

UNIDADE MÓVEL PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS DE COMBUSTÃO¹

Renato Vergnhanini Filho²

Luiz Antonio Andrade³

Hudson Barreto de Brito⁴

Resumo

O IPT, com recursos da Comgás, dentro do “Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e de Conservação e Racionalização do Uso do Gás em São Paulo”, montou unidade móvel (veículo tipo furgão) equipada com instrumentação para avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes de equipamentos industriais de combustão. A unidade dispõe de instrumentos para a medição das propriedades (vazão, temperatura, pressão e composição química) dos principais fluxos de entrada e saída de equipamentos de combustão, tais como caldeiras, fornos e aquecedores de fluido térmico. Para a medição da composição de gases de combustão, por exemplo, tem-se analisadores contínuos para oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x), e de instrumentos descontínuos para material particulado. A unidade móvel foi utilizada recentemente em projeto que tinha como objetivo levantar o rendimento térmico e a emissão de poluentes atmosféricos de caldeiras operando com gás natural situadas na Região Metropolitana de Campinas e adjacências, e propor medidas de otimização desses parâmetros.

Palavras-chave: Combustão; Eficiência energética; Poluição atmosférica; Instrumentação.

MOBILE UNIT FOR ASSESSMENT OF ENERGY CONSUMPTION AND EMISSIONS OF AIR POLLUTANTS FROM COMBUSTION INDUSTRIAL EQUIPMENT

Abstract

The IPT with funding from Comgás within the "Annual Program of Research and Technological Development and Conservation and Rational Use of Gas in Sao Paulo", mounted mobile unit (van type vehicle) equipped with instrumentation to evaluate the energy consumption and pollutant emissions from industrial combustion equipment. The unit has instruments for measuring the properties (flow, temperature, pressure and chemical composition) of the main input and output streams of combustion equipment such as boilers, furnaces and thermal fluid heaters. For measuring the flue gas composition, for example, has continuous analyzers for oxygen (O₂), carbon dioxide (CO₂), sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x), and instruments for discontinuous particulate matter. The mobile unit was recently used in the project which aimed to raise thermal efficiency and emissions of air pollutants from boilers operating with natural gas located in the Metropolitan Region of Campinas and surrounding areas, and propose measures to optimize these parameters.

Keywords: Combustion; Energy efficiency; Air pollution; Instrumentation.

¹ *Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.*

² *Engenheiro Químico, pesquisador, IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, consultor técnico, Comgás - Companhia de Gás de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Mecânico, consultor técnico, Comgás - Companhia de Gás de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Poluição ambiental e eficiência energética são dois aspectos importantes em processos de combustão industrial.

A poluição atmosférica é a principal decorrência ambiental do uso de combustíveis, embora outras formas de poluição possam também estar presentes. Por exemplo, o emprego de carvão mineral leva à geração de efluente sólido (cinzas). Ou ainda, o uso de um sistema de limpeza dos gases de combustão em via úmida leva à geração de efluente líquido.

Nos gases efluentes de processos industriais de combustão, encontram-se vários constituintes poluentes, sendo os óxidos de nitrogênio (NO_x - NO e NO_2), o material particulado (MP - orgânico e inorgânico) e os compostos de enxofre (SO_x - SO_2 , SO_3 , e H_2SO_4) os mais preocupantes. Outros, como o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (VOC), são constituintes que, em equipamentos operando em condições normais, são emitidos a taxas muito pequenas, não causando qualquer dano ambiental. Há também o dióxido de carbono (CO_2), cuja abordagem como “poluente” é recente e ainda controversa, e outros derivados de combustíveis ou de equipamentos de combustão de emprego restrito ou específico (por exemplo, cromo na queima de resíduos de curtume ou óxido nitroso - N_2O em equipamentos de leite fluidizado).

São considerados poluentes atmosféricos aquelas substâncias adicionadas ao ar em quantidade suficiente para produzir efeito mensurável na fauna, flora ou em materiais em geral. Os poluentes podem estar na forma de partículas sólidas, de gotas ou de gases e podem ser classificados em dois grupos:

- aqueles emitidos diretamente por uma fonte identificável - “poluentes primários” e
- aqueles produzidos no ar por interação entre duas ou mais substâncias, sejam elas poluentes ou não - “poluentes secundários”.

