

# P56, Inventário de emissões e eficiência térmica de caldeiras a gás natural. Ciclo 2008/2009.

Renato Vergnhanini Filho

COMGÁS - Companhia de Gás de São Paulo  
IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica – Laboratório de Engenharia Térmica

**Resumo** – O rendimento térmico e a emissão de poluentes atmosféricos de caldeiras instaladas em empresas clientes da Comgás situadas na Região Metropolitana de Campinas - RMC foram levantados experimentalmente utilizando o Laboratório Móvel do IPT. Os equipamentos monitorados apresentaram, em sua maioria, rendimento relativamente baixo devido, principalmente, à ausência de controle do excesso de ar operacional e de aproveitamento energético dos gases de combustão. Apresentaram, também, emissões de CO próximas de zero e emissões de NO<sub>x</sub> bastante variáveis com o porte e condição operacional do equipamento, porém sempre abaixo do valor limite estabelecido pela legislação nacional.

Palavras-chave: combustão de gás natural; caldeira; emissão de poluentes atmosféricos; rendimento térmico; poluição atmosférica.

## Introdução - Objetivo do projeto

O objetivo do projeto foi levantar, utilizando uma unidade móvel (Figura 1), o rendimento térmico e a emissão de poluentes atmosféricos de caldeiras, operando com gás natural e situadas na Região Metropolitana de Campinas - RMC e municípios adjacentes, e propor medidas de otimização desses parâmetros.



Figura 1 – Unidade móvel

No monitoramento, buscou-se acordar com os responsáveis pelos equipamentos que fossem feitas alterações operacionais de forma que a influência de fatores nos valores medidos, como excesso de ar de combustão e potência de

operação do(s) queimador(es), pudesse ser verificada.

## Desenvolvimento

O trabalho foi desenvolvido através da realização de um conjunto de atividades apresentadas a seguir.

### Escolha das empresas e equipamentos

A Comgás forneceu relação de geradores de vapor e de água quente, e aquecedores de fluido térmico a gás natural, contendo as características principais dos equipamentos (tipo, porte) e os locais onde estão instalados. A listagem compreende 90 equipamentos, aproximadamente, instalados em cerca de 40 empresas situadas na RMC e proximidades.

Dessa relação, IPT e Comgás relacionaram um conjunto de equipamentos, onde por suas características e particularidades seria interessante realizar as medições. Na sequência, a Comgás contatou as empresas onde os equipamentos selecionados estão instalados para expor o objetivo do trabalho e obter consentimento para as medições. Como resultado das ações da Comgás, ficou definido que seriam monitoradas vinte caldeiras, instaladas em dez empresas.

### Visita preliminar às empresas selecionadas

As medições nas empresas foram precedidas por visita de técnicos do IPT e Comgás com o objetivo de: conhecer as instalações; verificar eventuais inviabilidades para o levantamento; solicitar que fosse providenciada a infra-estrutura necessária para as medições; obter informações sobre os procedimentos e documentação exigida

para a entrada de técnicos e instrumentos na empresa, e elaborar cronograma de trabalho.

Na visita foi sugerido às empresas que, durante o monitoramento, o técnico responsável pelo(s) queimador(es) instalado(s) no(s) equipamento(s) estivesse presente para realizar as regulagens indicadas pelas medições.

### Medições

O monitoramento pretendido foi realizado num período de cerca de quatro meses.

Nas medições foram utilizados termopares, sondas de amostragem e, instalados em uma unidade móvel, analisadores contínuos de gases, cilindros contendo gases de composição conhecida para a calibração dos instrumentos, sistema de bombeamento e condicionamento (refrigeração, remoção de compostos condensáveis e de partículas sólidas) de amostra de gases e instrumentação de aquisição e visualização de dados. A especificação dos analisadores de gases utilizados é apresentada na Tabela 1

Tabela 1 – Analisadores contínuos de gases

Constituinte	Instrumento*	Princípio de medição
CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	ABB modelo URAS 26	Absorção não dispersiva do infravermelho
O <sub>2</sub>	ABB modelo MAGNOS 206	Susceptibilidade magnética

\* Precisão: 0,5 % do fundo de escala.

A Figura 2 mostra fotos das medições sendo realizadas.

### Elaboração de metodologia para o cálculo de rendimento das caldeiras monitoradas

Não havendo metodologia normalizada no Brasil para o cálculo do rendimento de caldeiras, foi desenvolvido um método de cálculo baseado nas normas vigentes nos Estados Unidos (ASTM) e Alemanha (DIN).

