

AVALIAÇÃO DA CONVERSÃO DE CALDEIRA A ÓLEO DIESEL PARA GLP: UM ESTUDO DE CASO

Paulo César Schmökel¹
Angela B. D. Moura²

RESUMO

As empresas, de forma geral, adotam programas internos para melhoria da eficiência energética dos equipamentos industriais. A preocupação com as questões ambientais faz com que se busquem alternativas energéticas mais limpas e eficientes. Pensando dessa forma, a empresa na qual foi realizado este estudo (empresa X) optou por alterar sua matriz energética, passando a usar o GLP, ao invés de óleo diesel, como combustível na caldeira de processo. Este trabalho consiste na avaliação dos impactos técnicos e ambientais provenientes dessa alteração. Foi realizado com base em levantamento bibliográfico, dados técnicos e por meio do monitoramento da combustão. Para avaliação da conversão, foram realizadas medições dos gases emitidos na saída da caldeira. Os dados e as medições foram comparados para duas situações distintas: antes (diesel) e após (GLP) da conversão, analisando, nessas situações, o comportamento da combustão e do queimador. Foram também levantadas as dificuldades técnicas da conversão.

Palavras-chave: Ambiental. Combustão. Caldeira. Conversão. Energia.

ABSTRACT

The companies generally adopt internal programs to improve the energy efficiency of industrial equipment. The concern with environmental issues makes them seek alternative energy sources cleaner and more efficient. Thinking this way, the company where this study was carried (X company) decided to change its sources of energy, to use LPG instead of diesel fuel used in boiler process. This work is the assessment of technical and environmental impacts from this change. Was conducted based on literature, technical data, and through monitoring of combustion. To evaluate the conversion measurements were made of the gases emitted at the output of the boiler. The data and measurements were compared for two different situations: before (diesel) and after (LPG) conversion, in these situations by analyzing the behavior of combustion and the burner. We also raised the technical difficulties of conversion.

Keywords: Environmental. Combustion. Boiler. Conversion. Energy.

¹ Engenheiro Industrial Mecânico.

² Professora e pesquisadora da Universidade Feevale; doutora em Engenharia.

INTRODUÇÃO

A energia tornou-se uma fonte limitante para o processo econômico de muitos países em desenvolvimento. Representa um fator de grande preocupação na área econômica e, atualmente, com grande ênfase na questão ambiental. Todas as nações do planeta vêm estabelecendo acordos internacionais, visando à redução das taxas de emissão de gases do efeito estufa, como, por exemplo, o Protocolo de Kyoto. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Desde 1995, o uso industrial do GLP tem sido aos poucos liberado e estimulado, principalmente por preservar o meio ambiente, substituindo os óleos combustíveis, caracterizados pelo elevado teor de enxofre.

O uso de combustíveis como o GLP, ao invés de combustíveis mais pesados, ou óleo diesel, apresenta-se como uma alternativa segura, sem o risco de interrupção por qualquer contingência política ou natural. Outra vantagem é a possibilidade de servir como porta de entrada para o gás natural em locais aonde, atualmente, os gasodutos não chegam.

Baseada na possibilidade de melhor eficiência na combustão e na busca por energia mais limpa, a empresa X optou por converter o queimador a óleo diesel para GLP. O equipamento convertido é uma caldeira a vapor fogotubular, conforme esquema na figura 1, marca Tenge, modelo Thermobloc, do tipo TG-115/10, com capacidade de produção de vapor saturado de 1.500Kg/h, com água a 20°C e pressão máxima de trabalho (PMTA) de 10,5 Kgf/cm²;

O estudo busca analisar a combustão, comparando o combustível antigo (óleo diesel) com o atual (GLP). Esse levantamento tem por objetivo avaliar o impacto técnico e ambiental da combustão, as diferenças e o novo comportamento do equipamento convertido. Para isso, foram realizados:

- o monitoramento dos gases emitidos na caldeira, antes e depois da conversão. Esse levantamento visa a avaliar os parâmetros relacionados à combustão;
- a investigação do ponto de melhor rendimento do conjunto queimador x caldeira convertido para uso do GLP. Essa investigação será focada na combustão, maximizando todos os ajustes possíveis à procura do ponto de equilíbrio entre economia de combustível e valores de referência para ajustes do sistema de queima.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A avaliação da troca de uma matriz energética em uma empresa deve-se dar a partir de critérios técnicos e financeiros. Os aspectos técnicos, além da questão da combustão, devem contemplar a questão ambiental, que representa atualmente uma grande preocupação mundial (JANUZZI; SWISHER, 1997). Sob esse aspecto, o uso do GLP em relação aos óleos combustíveis apresenta a vantagem de preservar o meio ambiente devido aos baixos teores de enxofre (FAIRBANKS, 2008).

Qualquer equipamento de queima pode ser transformado para gás, desde que se levem em consideração os aspectos físicos e químicos do novo combustível e os requisitos de segurança de acordo com a norma ABNT NBR 12313, a qual regulamenta o sistema de combustão, controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura.

A figura 1 mostra um desenho esquemático de uma caldeira fogotubular de três passes, do mesmo tipo da caldeira de processo em que foi feito o estudo.

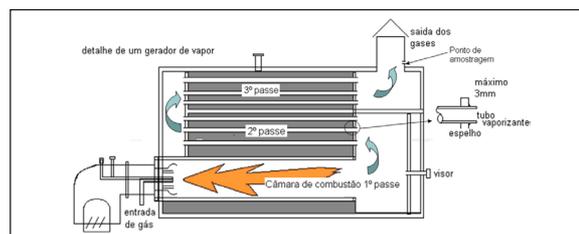


Figura 1 - Esquema da caldeira a vapor da empresa X: detalhe do espelho

Fonte: Autor (2001)

A emissão de radiação de calor na chama para o gás é diferente da com óleo combustível. O comprimento de onda é menor, emitindo na faixa do ultravioleta, diferentemente do óleo, que emite na faixa do infravermelho. Outra recomendação, segundo Narciso (2001), é que a saliência do tubo no espelho da região de transferência de calor deverá ter, no máximo, 3 mm (detalhe da figura 1). Caso contrário, haverá queima do tubo por falta de refrigeração, causando trincas e consequentes vazamentos de água. Dependendo da extensão do problema, essas trincas podem se prolongar ao espelho, causando sérios danos ao equipamento. Dessa forma, cuidados na regulagem dos queimadores devem ser tomados visando a preservar a vida útil do equipamento.

1.1 COMBUSTÃO

A combustão é definida por Russomano (1987) como um fenômeno químico exotérmico, caracterizado por uma reação de oxidação entre elementos combustíveis e comburentes.