O NO_x , o MP e o SO_x são poluentes primários. A principal ação no homem consiste no ataque às vias respiratórias. O NO_x , por exemplo, como o CO , reage com a hemoglobina do sangue, reduzindo sua capacidade de transporte de oxigênio. Já o MP, em particular o denominado “inalável” (diâmetro inferior a 10 micra) se aloja nas partes internas do sistema respiratório provocando lesões bastantes graves.

O NO_x e o SO_x são também poluentes secundários, pois ambos na atmosfera dão origem aos ácidos nítrico e sulfúrico, respectivamente, que são os principais componentes da chuva ácida. Além disso, o NO_x participa de complexas reações fotoquímicas que levam à formação do chamado *smog* (*smoke* + *fog*) - atmosfera negro-amarronzada constituída de substâncias de forte ação oxidante, como o ozônio (O_3), por exemplo. Na literatura especializada se encontra, em geral, a seguinte definição para *smog*: “atmosfera resultante da exposição à luz do sol de alguns compostos orgânicos voláteis na presença de NO_x ”.

A legislação nacional vigente, em concordância com a tendência internacional, estabelece como prioritário o controle da poluição atmosférica pelos padrões de emissão de poluentes, reservando o uso de padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle.

Os padrões de emissão determinam a quantidade máxima permissível de poluentes que pode ser emitida por uma determinada fonte poluidora. Legislações promulgadas pelo Conama^(1,2) estabelecem limites de emissão para MP, SO_x e NO_x para a queima em caldeiras, e em outros equipamentos de combustão onde não há contato direto dos gases com a carga que está sendo processada, dos seguintes combustíveis: óleo combustível, gás natural, cana-de-açúcar e derivados de

madeira. O Conama concede aos órgãos ambientais locais (a Cetesb, no caso do Estado de São Paulo) a prerrogativa de exigir padrões mais restritivos, considerando a qualidade do ar no entorno da instalação.

A conjuntura nacional e mundial permanece sendo de uso eficiente de energia. Na indústria, uma das principais fontes energéticas é a queima de combustíveis, daí a importância do levantamento do rendimento térmico, ou eficiência térmica, dos equipamentos de combustão. O rendimento térmico de uma caldeira, por exemplo, que é o equipamento de combustão de uso mais disseminado na indústria, é definido, de maneira simplista, como sendo a fração da potência liberada na câmara de combustão que é transferida ao fluido de trabalho (água). Na Figura 1, apresenta-se fluxograma simplificado dos principais fluxos de água, vapor, ar, combustível e gases de combustão da caldeira. No fluxograma, a linha pontilhada representa as fronteiras do objeto de estudo, comumente denominado de volume de controle (VC). Para o cálculo do rendimento da caldeira é necessária a caracterização dos fluxos que cruzam a fronteira do VC.

