitindo as perdas por radiação, convecção, condução e por purgas estimadas num valor de 10%, as perdas totais são de 39,6% correspondendo a uma eficiência de 60,4%. Segundo (Carlos, 2004) estudos realizados sobre eficiência de combustão nas caldeiras, considera-se boa eficiência quando o rendimento da caldeira for igual ou superior a 80%. As eficiências encontradas no presente estudo considera-se baixa uma vez estar abaixo dos parâmetros das eficiências recomendáveis para caldeiras flamotubulares.

Tendo em conta a fórmula de Seigert 3.1 do capítulo 3, e a tabela 4.1 abaixo relativo as perdas de combustão, verifica-se que os factores mais determinante nos cálculos é a variação da temperatura e o excesso de ar, isto é, quando excesso de ar (α) for maior as perdas tendem a piorar e quando. De igual modo quando as temperaturas são elevadas as perdas nos gases de combustão também são maiores.

Tabela 4.1: Perdas nos gases de combustão na caldeira à carvão mineral.

Caldeira Carvão Mineral	Dados do combustível	Perdas na Combustão	Produção
Medição 1	100%	27,5%	72,5%
Medição 2	100%	30,4%	69,6%
Medição 3	100%	34%	66%
Medição 4	100%	30,2%	69,8%
Média	100%	29,6%	70,4%
O rendimento da caldeira é de 60,4% correspondente a perdas medias de 39,6% calculadas segundo a formula 3.2 dada no capítulo 3.			
Rendimento da Caldeira	100%	39,6	60,4

Estas perdas são devidas a vários factores como (temperaturas elevadas, excesso de ar baixo ou alto) e pode resultar numa combustão incompleta libertando vários poluentes que agem de formas diferentes no organismo humano, como ilustra a tabela 4.2.

Tabela 4.2: Acção e consequência de alguns poluentes resultantes na combustão de combustíveis.

Poluente	Modo de Acção	Consequências
CO	Combina-se com a hemoglobina do sangue no lugar de O ₂ , impedindo a circulação do O ₂ no organismo.	Dor de cabeça, cansaço, desconforto, palpitações no coração, vertigem, diminuição dos reflexos. Em ambiente fechado causa morte.
NO _x	Transforma-se em ácido nítrico em contacto com os líquidos do corpo.	Irritação dos olhos, nariz, garganta, pulmões. Agrava doenças respiratórias
Material particulado (Poeira e fuligem)	Abaixo de 10 μ m não são retidos pelas defesas naturais do organismo (pelos das mucosas).	Irritação e entupimento dos alvéolos pulmonares

Referências bibliográficas

- Alvares, J., João, L. A., & Julio, S. M. (2005). Qualidade de Energia Elétrica na Indústria, Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho, OnLine acessado aos 21 de Setembro de 2007, URL: <http://www.sbgensino.foco.ufmg.br/uploads/303.pdf>.
- Aníbal, T.A. Patrão, C & Moura, P. (2005) *Manual de boas práticas de eficiência energética*, Dep. de Eng. Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra.
- Albuquerque, E. C e Emerson J. (2007), *Optimização das variáveis do processo de produção de carvões activados a partir do mesocarpo do coco verde*
- Antunes, F.A. (2005). Relatório de actualização dos processos de Co-incineração de resíduos em articulação com a Cirver. OnLine acessado aos 21 de Agosto de 2007, URL: <http://www.ens.ufcs.br/grade/displinas/ens5133/dispersao>.
- Arthur N. C, Rafael F. J., Paulo M. S; (2004). Uma proposta de incorporação de indicadores de ecoeficiência ao setor termelétrico brasileiro a carvão mineral- Universidade de São Paulo,
- Borba, J. (2005). *Participação das Fontes Energéticas Primárias no Consumo Mundial*, volume 26. Belo Horizonte.
- Castro, N. (2006). *Gestão do Conhecimento e Matriz Energética-Trabalho* apresentado no Seminário do Conhecimento da Economia do estado do rio de Janeiro, OnLine acessado aos 30 de Agosto de 2007, URL: http://www.greenpeace.org.br/tóxicos/pdf/factsheet_incineracao.
- Carvalho, J. C. (2004). *Um Estudo Numérico da Dispersão de Poluentes na Camada Limite Convectiva*. Master's thesis, Universidade de São Paulo IAG-USP, OnLine acessado aos 21 de Maio de 2008], URL: www.ebape.fgv.br/radma/doc/FET.
- Cengel, Yunus A. (1994). *'Thermodynamics, an engineering approach'*. Editora MacGraw – Hill, USA.
- Coelho, S.T. (1999). Mecanismo Para Implementação de Cogeração de electricidade a partir de Biomassa, Tese apresentado ao programa Internacional de Pós –Graduação em Energia para obtenção do título de Doutor em Energia - Universidade de São Paulo, OnLine acessado aos 21 de Agosto de 2007, URL:<http://www.Petrobras.com.br/ri//Comperj-280306pdf>.