Os elementos característicos dos combustíveis são: carbono, hidrogênio e enxofre, este último, em geral em porcentagem muito baixa, pouco contribui para produção de calor. Os elementos oxidantes (comburentes) mais usados são o ar atmosférico ou o ar enriquecido com oxigênio. O ar é a fonte de oxigênio mais abundante e barata. É composto de nitrogênio e oxigênio e pequenas porções de dióxido de carbono, vapor d'água, gases raros e, em certas regiões, pode conter óxidos de enxofre e nitrogênio, ozônio e partículas sólidas. Em todos os tipos de combustíveis, a combustão é feita pelo processo de oxidação do hidrogênio e do carbono, com o oxigênio existente no ar atmosférico. O nitrogênio e qualquer outro elemento químico não combustível existente no ar atmosférico ou no combustível passam pelo processo de oxidação sem modificações essenciais (BEGA, 2003; BIZZO, 2003).

A combustão pode ser completa ou incompleta. A completa ocorre quando, na fornalha, há o oxigênio na quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos combustíveis. Neste caso, na câmara de combustão, os elementos químicos combustíveis, carbono (C), hidrogênio (H) e enxofre (S) reagem com o oxigênio do ar, liberando calor da reação e formando dióxido de carbono (CO₂), vapor da água (H₂O), dióxido de enxofre (SO₂) e nitrogênio do ar (N₂). O N₂ é considerado um gás inerte e não participa das reações químicas. Se houver ar em excesso, os produtos de combustão irão conter oxigênio (O₂). Porém, se, na câmara de combustão, houver uma quantidade menor de ar que a necessária, a combustão será incompleta. O hidrogênio e o enxofre são elementos mais ativos que o carbono, dessa forma, a falta de ar provoca uma mudança na reação e nos produtos da queima. Aparecerá agora o monóxido de carbono (CO), que, sendo um gás combustível, caracteriza o desperdício de energia. Por isso, no caso da combustão incompleta, o aproveitamento do combustível e o rendimento da caldeira irão diminuir. Além disso, o monóxido de carbono é um gás tóxico e provoca poluição do ambiente. Ele reage com a hemoglobina do sangue, causando envenenamento (VLASSOV, 2001).

No quadro 1, são mostradas as principais reações da combustão completa e os valores aproximados da quantidade de calor liberado.

REAÇÃO TÍPICA DA COMBUSTÃO	CALOR LIBERADO (Kcal/Kg)
$C + O_2 = CO_2$	7.800
$2CO + O_2 = 2CO_2$	2.420
$2C + O_2 = 2CO$	2.360
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	34.000
$S + O_2 = SO_2$	2.200

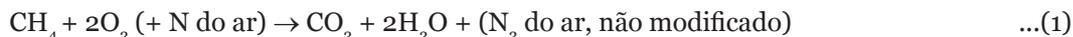
Quadro 1 - Reações típicas de combustão com valores aproximados de calor liberado
Fonte: Russomano (1987)

1.1.1 Estequiometria da Combustão

Segundo Bizzo (2003), o ar ambiente é usado na maioria dos processos industriais como fonte de oxigênio para a combustão. Conhecer as necessidades de ar, bem como a composição e o volume dos produtos de combustão é fundamental para o projeto e o controle de equipamentos.

Qualquer combustível convencional, de acordo com sua composição, requer uma quantidade específica e calculável de oxigênio (ar), para que a reação completa seja atingida. Para valores inferiores a essa quantidade, a combustão será incompleta e haverá perda de calor potencial. Valores acima dessa quantidade geram perdas excessivas de gás de combustão e de temperatura. Na prática, são usados valores um pouco maiores do que essa quantidade teórica.

Por exemplo, para um material simples como o metano, principal constituinte do gás natural, tem-se a seguinte reação de combustão:



A mesma reação pode ser escrita em Kg de reagentes, como segue:



É observado que 1 Kgmol de metano requer 2 Kgmol de oxigênio para a reação teórica completa. Convertendo para uma base de massa, 16 Kg de metano requerem 64 Kg de oxigênio. Uma vez que o ar contém 23,2% de oxigênio, em massa, calcula-se que a massa total de ar é de 275,86 Kg. Com base nesses dados, obtém-se a relação ar/combustível estequiométrica (A/C)

$$A/C = \frac{\text{massa ar}}{\text{massa de combustível}} = \frac{275,86}{16} = 17,24 \quad \dots(3)$$

A relação ar/combustível estequiométrica na base mássica é de 17,24: 1. Considerando que na reação volumétrica se tem um volume de CH₄ para dois de O₂ e que em um volume de ar estão contidos 21% de oxigênio, serão necessários 4,76 volumes de ar para um volume do oxigênio. Dessa forma, a proporção volumétrica de ar/combustível (A/C) é de 9,52: 1.

O cálculo estequiométrico permite a definição da relação A/C estequiométrico para qualquer combustível de composição conhecida (BIZZO, 2003).

O quadro 2 apresenta valores típicos da relação A/C estequiométrico para alguns combustíveis utilizados no Brasil.

COMBUSTÍVEL	A/C ESTEQUIMÉTRICA (em massa)
Óleo combustível 1% S	14,3
Óleo combustível 3% S	13,9
GLP	15,5
Gás natural	16,4
Lenha (base seca)	5,97

Quadro 2 - Relação Ar/combustível (A/C) Estequiométrica
Fonte: Branco (2009)

Na prática, a fim de assegurar a combustão completa, é necessário um teor de excesso de ar, para manter a quantidade suficiente de oxigênio até o final da chama e superar as deficiências de mistura do queimador (VLASSOV 2001).

1.1.2 Excesso de Ar

A quantidade de excesso de ar é estabelecida pelo coeficiente de excesso de ar (α). Branco

(2009) define um α como sendo a razão da quantidade total de ar utilizado na combustão (V_{ar}) e a quantidade de ar estequiométrica ($V^{\circ}ar$), em outras palavras, é a relação entre o número de moles realmente utilizados na combustão e o número de moles estequiometricamente necessário.

$$a = \frac{V_{ar}}{V^{\circ}ar} = \frac{\text{número mol real } O_2}{\text{número mol estequiométrico } O_2} \quad \dots(4)$$

Por exemplo, se um combustível for queimado com 20% de excesso de ar, então, a proporção de trabalho de ar/combustível é 1,20 vezes a proporção estequiométrica. O ar em excesso, portanto, não participa diretamente da combustão e sai do processo junto com os produtos da combustão.

A experiência acumulada sobre o funcionamento de caldeiras e fornos mostra que o valor ótimo do α depende de vários fatores, entre eles: a espécie do combustível, a construção da fornalha, a maneira de queimar o combustível. Vlassov (2001) recomenda α de 1,05 para o óleo diesel e na faixa α de 1,05 a 1,1 para o GLP.

Na prática, as concentrações de CO_2 serão mais baixas que a estequiométrica devido ao excesso de ar. A quantidade de excesso de ar necessária decresce com o aumento da capacidade e com o rendimento maior no equipamento de combustão (BRANCO, 2009).