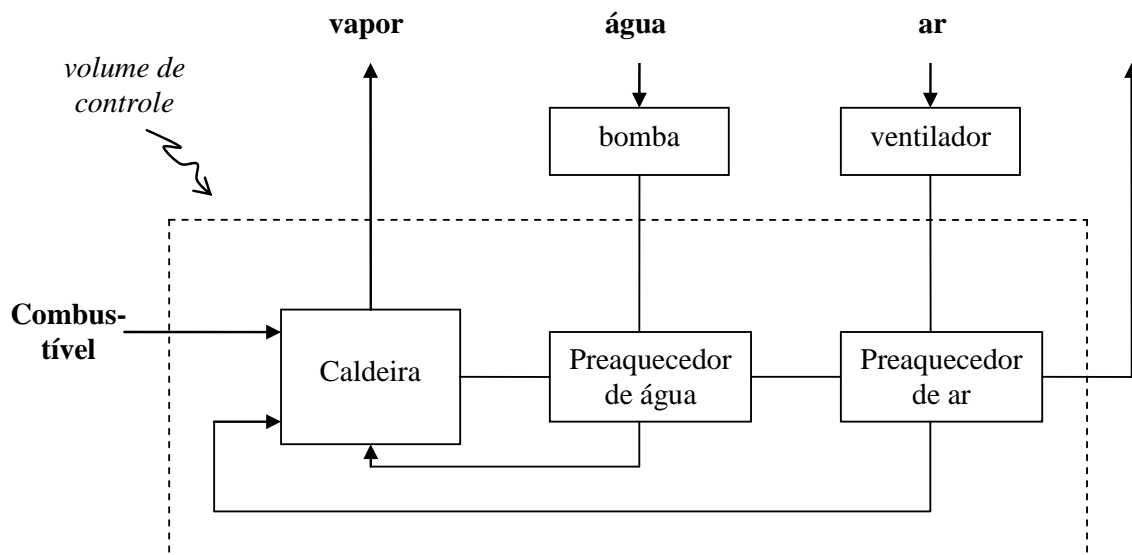


Figura 1. Fluxograma simplificado da caldeira.

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho foi montar uma unidade móvel equipada com instrumentação apta a medição da composição dos “gases” de combustão, e da pressão, temperatura e vazão dos principais fluxos de entrada e saída de um processo industrial de combustão para avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes.

2 INSTRUMENTAÇÃO

Foi especificado e adquirido instrumentação para a medição da pressão, temperatura e vazão de fluidos em geral, e da composição dos “gases” de combustão, juntamente com sistemas de calibração de gases, sucção e condicionamento da amostra, e aquisição e visualização de dados.

2.1 Análise Contínua dos “Gases”

O sistema de análise contínua dos constituintes gasosos dos “gases” de combustão é formado por sonda de amostragem refrigerada, conjunto de analisadores, bomba de vácuo, conjunto de filtros e condensadores para o condicionamento da amostra, e conjunto de válvulas, rotâmetros e cilindros para a calibração dos instrumentos.

Para análise do teor de CO, CO₂ e SO₂ dos gases foram adquiridos analisadores que operam pelo princípio da absorção seletiva de radiação infravermelha pelos gases (Figura 2). Como a absorvidade de certo volume de mistura gasosa aumenta com a pressão parcial de gás absorvente na mistura de gases não absorventes, a atenuação da radiação incidente dá uma medida do teor do gás em questão.

Para análise do teor O₂ dos gases foi adquirido analisador que opera pelo princípio da suscetibilidade magnética (Figura 2). Entre todos os gases industriais existentes, o oxigênio é o único que apresenta propriedades magnéticas excepcionais sendo, na presença de um campo magnético, atraído para a região de maior densidade de fluxo. O oxigênio é, portanto, paramagnético, sendo os demais constituintes gasosos praticamente diamagnéticos, e essa sua propriedade é utilizada para a medição da sua concentração nos “gases” de combustão.

Para análise do teor de NO_x dos gases foi adquirido analisador que opera pelo princípio da suscetibilidade magnética (Figura 2). Esse método de análise é específico para NO e NO₂ e se baseia na reação do NO com o ozônio (O₃) produzindo NO₂ e O₂. As moléculas de NO₂ produzidas estão, inicialmente, no estado eletronicamente excitado (NO₂*), porém são rapidamente revertidas ao estado fundamental (NO₂) emitindo fótons. Essa emissão, detectada por um fotodetector, tem intensidade proporcional à concentração de NO da amostra. No painel do instrumento há um seletor que pode ser colocado nos modos NO ou NO_x. Na opção NO_x, antes do oxigênio ser misturado a amostra, ela passa por um leito catalítico onde o NO₂ presente é convertido a NO. Ou seja, nesse modo, o analisador indica o teor de NO_x (NO + NO₂) da amostra. O teor de NO₂ é obtido pelo valor indicado no modo NO_x subtraído do indicado no modo NO.



a



b



c

Figura 2. Analisadores contínuos de “gases”: a - analisador por absorção de radiação; b - analisador por quimiluminescência; c- analisador por suscetibilidade magnética.

Como nos analisadores contínuos adquiridos pelo IPT os “gases” de combustão devem entrar isentos de material particulado e condensáveis, foi montado um sistema de sucção e condicionamento constituído de bomba de vácuo, filtros, bomba peristáltica, separador de gotas e unidade de refrigeração (Figura 3).