Corson, H.W. (1993). *Manual Global de Ecologia*, São Paulo, 1st, Edition, Editora Augustus, São Paulo.

Da Silva, R.N. (2005) *Sustentabilidade de Sistemas Energéticos*, Universidade Naval de Lisboa.

Gaspar, C. (2004), *Agencia para a Energia*, Curso de Eficiência Energética na Industria.

Geraldo F. B., Paulo H. K e Miguel E. M (2007). *Uso Racional e Económico da Energia dentro de uma Indústria Metalúrgica: Oportunidade de troca de electricidade para gás natural*

ISR-Universidade de Coimbra, Projecto EETT - Energy Efficiency Trayning of Trainers, Brochura preparada para a formação de Gestão de Eficiência Energética, implementado por MVV. Consulting e Intelligent Energy Europe, Janeiro de 2005.

Lisboa, H. M. (2005). *Controle da Poluição Atmosfera Ens. Technical report*, Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, OnLine acedido aos 21 de Outubro de 2007, URL: <http://www.ens.ufsc.br/grade/displinas/ens5133/dispersao>.

Patrão, C. (2005). Qualidade de Energia Eléctrica, ISR- Dep. De Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra.

Paulo, H. G. e Adilson, O. (1999) Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Eléctrica, Escola Federal de Engenharia Itajubá/ Grupo de Estudos Energéticos.

Pinheiro, Paulo César da Costa (1992). Utilização de Combustíveis Alternativos em Caldeiras. In: IV Encontro Nacional de Ciências Térmicas Dezembro 1992, Rio de Janeiro.

Pinheiro, Paulo César e Ramon Molina Valle, (2007) Controle de Combustão Optimização do excesso do ar Departamento de Engenharia Macânica da UFMG Belo Horizonte.

Santos, J. M., Nieckele, H., and Azevedo, L. F. (1993). Efeitos da Velocidade Terminal da Dispersão de Poluentes na Atmosfera, volume 3. Brasilia

SADC Industrial Energy Management Project Equipamento de queima de Combustível, Implementado pela AMEC, Services Limitada para a agência Canadiana para o Desenvolvimento Internacional 2004.

Shopes, C. A (1994), *Ministério de Minas e de Energia*, Conservação de Energia Elétrica na Industria volume 1. Rio de Janeiro.

Shereve, R. N e Joseph, A. B. (1997). *Industria de processos químicos*, São Paulo, 4ª Edição, Editora Guanabara Koogan S.A.

Tipler, Paul A. (1984) *Física Electricidade e Magnetismo* 3ª Edição Editora GUANABARA KOOGANS S.A. Rio de Janeiro.

Udaeta, M. Baitelo, R e Grimoni, J. (2006), *Comparação da Produção de Energia com diesel e biodiesel analisando todos os custos envolvidos*, São Paulo-SP-Brasil. Departamento de Engenharia de Energias e Automação Elétrica, OnLine acedido aos 26 de Agosto de 2007, URL: <http://WWW>.

William M. Barcellos, (2007), Combustão do gás natural em protótipo de caldeira não-convencional de queimador poroso , Departamento de Engenharia Mecânica -Universidade Federal de Campinas.

Yolanda V. A. (2003). *Estudo Comparativo da Eficiência Energética da Industria da Cerâmica de revestimento via húmida no Brasil e Espanha*, Universidade Estadual de Campinas.

Apêndice A

Dados de consumo de Energia durante cinco anos

Tabela A.1: Dados do consumo de carvão mineral nos últimos 5 anos.

Período	Produção	Quantidades			Intensidade	
ANOS	Kg	Usados (ton)	Equiv(GJ)	Custo (MZN)	Ton Car/ Ton prod	GJ/Ton prod
2000	1.714.593,06	268,04	2.760,00	46.950,36,0	0,05	2,61
2001	1.318.788,11	290,52	2.955,60	56.155,26,0	0,07	3,24
2002	2.382.291,80	299,90	3.717,00	121.112,250	0,07	2,56
2003	2.181.868,95	304,06	6.241,80	388.381,785	0,08	3,86
2004	2.666.769,30	310,04	6.601,20	468.141,4,5	0,08	3,48
TOTAL	10.264.311,22	742,52	22.275,60	1.080.741,137,5		
MEDIA	2.052.862,24	148,50	4,455,12	216.148,227,50	0,07	2,15

Tabela A.2: Dados do consumo do marine diesel nos últimos 5 anos.