Por outro lado, um grande excesso de ar é indesejável, pois diminui a temperatura da chama, aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes (Q_2), reduzindo a eficiência térmica e diminuindo o comprimento da chama. O valor ótimo do excesso de ar é aquele que está em equilíbrio, suficientemente baixo para minimizar as perdas de calor (Q_2), sem produzir combustão incompleta. O valor ótimo depende da eficiência da combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para NO_x e CO .

A eficiência da combustão (η) é definida por: $\eta = (Q_{disp} - Q_2 - Q_3) / Q_{disp}$... (5), onde Q_{disp} é a energia disponível para combustão; Q_2 , a entalpia dos gases efluentes e Q_3 , a perda de calor devido à combustão incompleta. A eficiência máxima é obtida pela minimização de $Q_2 + Q_3$, conforme pode ser observado na figura 2 do balanço térmico da combustão.

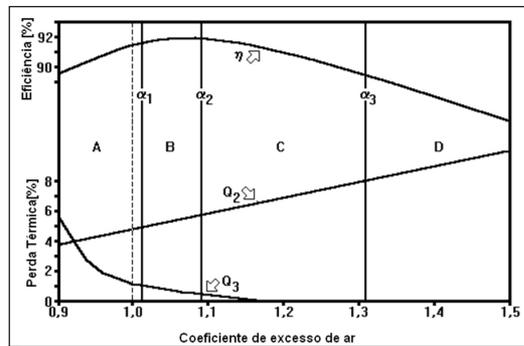


Figura 2 - Balanço Térmico da Combustão
Fonte: Pinheiro (1995)

A dificuldade do controle da combustão no processo real é decorrente do fato de que o coeficiente do excesso de ar afeta diferentemente a eficiência e os níveis de emissões dos gases. Na figura 2, é mostrado o valor da eficiência e da perda térmica em função do coeficiente do excesso de ar e, na figura 3, é mostrado o comportamento das emissões de CO_2 e NO_x em função do coeficiente do excesso de ar.

A combustão do excesso de ar inferior a α_1 (faixa A) não é aceitável, pois o teor de CO nos produtos da combustão excede os limites. Com excesso de ar entre α_1 e α_2 (faixa B), tem-se a combustão quase completa e um baixo α . Essa faixa é a ideal devido às baixas emissões de CO e NO_x e à alta eficiência da combustão. Na faixa C, os níveis de emissão de NO_x excedem os limites da lei, e a operação só é recomendável com equipamentos de tratamento dos gases efluentes. A eficiência da combustão é inferior à 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 (PINHEIRO, 1995).

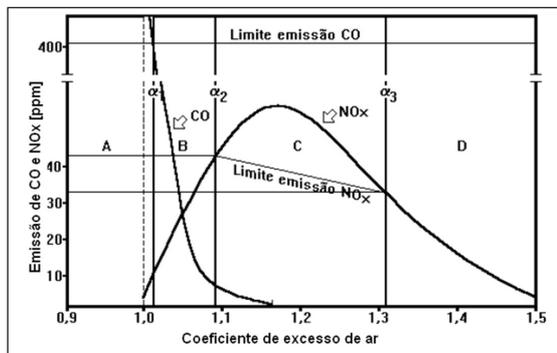


Figura 3 - Balanço Térmico da Combustão
Fonte: Pinheiro (1995)

Uma vez que a composição elementar da maioria dos combustíveis industriais não varia consideravelmente, é possível construir um gráfico que relaciona o excesso de ar com o teor de CO_2 ou O_2 nos produtos de combustão. O gráfico representado na figura 4 mostra o teor de O_2 e a curva de CO_2 calculada para vários combustíveis e a percentagem do excesso de ar correspondente.

Levando-se em consideração o que foi apontado, para se controlar a eficiência na queima, deve-se controlar os gases da combustão. Os teores de CO_2 e O_2 nos gases de saída são as medidas mais usadas para determinação do excesso de ar. Os gases da combustão podem informar se a queima está completa, se o calor desprendido na fornalha está sendo bem-aproveitado, se o nível de poluição é alto e se o volume de ar para a queima é ideal. O melhor excesso de ar a ser adotado é quando CO ou a fuligem não excedem a faixa de ajuste ideal; esse controle é feito através de equipamento analisador de gases. O quadro 3 apresenta os valores ideais de O_2 , CO_2 , CO e fuligem para alguns combustíveis. Porém, dependendo do equipamento de queima, esses valores podem variar (BRANCO 2009).

O teor de gases da combustão, como foi visto anteriormente, é importante para determinação da eficiência da combustão e por questões ambientais. Como a reação de combustão é complexa, os gases resultantes dependem de vários fatores já citados. Os principais gases e resíduos relacionados com a combustão são o CO_2 , O_2 , NO_x , SO_2 , além de cinzas e fuligem.

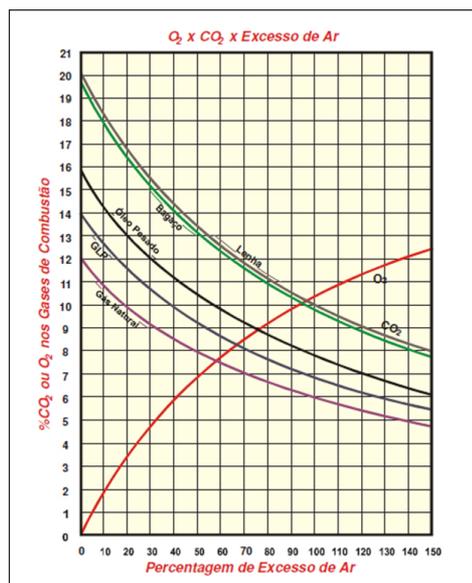


Figura 4 - Teor de O_2 e a curva de CO_2 calculados para vários combustíveis
Fonte: Branco (2009)

Tipo de combustível	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (ppm)	Fuligem
Óleos Pesados	12 a 14	3 a 5	<30	3
Gás natural	9 a 11	3 a 4	<20	0
GLP	10 a 12	2 a 4	<20	0
Bagaço de cana	11 a 14	9	<500	4

Quadro 3 - Valores de referência para Ajuste do Sistema de Queima
Fonte: Branco (2009)

2 METODOLOGIA

Este trabalho tem por objetivo avaliar a substituição do óleo diesel pelo GLP, ocorrido na empresa X nos meses de novembro e dezembro de 2008.

A avaliação foi realizada para a caldeira da empresa, que é o maior consumidor de combustível. Tecnicamente foi analisada a combustão, comparando-se o combustível substituído (óleo diesel) pelo atual (GLP), buscando as diferenças no comportamento dos equipamentos, nos rendimentos e na emissão de gases. Para essa etapa, foram realizadas medições nos gases de saída da caldeira. O equipamento utilizado para fazer as medições é um analisador de gases de combustão, de propriedade da Feevale, modelo TEMPEST 50, fabricante Telegan.