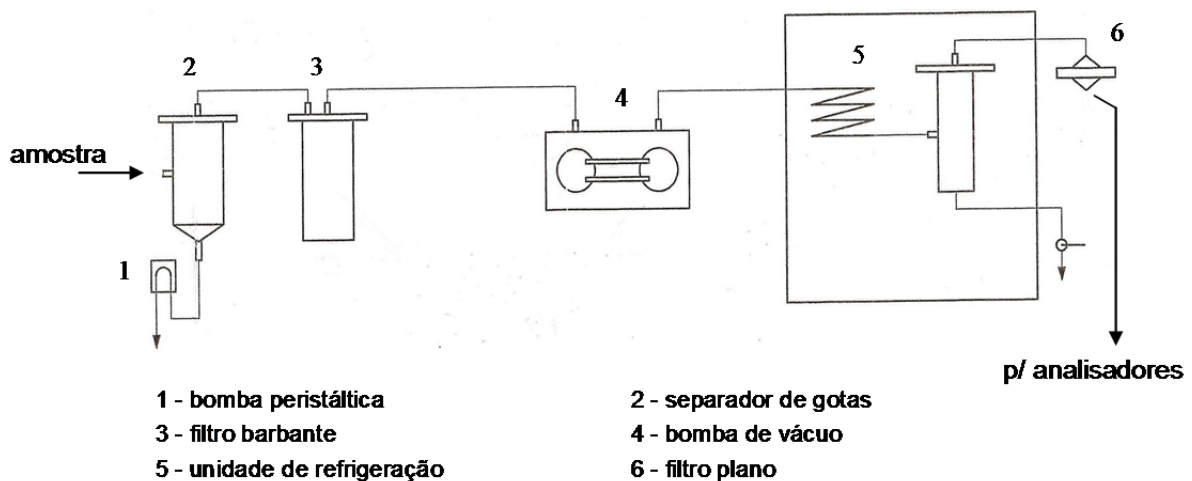


Figura 3. Sistema de condicionamento da amostra.

O condicionamento da amostra de gases leva ao aumento no tempo de resposta do instrumento, porém essa desvantagem foi parcialmente anulada, utilizando-se uma bomba de vácuo de grande vazão para trazer a amostra até próximo à entrada do sistema de tratamento. Do total coletado, faz-se retornar ao processo a quase

totalidade, admitindo-se no analisador apenas sua vazão de operação, que é muito baixa.

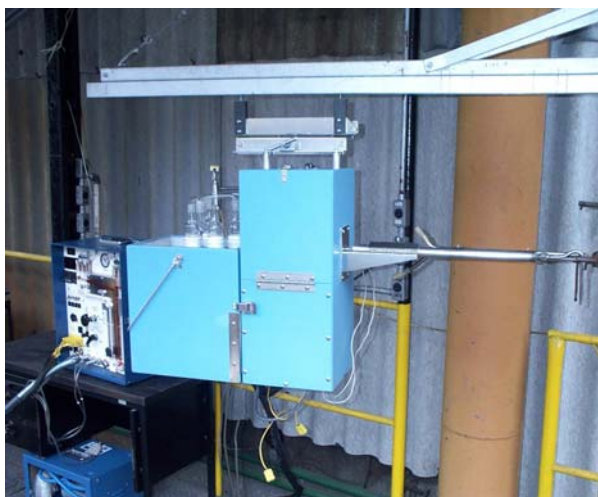
2.2 Análise Descontínua dos “Gases”

Foram adquiridos dois instrumentos para análise da concentração de MP em “gases” de combustão, que utilizam os métodos nºs 5 e 17 da Usepa,⁽³⁾ respectivamente. Tratam-se de métodos descontínuos que empregam um complexo sistema de amostragem e requerem posterior tratamento em laboratório da amostra coletada. A Figura 4 mostra o chamado “trem de amostragem” e o painel de controle empregados na aplicação do método nº 5, denominado “extrativo” porque o MP amostrado fica retido fora da chaminé, no interior do sistema de amostragem. O método nº 17, denominado “in-stack”, é semelhante ao nº 5 - a principal diferença consiste no fato do MP ficar retido no interior da chaminé, num filtro montado na ponta da sonda de amostragem. A Figura 4 mostra o painel de controle empregado na aplicação do método nº 17.