Período	Produção	Quantidades			Intensidade	
	Kg	Usados (ths)	Equiv.(GJ)	Lts MD/Kg LC	GJ MD/Ton LC	
2000	1.714.593,06	6.000,00	241,68	0,004	0,89	
2001	1.318.788,11	2.000,00	80,56	0,002	0,92	
2002	2.382.291,80	4.000,00	80,56	0,003	0,93	
2003	2.181.868,95	16.000,00	644,48	0,005	0,94	
2004	2.666.769,30	14.000,00	402,80	0,004	0,95	
TOTAL	10.264.311,22	36.000,00	1.450,08	0,018	0,99	
MEDIA	2.052.862,24	7.200,00	290,02	0,00	0,14	

Apêndice B

Escalas para excessos de ar

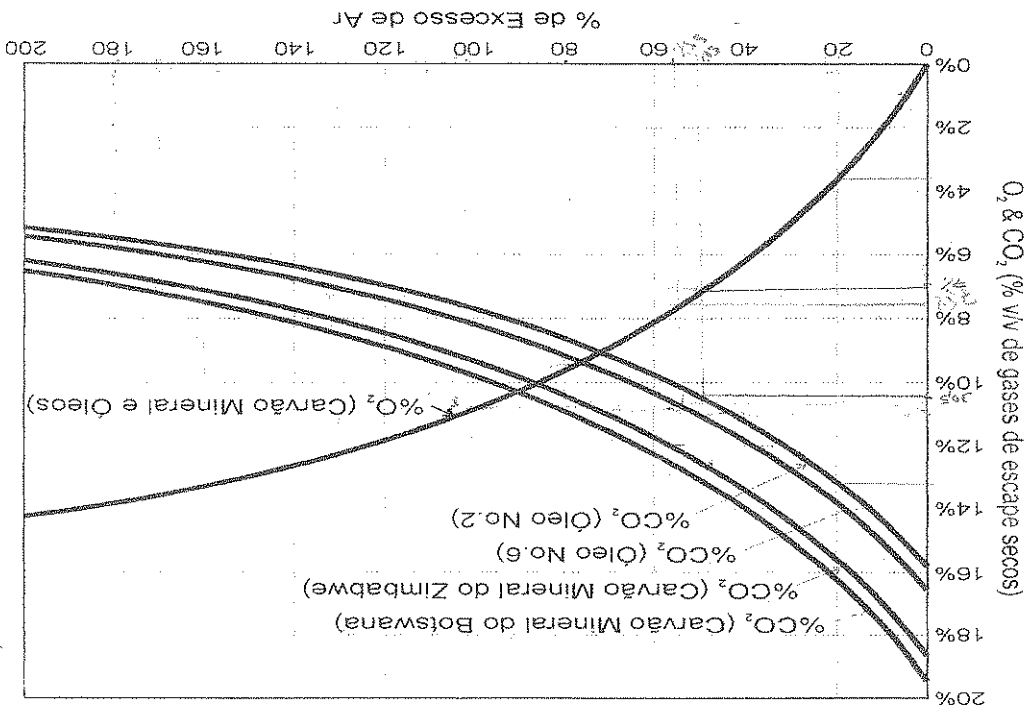


Figura 4.3: Percentagem de O_2 e de CO_2 Vs Excesso de ar (AMEC, 2004).

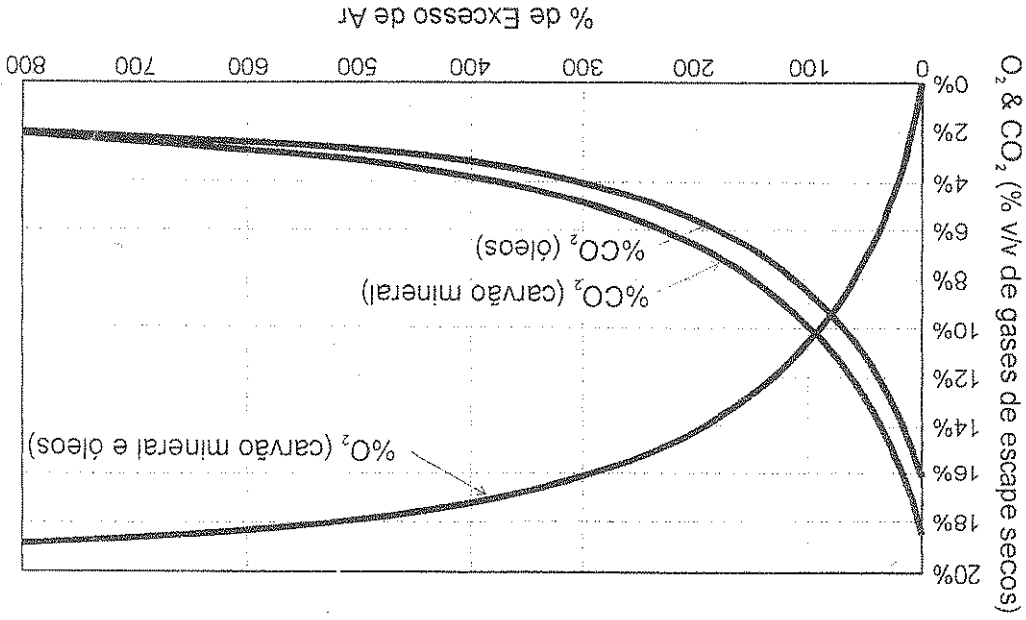


Figura 4.4: Escala para excesso de ar extremos (AMEC, 2004).