As medições são feitas com a sonda inserida no duto da chaminé, todos os parâmetros são medidos ao mesmo tempo e os cálculos da combustão vão sendo executados internamente. O equipamento fornece os seguintes dados: data da medição, horário, temperatura ambiente (resolução 1º C), temperatura da chaminé (resolução 1º C), a relação entre temperaturas (resolução 1º C), teor de O₂ (resolução 0,1%), teor de CO (resolução 1 ppm), teor de CO₂ (resolução 0,1%), excesso de ar (resolução 0,1%) e a eficiência da combustão. O equipamento é calibrado a cada medição, tendo como base o ar externo e sendo o referencial o teor de O₂ do ar.

3 RESULTADOS

Com base nas medições, é apresentada, a seguir, uma análise técnica do comportamento da caldeira antes (queimador a óleo diesel) e após a conversão (queimador a GLP).

3.1 QUEIMADOR A ÓLEO DIESEL

O sistema de controle da caldeira é do tipo malha fechada, em que o processo de aquecimento da água para gerar vapor é feito por um queimador. A ação de controle desse queimador é do tipo liga/desliga, sendo que a medição e o controle são realizados por um pressostato regulado para desligar em 6 Kgf/cm² e ligar em 5,5 Kgf/cm².

Em novembro de 2008, antes da conversão da caldeira para GLP, foram realizadas medições dos gases da combustão: temperatura, o excesso de ar, o teor de O₂ e CO₂ em percentual, o teor de CO em ppm e o cálculo da eficiência da combustão. O ponto de amostragem está diretamente na saída da chaminé, conforme pode ser visto na figura 1.

As medições foram feitas em dois dias diferentes, com intervalo de uma semana (14 e 21 de novembro de 2008). Os resultados dessas medições estão indicados na tabela 1. Inicialmente, as medições foram feitas acompanhando vários momentos de funcionamento do equipamento, ou

seja: queimador desligado, queimador partindo, início da combustão, queimador a plena carga, queimador desligando.

O objetivo das primeiras medições foi de conhecer o equipamento de medição, conhecer também o processo de combustão, monitorar o queimador a plena carga e avaliar a eficiência e os gases da combustão da queima do diesel, antes da conversão.

Na tabela 1, são mostradas, nas colunas, a data, o horário da medição, a temperatura ambiente, a temperatura da chaminé, a diferença de temperaturas, a percentagem de O₂, o teor de CO, o teor de CO₂, o excesso de ar e a eficiência de queima para cada uma das medições efetuadas.

Os últimos 11 registros, compreendidos no intervalo de tempo entre 17h50min21seg e 18h14min21seg do dia 21 de novembro de 2008, correspondem a um ciclo completo de funcionamento do queimador. Por intermédio deles, é possível estabelecer a relação entre a medição dos gases de escape e o ciclo de queima, conforme descrito a seguir.

Tabela 1 - Medições com queimador a óleo diesel

Data	Horário h	Ambiente (°C)	Chaminé (°C)	Relação (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	Xar (%)	Eficiência (%)
14/11/2008	19:47:18	30	115	84	20,06	1336	0,20	*	**
14/11/2008	19:49:27	30	202	171	5,80	0	11,02	38	92,2
14/11/2008	19:50:14	30	127	97	19,40	323	1,10	1341	52,6
14/11/2008	19:52:29	30	122	91	20,20	2428	0,50	*	**
14/11/2008	19:55:01	30	159	129	20,80	418	0,00	*	**
14/11/2008	19:55:53	30	244	213	4,30	47	12,30	26	91,2
14/11/2008	19:56:30	30	206	175	7,00	10	10,30	50	91,0
14/11/2008	19:57:47	30	127	96	19,50	2057	1,00	1425	43,6
14/11/2008	19:59:14	30	117	87	20,20	2659	0,50	*	**
21/11/2008	17:22:10	24	23	0	20,90	0	0,00	*	**
21/11/2008	17:34:32	28	151	123	20,50	1040	0,30	*	**
21/11/2008	17:35:18	28	195	167	6,90	109	10,40	49	91,8
21/11/2008	17:36:08	28	129	100	20,00	1066	0,60	*	**
21/11/2008	17:38:25	29	118	89	20,06	406	0,20	*	**
21/11/2008	17:40:56	29	115	86	20,80	100	0,00	*	**
21/11/2008	17:43:41	30	142	112	20,90	39	0,00	*	**
21/11/2008	17:50:21	31	142	111	20,90	39	0,00	*	**
21/11/2008	17:56:30	32	189	157	14,60	20	4,60	235	82,7
21/11/2008	17:57:38	32	172	140	7,70	4	9,80	58	92,7
21/11/2008	18:08:31	33	230	197	4,06	6	12,10	28	91,7
21/11/2008	18:09:02	33	232	199	1,10	0	12,40	24	91,9
21/11/2008	18:09:29	32	231	199	7,10	28	10,20	52	90,0
21/11/2008	18:10:25	31	185	154	6,90	8	10,40	49	92,5
21/11/2008	18:11:53	31	126	95	19,40	452	1,10	1321	53,5
21/11/2008	18:12:28	31	124	93	19,90	1984	0,70	2100	22,1
21/11/2008	18:12:54	31	124	93	20,00	2544	0,60	*	**
21/11/2008	18:14:21	31	124	93	20,50	963	0,30	*	**

* Não há combustão, equipamento não registra excesso de ar.

** Não há combustão, equipamento não calcula a eficiência.

Fonte: Autor (2009)

- 1) O queimador está desligado: não há combustão, não há registro do excesso de ar nem da eficiência da combustão.
- 2) Com a entrada do primeiro estágio do queimador (um bico injetando combustível): aumenta a temperatura dos gases da combustão, cai o nível de O_2 , o excesso de ar está em nível muito elevado (235%) e, conseqüentemente, o teor de CO_2 e a eficiência da combustão são baixos.
- 3) O queimador continua funcionando, ainda no primeiro estágio da combustão: a temperatura de saída dos gases cai, pois existe absorção de temperatura na câmara de combustão e nos tubos. O percentual de O_2 diminui para 7,70%, o teor de CO é baixo e aumentou o percentual de CO_2 , conseqüentemente, o excesso de ar cai para 58% e a eficiência da combustão sobe para 92,7%.
- 4) Nesse momento, a combustão é plena, com dois estágios. A temperatura dos gases é máxima, o percentual de O_2 cai para 4,06%, CO_2 aumenta para 12,10%, o excesso de ar baixa para 28% e a eficiência da combustão mantém-se acima de 90%.
- 5) A combustão continua plena e observa-se o mesmo comportamento de 4, porém ocorrem alterações no teor de O_2 e no excesso de ar, é atingido um nível de CO zero.
- 6) Corresponde ao momento em que a pressão da caldeira está próxima de 6 Kgf/cm² e o segundo estágio do queimador é desligado, a temperatura mantém-se estável devido ao calor interno da caldeira, ocorre aumento o teor de O_2 e do excesso de ar, enquanto o teor de CO_2 baixa para a casa dos 10%.
- 7) Continua a combustão em apenas um estágio, a temperatura dos gases de combustão já começa a declinar, os teores de O_2 , CO_2 , o excesso de ar e a eficiência são similares aos níveis do ponto 6.
- 8) O queimador é desligado, nesse momento, o equipamento registra o aumento do teor de CO causado pela combustão incompleta de restos de combustível. O teor de CO_2 cai para 1,10% e o excesso de ar sobe para mais de 1000%.
- 9) Os teores de CO e excesso de ar continuam a aumentar.
- 10) O teor de CO chega ao nível máximo, não há mais registro de excesso de ar nem da eficiência, pois não há combustão.
- 11) Nesse momento, observa-se que o teor de CO começa a diminuir arrastado pelo ar de exaustão.