2.3 Sistemas de Aquisição e Visualização de Dados

Foi adquirido um registrador para a aquisição de sinais provenientes da instrumentação (analisadores contínuos de gases, termopares, transmissores). Os dados são coletados e programados de acordo com as variáveis a serem lidas, e apresentadas em uma tela de LCD. A taxa de aquisição e amostragem pode ser feita de acordo com a necessidade, variando de 1 a 500 amostras por segundo e os dados são armazenados na memória interna e num cartão de CFI, num formato que pode ser transformado em txt ou xls.

Os dados são coletados, também, em um laptop por meio de uma rede interna, onde a tela do registrador é apresentada em um monitor LCD de 32”. Os dados podem ser visualizados, também, numa rede local e transmitidos por meio de protocolo TCPIP a qualquer lugar. A Figura 5 mostra a tela de visualização de dados.



a



b



c

Figura 4. Analisadores descontínuos da concentração de MP de “gases”: a - método nº 5 - “trem de amostragem”; b - método nº 5 - painel de controle; c - método nº 17 - painel de controle.



Figura 5. Tela de visualização de dados.

3 UNIDADE MÓVEL

Um veículo tipo furgão foi adquirido e seu compartimento traseiro modificado para alojar os instrumentos adquiridos, bem como ar condicionado, sondas, cilindros de gases e materiais de consumo em geral. A Figura 6 mostra fotos da unidade.



Figura 6. Unidade móvel: a - montagem da unidade; b - interior da unidade - painel com os analisadores de gases, registrador e sistema de calibração; c - interior da unidade, atrás do painel - cilindros de gases, bomba de vácuo, sistema de condicionamento da amostra; unidade móvel.

4 EXEMPLO DE EMPREGO DA UNIDADE MÓVEL

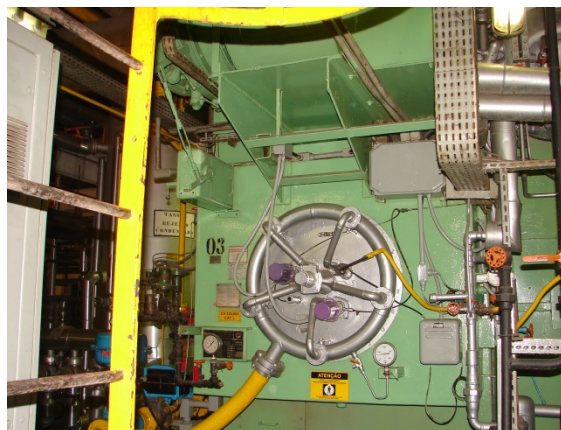
A unidade móvel foi utilizada recentemente em projeto que tinha como objetivo levantar o rendimento térmico e a emissão de poluentes atmosféricos de caldeiras operando com gás natural situadas na Região Metropolitana de Campinas e adjacências, e propor medidas de otimização desses parâmetros.

A Figura 7 mostra as instalações de uma das caldeiras monitoradas. Dados da caldeira: fabricante - Cobrasma S.A.; tipo - aquatubular; pressão de operação - 20 kgf/cm²; produção de vapor saturado - 10 t/h; possui economizador.

As Figuras 8, 9 e 10 mostram os valores medidos.



a



b



c



d



e



f

Figura 7. Instalações de uma das caldeiras monitoradas; a - unidade móvel; b – caldeira; c - medição temp. água antes economizador; d - medição temp. água após economizador; e - medição temp. e comp. gases antes econom; f - medição temp. gases após economizador.