O balanço energético para uma caldeira operando em regime permanente (regime de operação em que não há alteração das variáveis de processo ao longo do tempo) pode ser escrito de forma simplificada como:

$$E_f = E_u + P \quad (1)$$

onde:

$E_f$  (kJ/h): potência fornecida à caldeira

$E_u$  (kJ/h): potência útil absorvida pela água

$P$  (kJ/h): potência não aproveitada

O rendimento térmico pode ser determinado através do denominado “método direto”, ou “método da entrada e saída”, pela expressão:

$$\eta_{MD} = E_u / E_f \quad (2)$$

onde:

$\eta_{MD}$  (adim.): rendimento pelo método direto

Alternativamente, o rendimento pode ser determinado pelo denominado “método indireto”, ou “método das perdas”, através da expressão (3), obtida da substituição da equação (1) na (2):

$$\eta_{MI} = 1 - (P / E_f) \quad (3)$$

onde:

$\eta_{MI}$  (adim.): rendimento pelo método indireto



Figura 2 – Medições nas empresas

No cálculo do rendimento da caldeira pelo método direto, ou pelo indireto, é necessário que seja definido qual poder calorífico do combustível será utilizado, o superior (PCS) ou o inferior (PCI). Para uma mesma situação, os valores de rendimento calculados com base no PCI e no

PCS são diferentes. Na metodologia proposta pela norma ASME é utilizado o PCS, enquanto o PCI é empregado no método apresentado pela norma DIN.

Nos cálculos de rendimento realizados no trabalho foi utilizado o PCI, sendo considerado um valor de PCI típico para o gás natural de 47.168 kJ/kg. Tendo-se calculado o rendimento base PCI, pode-se obter o rendimento base PCS, multiplicando-se o valor encontrado pelo PCI e dividindo-se pelo PCS. O valor típico do PCS do gás natural é 52.215 kJ/kg. Portanto:

$$(\eta, \text{ base PCS}) = 0,9 * (\eta, \text{ base PCI}) \quad (4)$$

#### Análise de estratégias para aumento do rendimento das caldeiras monitoradas

Foram analisadas as estratégias que podem ser aplicadas às caldeiras monitoradas para aumento do rendimento, sendo a redução do excesso de ar operacional e a redução da temperatura dos gases de combustão na chaminé as de maior impacto.

### **Resultados obtidos e conclusões**

#### Rendimento térmico

\* O monitoramento das vinte caldeiras mostrou que cerca de metade delas - aquelas que possuem economizador ou, menos comum, pré-aquecedor de ar instalado, têm rendimento térmico satisfatório (acima de 92,5 %, base PCI), sendo que três delas têm rendimento elevado (em torno de 95 %).

\* As caldeiras sem pré-aquecedor de água ou ar instalado possuem rendimento térmico entre 90 e 91,5 %. O investimento em um economizador aumentaria o rendimento em cerca de 5 % e se pagaria em poucos meses, dependendo do porte da caldeira.

\* A maioria das caldeiras pode operar com menor excesso de ar, conforme foi comprovado naquelas em que, durante as medições, foi feito "ajuste" na relação ar-combustível. O ganho no rendimento obtido na redução do teor de O<sub>2</sub> dos gases é bastante variável - depende da relação ar-combustível ajustada para cada potência do queimador e do regime de operação da caldeira. O custo das providências a serem tomadas para a operação da caldeira com excesso de ar reduzido é, também, bastante variável - pode requerer apenas mudança de procedimentos operacionais até a substituição de componentes do queimador, do sistema de controle e do próprio queimador.

\* Duas caldeiras, destoando das demais, apresentaram rendimento muito baixo (da ordem de 84 %), fato atribuído, principalmente, ao

elevado excesso de ar praticado (O<sub>2</sub> dos gases entre 12 e 13 %).

\* Não existe analisador contínuo de O<sub>2</sub> na chaminé dos equipamentos (exceto em um deles) e sua instalação se justifica, pois a temperatura e o teor de O<sub>2</sub> dos gases são parâmetros fundamentais no cálculo estimativo do rendimento da caldeira.

#### Emissão de poluentes atmosféricos

\* O teor de CO dos gases se mostrou baixo, próximo de zero, em todas as caldeiras (exceto em uma, que opera usualmente com excesso de ar muito reduzido) e por quase todo o tempo, exceto em transitórios do queimador (alterações de potência de operação) e em determinadas caldeiras com o queimador operando em determinadas cargas.

\* O perfil das emissões de NO<sub>x</sub> das caldeiras é bem diferente. Em algumas, as emissões pouco dependem da carga e do excesso de ar, em outras não. De maneira geral, encontraram-se valores entre 20 e 160 ppm vol. b.s. (referidos a 3 % de O<sub>2</sub>), quase sempre abaixo de 156 ppm, que é o valor limite estabelecido pela legislação nacional para caldeiras "novas" (data de instalação superior a 12/2006) queimando GN (não havia, na época, padrão nacional para as "já existentes").

### **Referências**

- ASME - American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC 4-1998: Fired Steam Generators. New York, 1999. (revision of ASME PTC 4.1 - 1964).
- DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1994-02: Acceptance Testing of Steam Generators. Berlin, 1996 (updated version of the DIN 1942).
- MMA - Ministério do Meio Ambiente, CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006: Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, 2 jan. 2007. p. 131.