No gráfico da figura 5, é possível acompanhar a evolução descrita e a relação que existe entre o teor de O_2 e CO_2 . Percebe-se que maiores teores de CO_2 correspondem aos menores teores de O_2 , à maior eficiência da combustão e às maiores temperaturas dos gases de exaustão.

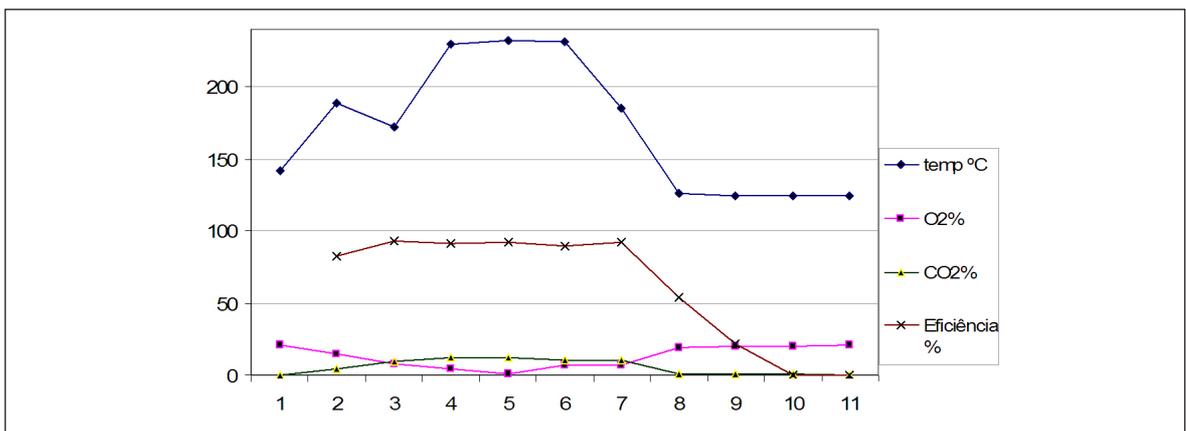


Figura 5 - Gráfico ciclo queimador óleo diesel
Fonte: Autor (2009)

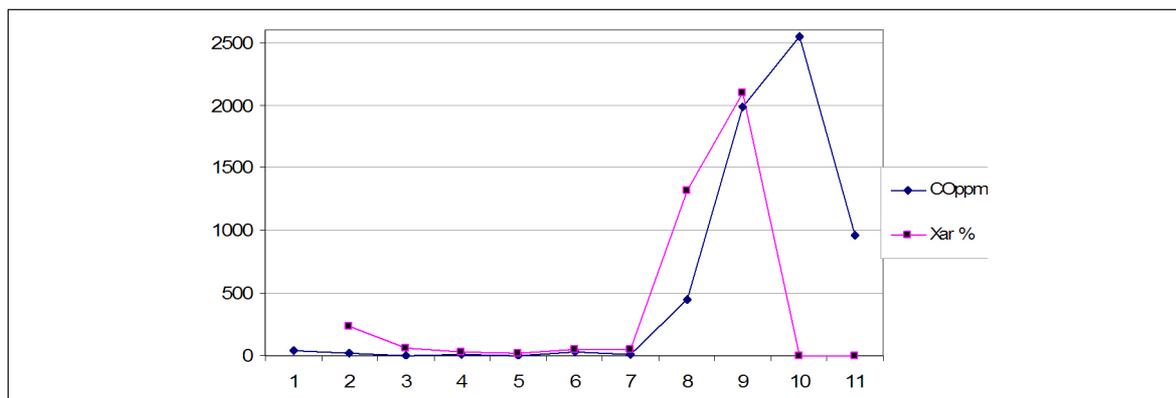


Figura 6 - Gráfico ciclo queimador diesel: teor CO e excesso de ar
Fonte: Autor (2009)

Na figura 6, observa-se a evolução do teor de CO (ppm) e do excesso de ar no ciclo de queima (Xar%). Como se sabe, durante a combustão, o ar em excesso é responsável por permitir a combustão completa, evitando a formação de CO. No ciclo do queimador, durante a combustão, observa-se que a regulagem correta do excesso de ar faz com que a combustão seja plena e praticamente não há formação de CO. Porém, ao encerrar a combustão, o combustível não queimado que fica na câmara de combustão provoca elevação dos teores de CO, até que sejam expelidos pela exaustão da chaminé. O alto teor de excesso de ar registrado é devido ao fato de não haver combustão e o equipamento registrar pequenos teores de CO₂.

Como o nível dos gases varia ao longo do tempo e levando-se em consideração que o objetivo é avaliar a combustão, para, posteriormente, compará-la com a operação a GLP, escolheram-se os pontos em que o queimador estava à plena carga, a fim de efetuar a comparação entre as duas situações. A tabela 2, extraída da tabela 1, apresenta os resultados das medições do queimador à plena carga operando com óleo diesel.

Tabela 2 - Resultado dos níveis de gases na chaminé com combustão à plena carga: queimador a óleo diesel

Pontos	Ambiente (°C)	Chaminé (°C)	Relação (°C)	O ₂	CO	CO ₂	Xar	Eficiência (%)
				(%)	(ppm)	(%)	(%)	
1	30	244	213	4,30	47	12,30	26	91,2
2	33	230	197	4,06	6	12,10	28	91,7
3	33	232	199	1,10	0	12,40	24	91,9
4	32	231	199	7,10	28	10,20	52	90,0
Média	32	234	202	4,14	20	11,75	33	91,2

Fonte: Autor (2009)

Usando como referência a média das medições, observa-se que a combustão tem eficiência média muito boa, acima de 91%. A eficiência máxima é obtida pela minimização das perdas de calor causadas pelo excesso de ar, reduzindo a temperatura da chama, causando combustão incompleta, porém o valor médio do excesso de ar no queimador é de 33%. Esse é um valor elevado, se comparado com 5% apresentados por Vlassov (2001) e com os valores de 9 a 10% apresentados por Pinheiro (1995) nas figuras 2 e 3. Fica evidente que, teoricamente, havia possibilidade de reduzir o excesso de ar para

níveis menores, porém a dificuldade de regular o excesso de ar está no fato de os queimadores não apresentam ajuste de regulagem fina. Pequenas modificações podem resultar em queima incompleta e formação de CO, fuligem e fumaça. Por outro lado, quanto maior o volume de ar introduzido no queimador, maiores são os volumes de fumos e perdas de calor ocorrem pela chaminé. Dessa forma, optou-se por deixar a regulagem nesses parâmetros.