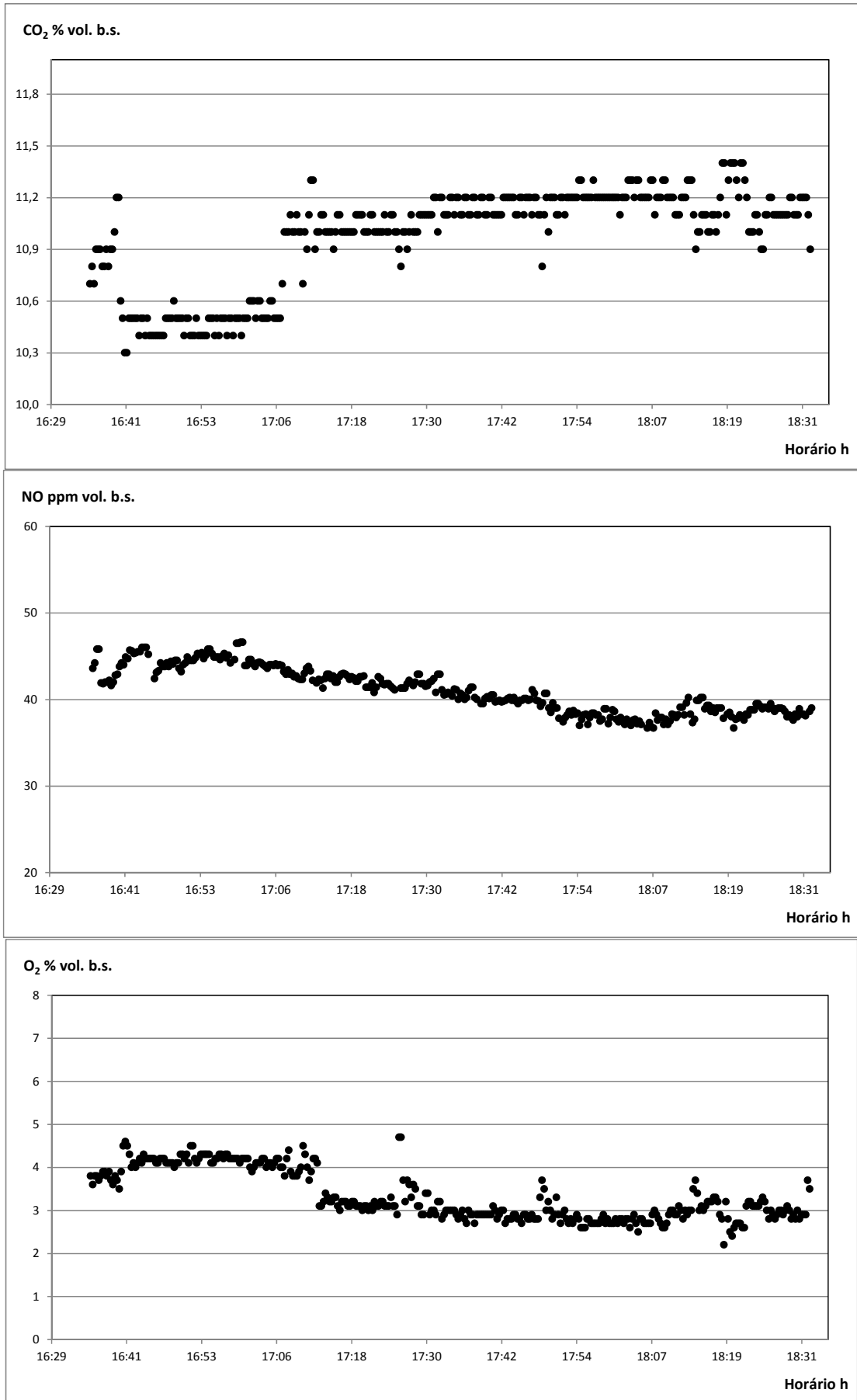


Figura 8. Teores medidos de CO₂, NO e O₂ dos gases efluentes da caldeira.