Branco (2009), no quadro 3, apresenta valores ideais para os gases de combustão. Para óleo se destacam os seguintes valores: CO₂ de 12 a 14 %, O₂ de 2 a 5% e CO abaixo de 50 ppm. Comparando estes valores com os resultados da tabela 2, observa-se que os teores de CO₂, O₂ e CO estão em níveis muito bons.

3.2 QUEIMADOR A GLP

Dando sequência ao monitoramento da combustão e passados alguns meses da conversão, em abril de 2009, com a situação de trabalho já adaptada ao novo combustível, novas medições foram realizadas em dois dias distintos, todas à plena carga. O objetivo, dessa vez, foi analisar o comportamento da combustão com o novo combustível e ajustar a condição de trabalho para a melhor condição possível. Os resultados do primeiro dia dessa segunda sessão de monitoramento estão na tabela 3.

Tabela 3 - Resultados das medições com combustão à plena carga: queimador a GLP

Data	Horário h	Ambiente (°C)	Chaminé (°C)	Relação (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	Xar (%)	Eficiência (%)
9/4/2009	14:54:06	29	295	265	2,10	985	12,4	11	90,2
9/4/2009	14:55:03	30	297	267	1,70	1735	12,6	9	90,1
9/4/2009	14:56:19	30	297	266	1,70	2790	12,7	8	90,0
9/4/2009	14:57:37	31	248	217	10,6	345	6,80	102	85,5
9/4/2009	14:59:59	31	261	230	8,70	154	8,00	71	87,2
9/4/2009	15:04:48	33	291	257	6,60	51	9,40	46	87,7
9/4/2009	15:08:07	34	288	254	7,80	93	8,60	60	86,7
9/4/2009	15:09:25	34	288	254	7,80	62	8,60	59	86,8
9/4/2009	15:14:14	35	278	242	9,90	18	7,20	90	85,0

Fonte: Autor (2009)

Observando as primeiras medições da tabela 3, apesar de a combustão estar com eficiência muito boa (acima de 90%, com teor de CO₂ acima de 12% e o excesso de ar menor que 10%), observam-se dois problemas imediatos:

- teor de CO em níveis elevadíssimos, chegando a picos de 2790 ppm, ou seja, totalmente fora do valor ideal indicado por Branco (2009), que corresponde a um valor máximo de 20ppm;
- temperatura dos gases da combustão está muito elevada, próximo de 300 °C. Segundo Onofre (1999), quanto maior for a temperatura dos gases, maiores serão as perdas de calor sensível pela chaminé e, em caldeiras fogotubulares, a temperatura deve se situar em torno de 200 a 250 °C. Essa situação gera um desperdício de energia.

Da análise das primeiras medições, observou-se que a relação poderia ser melhorada regulando

inicialmente a entrada de combustível, para baixar a temperatura dos gases na chaminé e reduzir o teor de partículas de CO para níveis aceitáveis.

Reduzindo a entrada de combustível, foi reduzida a temperatura dos gases da combustão, porém o teor de CO₂ baixou e o excesso de ar aumentou muito e, em consequência disso, a eficiência da combustão também caiu.

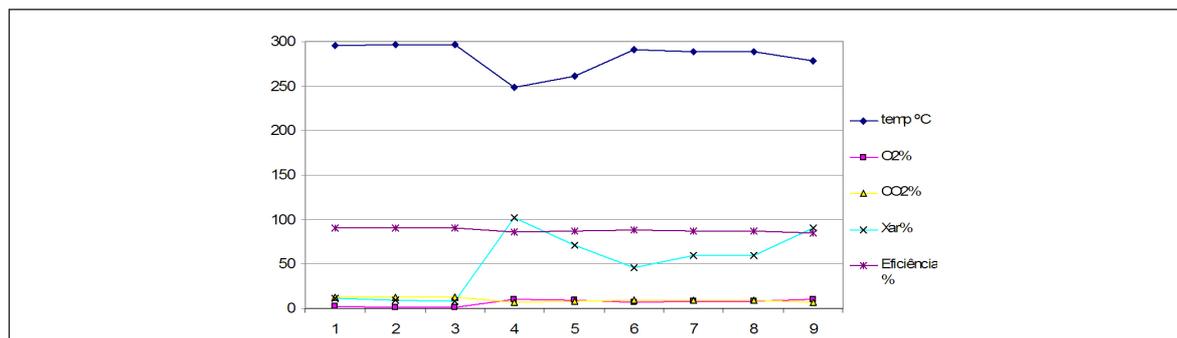


Figura 7 - Combustão com GLP: regulagem da entrada de combustível
Fonte: Autor (2009)

Na sequência de regulagens, trabalhando com a vazão de combustível, como se observa na figura 8, pouca coisa mudou. Pequenas alterações nos teores de O₂ e CO₂ podem ser observadas. Não houve melhora na eficiência da combustão e a temperatura dos gases ainda ficou alta. Dessa forma, conclui-se que, sem trabalhar com a regulagem do excesso de ar, é impossível se chegar a uma condição ideal para os gases da combustão. Uma nova sequência de regulagens se fez necessária, pois, conforme observado no gráfico da figura 7 e nos dados da tabela 3, a combustão ficou com os seguintes parâmetros:

- eficiência de 85%, ou seja, valor baixo para combustão. O ideal é que fique acima de 90%;
- excesso de ar em 90%, ou seja, valor muito alto, pois reduz a eficiência térmica e diminui o comprimento da chama;
- teor de CO₂ em 7,20% e O₂ em 9,90%. Esses valores estão relacionados com excesso de ar alto;
- temperatura dos gases de combustão em 278°C. Valor considerado alto, pois o ideal é baixar para menos de 250°C. A alta temperatura dos gases significa perdas de energia.

Uma nova regulagem da combustão foi realizada, dessa vez trabalhando principalmente com regulagem do excesso de ar e pequenos ajustes na vazão de combustível. Esses valores foram tomados sempre com dois estágios de queima e combustão à plena carga. O resultado das medições após ajustes está na tabela 4.