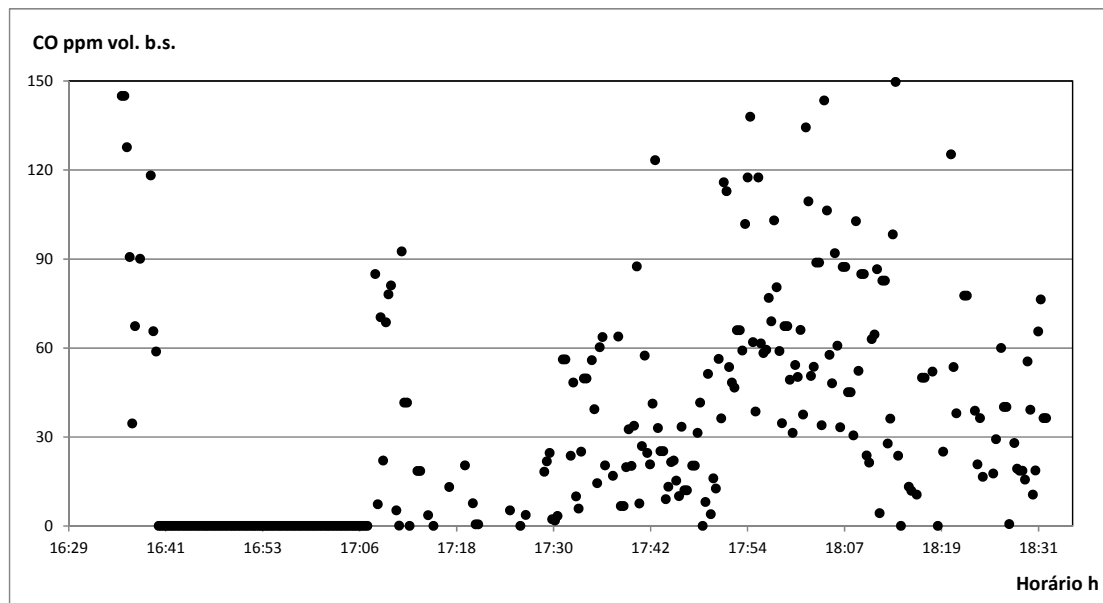


Figura 9. Teores medidos de CO dos gases efluentes da caldeira.

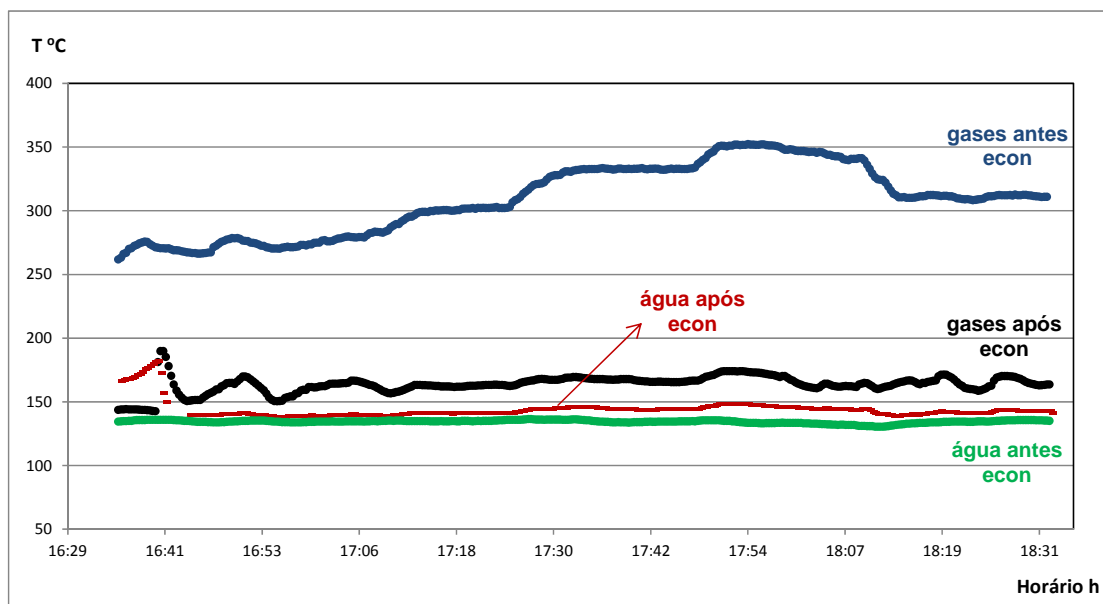


Figura 10. Temperaturas medidas da água e dos gases de combustão.

A partir dos valores medidos, calculam-se:

- Rendimento - método indireto, base PCI (%): 91,2
- Rendimento - método indireto, base PCS (%): 82,1
- Consumo de GN, em massa (kg/h): 519
- Consumo de GN, em volume (m^3/h): 633
- Consumo específico de GN ($\text{m}^3 \text{ n GN} / \text{t vapor}$): 63,3
- Vazão de ar de combustão (kg/h): 9.743
- Vazão de gases de combustão (kg/h): 10.262
- Excesso de ar de combustão (%): 15,1

REFERÊNCIAS

- 1 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02/01/2007. Resolução Nº 436 de 22/12/2011.
- 2 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação após 02/01/2007. Resolução Nº 382 de 26/12/2006.
- 3 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) Method 5 - Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources”; “Method 17 - Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources (in Stack Filtration Method)”.