Tabela 4 - Resultado dos níveis de gás da combustão com queimador a GLP: regulagem do queimador

(continua)

Data	Horário h	Ambiente (°C)	Chaminé (°C)	Relação (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	Xar (%)	Eficiência (%)
17/4/2009	17:44:09	29	240	211	14,90	840	3,90	253	75,1
17/4/2009	17:57:07	29	267	237	11,00	337	6,50	111	83,6
17/4/2009	17:57:49	29	268	238	10,90	15	6,60	110	83,7
17/4/2009	17:59:40	29	258	229	12,60	38	5,50	153	81,2
17/4/2009	18:03:27	30	265	235	9,10	14	7,70	78	86,4
17/4/2009	18:04:16	30	267	236	8,90	3	7,90	75	86,5

Data	Horário h	Ambiente (°C)	Chaminé (°C)	Relação (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	Xar (%)	Eficiência (%)
17/4/2009	18:22:13	30	260	229	8,40	199	8,20	68	87,4
17/4/2009	18:22:51	30	261	230	8,40	28	8,20	68	87,4
17/4/2009	18:24:51	30	256	226	6,90	273	9,20	49	89,0
17/4/2009	18:34:15	30	263	233	0,70	4985	13,30	3	91,1
17/4/2009	18:34:46	30	264	234	0,60	5774	13,40	3	90,9
17/4/2009	18:49:46	30	247	217	9,20	175	7,70	78	87,3
17/4/2009	18:50:33	30	249	219	9,30	14	7,60	81	87,0
17/4/2009	18:51:04	29	259	229	7,50	8	8,80	56	88,3
17/4/2009	18:52:09	29	270	240	4,60	0	10,70	28	90,0
17/4/2009	18:52:39	29	272	243	4,10	2	11,10	24	90,2
17/4/2009	18:53:29	29	275	245	4,30	0	11,00	25	90,0
17/4/2009	18:54:10	29	276	246	4,30	0	10,90	26	89,9
17/4/2009	18:55:13	29	279	249	4,40	0	10,90	26	89,8

Fonte: Autor (2009)

Observando os dados iniciais da combustão, observa-se excesso de ar muito elevado. A regulagem do excesso de ar se faz atuando na comporta, restringindo a passagem do ar ventilado para dentro da câmara de combustão. Esse ajuste requer precisão, pois pequenas interferências influenciam muito na regulagem, além disso, o sistema de regulagem da entrada de ar do novo queimador não permite ajustes finos. Mínima regulagem resulta em grandes variações no excesso de ar. Da tabela 4 é possível destacar alguns pontos importantes da regulagem:

- início da combustão, excesso de ar elevado, altos teores de CO e O₂ e baixo teor de CO₂. Ocorre a falta de combustível e a combustão é incompleta devido também ao excesso de ar, que faz esfriar a chama e não permite a queima total do combustível;
- a redução gradativa do excesso de ar faz com que a combustão se torne mais completa, aumenta a temperatura dos gases da combustão, reduzindo o teor de O₂ e CO e a eficiência da combustão aumenta;
- a redução do excesso de ar se dá gradativamente, até o limite em que o CO começa a aumentar. A partir desse ponto, não é mais possível reduzir o excesso de ar, pois os níveis de CO atingem valores elevadíssimos. É necessário que se busque alternativa para continuar a regulagem;
- a alternativa encontrada foi aumentar a vazão de gás e o excesso de ar juntos e, a partir daí, foi possível encontrar um ponto de equilíbrio da combustão;
- observa-se que, gradativamente, a temperatura dos gases de exaustão foi aumentando e chegando ao limite próximo de 280°C. Percebe-se que existe um valor ideal para a vazão de combustível na câmara de combustão da caldeira;
- o excesso de ar ficou regulado em 26%. Porém, segundo Pinheiro (1995), o ideal é um baixo coeficiente de excesso de ar, inferior a 10%, que garantiria baixas emissões de CO e NO_x e a alta eficiência da combustão.

Para Branco (2009), os valores de referência para ajuste do sistema de queima de GLP seriam de 10 a 12% para o teor de CO₂, de 4 a 2% para o teor de O₂ e menor que 20 ppm para o teor de CO. Como se pode observar na tabela 4, os valores finais de regulagem estão dentro dos valores recomendados.

As figuras 8 e 9 trazem os gráficos com o comportamento dos gases durante o processo de regulagem da combustão. Essas figuras foram elaboradas a partir dos dados da tabela 4 na mesma ordem em que foram apresentadas.

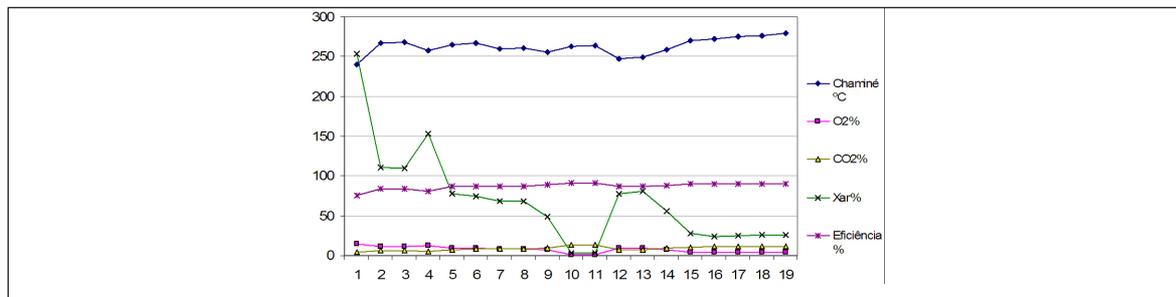


Figura 8 - Comportamento dos gases de exaustão na regulagem da combustão
Fonte: Autor (2009)

Observa-se que o excesso de ar é um fator determinante para o processo de combustão. O ideal seria que fosse reduzido para menos de 10%, conforme mostrado na figura 4, em que se observa a relação entre o teor de O₂ e a curva de CO₂ calculado para vários combustíveis. Nessa condição, o teor de CO₂ subiria para 12,5%. Porém, como é possível observar nas figuras 8 e 9, mínimas alterações na regulagem diminuem o excesso de ar e fazem aumentar bruscamente o teor de CO. Dessa forma, optou-se por deixar o equipamento operando nessas condições, ou seja, os últimos quatro pontos de leitura da tabela 4 correspondem à regulagem final para a qual o queimador ficou trabalhando.

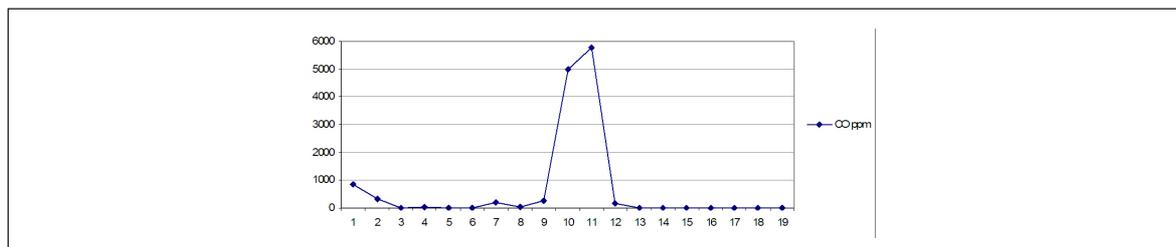


Figura 9 - Comportamento do teor de CO na regulagem da combustão
Fonte: Autor (2009)

Outro fator a ser observado é a temperatura final dos gases de combustão, pois, como se sabe, quanto maior a temperatura dos gases, maiores as perdas de calor pela chaminé. Como se observou na tabela 6, nem sempre é possível baixar muito a temperatura de saída dos gases, sob pena de comprometer a eficiência da combustão. Consequentemente, a temperatura final dos gases ficou em praticamente 280°C, comprovando o que já era indicado na literatura, conforme Narciso (2001). Uma forma de aproveitar essa energia seria aquecendo a água de entrada da caldeira ou pré-aquecendo o ar de combustão. Segundo Onofre (1999), em média, para cada 22° C de aumento de temperatura do ar, obtém-se 1 % de economia de combustível.

CONCLUSÕES

A vantagem do uso do GLP em relação ao óleo, para o meio ambiente, é a menor geração de CO₂ por caloria de gás queimado, devido à relação carbono/hidrogênio ser maior nos óleos do que nos gases combustíveis. Além disso, o GLP é praticamente isento de enxofre. Outra vantagem é a possibilidade da geração de atmosferas neutras ou redutoras, com ausência de fuligem.

A queima dos gases é muito mais fácil do que a dos óleos combustíveis, pois aqueles já se encontram no estado gasoso e não necessitam de atomização. A mistura de um gás combustível com qualquer comburente se processa rápida e eficientemente, em que o resultado da queima adequada é a limpeza dos produtos da combustão, reduzindo as manutenções com limpeza dos tubos e, em consequência, a eficiência constante da caldeira, pois, sem o depósito de fuligem nos tubos, não há perdas por transferência térmica.

Outro ponto a considerar é a vantagem operacional da eliminação total de óleo na sala da caldeira, que, antes, era causado por vazamento ou decorrente de manutenções para limpeza e regulagem dos bicos atomizadores. Com isso, proporciona-se um ambiente mais limpo e higiênico.

Um fator a ser considerado como negativo para conversão é que a radiação de calor no gás é diferente da chama com óleo, o comprimento de onda é menor, emitindo raios ultravioleta, diferente do óleo, que é do tipo infravermelho. Com isso, evidenciou-se que a temperatura dos gases da combustão ficou em torno de 50°C mais elevado, pois a caldeira não foi concebida para esse tipo de combustível, configurando perdas de energia. Essa energia perdida pode ser recuperada em parte para aquecimento da água de alimentação da caldeira, onde, em média, para cada 6°C de aumento de temperatura na água de alimentação, haveria uma economia de 1% no combustível queimado. Ou pré-aquecendo o ar de combustão, nos recuperadores. Estima-se que, para cada 22° C de aumento de temperatura do ar, obtém-se 1% de economia de combustível.

O principal fator a ser considerado na combustão é o excesso de ar, fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos da combustão. Como foi observado durante a regulagem do queimador a GLP na caldeira, um grande excesso de ar diminuiu a temperatura da chama e aumentou as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência térmica e diminuindo o comprimento da chama. Um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta, com formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar o acúmulo de combustível não queimado, com risco de explosão. O valor ótimo do excesso de ar é aquele suficientemente baixo, para minimizar as perdas de calor sem produzir combustão incompleta. Esse valor depende da eficiência da combustão aceitável e dos limites de poluição impostos.

O uso de equipamento para análise dos produtos da combustão se faz necessário quando se trata da regulagem do excesso de ar. É fácil identificar o que acontece em uma fornalha, quando os gases da combustão são cinzentos e fuliginosos, pois, certamente, uma parte do combustível não queima e isso se traduz em perda de energia. Porém, quando transparentes, os gases da combustão não oferecem nenhuma referência visual para a regulagem da combustão e, provavelmente, ainda haja muito a se fazer. Atualmente, com o desenvolvimento tecnológico reduzindo o custo dos sensores de O₂ e CO, seu emprego se torna economicamente viável, possibilitando economia com combustível por meio da regulagem do melhor ponto de eficiência do queimador.

Para regulagem do excesso de ar do queimador a GLP, foram encontradas dificuldades. Esse ajuste requer precisão, pois pequenas interferências influenciam muito na regulagem. O novo queimador não permite ajustes finos. Mínimos ajustes resultaram em grandes variações. Melhorias no projeto desse modelo de queimador se fazem necessárias, ou recomenda-se a troca por outro queimador.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12313**: Sistema de combustão - Controle e Segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. 2000.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2003. 179 p.

BIZZO, Waldir A. **Geração, Distribuição e utilização do Vapor**. Campinas, SP: UNICAMP, 2003. 128 p. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP3.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2009.

BRANCO, Wagner. **Controle da Eficiência de combustão**. [S.l]: Confor, [200-?]. 29 p.CD-ROM.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N°382, de 26 de dezembro de 2006:** Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes. Brasília, DF: 2006. 37 p. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf> Acesso em: 03 abr. 2009.

FAIRBANKS, Marcelo. **Gás Natural desloca Óleos do Aquecimento Industrial. Química e Derivados.** [S.l.]. 2008. Disponível em: <www.quimicaederivados.com.br/revista/qd400/combustivel1.htm>. Acesso em: 03 fev. 2009.

JANUZZI, Gilberto de Martino; SWISHER Joel N. P. **Planejamento Integrado de Recursos energéticos:** meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. Campinas, SP: Autores Associados, 1997. 288p.

NARCISO, Carlos Alberto. **Workshop-Ultrazax:** Aspectos Técnicos na Transformação de Caldeiras de Óleo para Gás. São Paulo, SP: Tec, 2001.

ÓLEO Diesel. Disponível em: <http://www.motorvac.com.br/portugues/literatura/lite_oleodiesel.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2009.

ONOFRE, Reginaldo de Matos. **Controle de Eficiência da Combustão.** [S. l.: s.n], 1999. 8p. Disponível em: < <http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/files/combust.pdf> > Acesso em: 05 fev. 2009.

PINHEIRO, Paulo César C.; VALLE, Ramon Molina. **Controle de Combustão:** Otimização do Excesso de Ar. Belo Horizonte, MG: UFMG, 1995. Disponível em: <www.geocities.com/paulocpinheiro/papers/excesso.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2008.

RUSSOMANO, Victor Henrique. **Introdução à Administração de energia na Indústria.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1987. 262p.

VLASSOV, Dimitri. **Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão.** Curitiba: UFPR, 2001. 186p.