

Artigo técnico

Medição da Composição dos
“Gases” de Combustão.*Measurement Of Flue Gas Composition.*Renato Vergnhanini Filho^{a*}

Resumo

Em processos industriais de combustão é inevitável a emissão de gases que, tratados ou não, são lançados na atmosfera. O conhecimento da composição desses gases é essencial para a segurança, operação e otimização do processo, bem como para o controle da poluição ambiental. Neste texto estão abordados instrumentos e métodos descontínuos, contínuos e semicontínuos para a medição dos constituintes mais comuns dos gases.

Abstract

In industrial combustion processes, the emission of gases which, treated or not, are released into the atmosphere is inevitable. The knowledge of the composition of these gases is essential for the safety, operation, and optimization of processes, as well as for the control of environmental pollution. This text discusses discontinuous, continuous, semi-continuous instruments and methods for measuring the most common constituents of gases.

^a Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE), Unidade de Negócios: Energia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

* E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave: gás de combustão; combustão; medição da composição do gás de combustão.

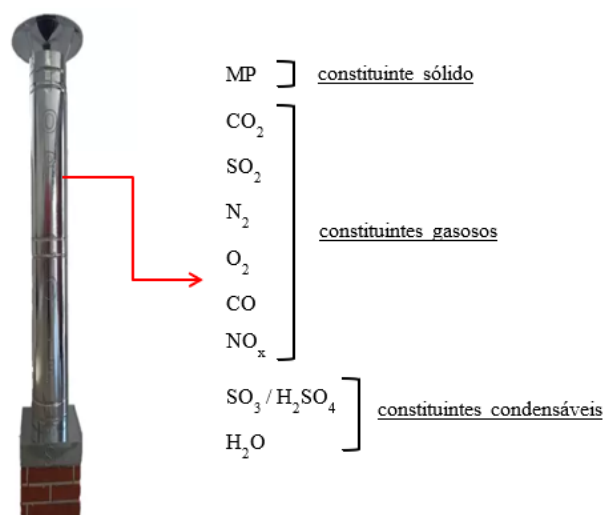
Keywords: flue gas; combustion; measurement of flue gas composition.

1 Introdução

Em processos industriais de combustão é inevitável a emissão de gases que, tratados ou não, são lançados na atmosfera. O conhecimento da composição desses gases é essencial para a segurança, operação e otimização do processo, bem como para o controle da poluição ambiental.

As substâncias que compõem os gases de combustão, assim como a participação delas na mistura, são função do combustível, e do equipamento utilizado e sua condição de operação. Os constituintes mais comumente encontrados nesses gases em quantidades mensuráveis são: oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x - SO_2 e SO_3 / H_2SO_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x - NO e NO_2). Esses constituintes são geralmente descarregados no ar ambiente no estado gasoso, exceto o MP , no estado sólido, e a H_2O e o SO_3 / H_2SO_4 , no estado líquido ou gasoso, dependendo basicamente da temperatura (Figura 1).

Figura 1 – Constituintes mais comuns dos gases de combustão



Fonte: Elaborado pelo autor

Os gases podem conter outros constituintes menos comuns, específicos da queima de determinados combustíveis ou de determinados processos de combustão como, por exemplo, as dioxinas e os furanos, que são gerados na queima de compostos clorados ou a acroleína, formada na combustão da glicerina, subproduto da produção do biodiesel. Podem conter, ainda, outros compostos, quando há contato direto dos gases de combustão com as matérias primas que estão sendo processadas ou com os produtos produzidos - por exemplo, em um forno de cimento típico há arraste de clínquer pelos gases.

Neste texto, estão abordados apenas instrumentos e métodos para a medição daqueles constituintes dos gases que foram apresentados anteriormente como sendo os mais comuns.

2 Instrumentos e métodos para a medição da composição dos gases de combustão

Os instrumentos e métodos para a medição da composição dos gases de combustão, dependendo do critério utilizado, podem ser divididos em: via seca ou úmida; mono ou multicomponentes; portáteis ou fixos; descontínuos, contínuos ou semicontínuos. Neste texto, eles são apresentados considerando essa última classificação.

Tem-se conhecimento de cerca de 60 empresas no Brasil que fabricam ou representam fabricantes ou apenas comercializam instrumentos de medição da composição dos gases de combustão.

2.1 Instrumentos e métodos descontínuos

2.1.1 Analisadores por absorção (para O₂, CO₂ e CO)

Exemplos de analisadores de gases por absorção são o aparelho de Orsat e os portáteis *Fyrite* ou *Bacharach* (apenas para O₂ e CO₂), mais conhecidos por essas denominações, embora sejam apenas nomes comerciais. Tais instrumentos tiveram, no passado, uso generalizado; atualmente, porém, com o surgimento de opções mais precisas, de emprego menos trabalhoso e a preços acessíveis, sua utilização é quase que restrita às indústrias de menor porte, na regulagem de seus equipamentos de combustão. A **Figura 2** traz ilustrações desses instrumentos.

Figura 2 – Analisadores descontínuos por absorção



Fonte: a) IndiaMART InterMESH Ltd.
b) OMNI Controls Inc.

No Brasil, no final do século passado, na época das chamadas crises do petróleo, quando proliferaram pelo país processos de gaseificação, surgiram aparelhos de Orsat equipados, também, com câmara de combustão catalítica. Na câmara, os gases são queimados, o hidrogênio (H_2) e o metano (CH_4) presentes convertidos a H_2O e CO_2 . A quantidade formada desses últimos, medida por absorção, indica a concentração de H_2 e CH_4 na amostra.

2.1.2 Escala de Ringelmann (para MP)

A escala de Ringelmann é uma escala gráfica constituída por seis padrões, numerados de 0 a 5, com variações uniformes de tonalidades entre o branco e o preto. Avalia-se a concentração de MP dos gases, comparando-se a sua coloração com os padrões da escala. Atualmente, porém, seu uso está praticamente restrito à avaliação da qualidade da combustão de motores veiculares (Figura 3).

2.1.3 Smoke test (para MP)

O *smoke test*, conhecido por esse nome pela indústria, trata-se de instrumento fabricado originalmente pela *Bacharach* e outrora bastante empregado para ajuste da combustão. Na sua utilização, os gases são aspirados por uma bomba manual atravessando um papel de filtro; a mancha escura deixada no filtro pelo MP depositado é comparada a manchas classificadas de 0 a 9, em ordem crescente de intensidade (Figura 4). Da mesma forma que os analisadores por absorção, seu uso atualmente é mais comum nas indústrias de pequeno porte.

Figura 3 – Escala de Ringelmann

a) Escala de Ringelmann



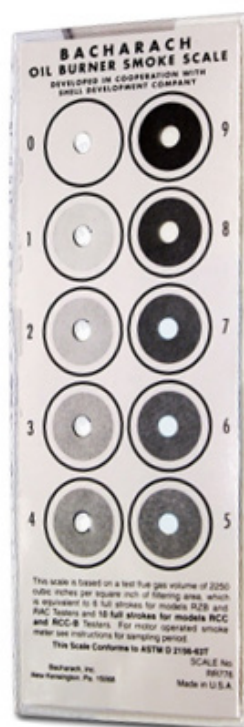
b) Medição utilizando a escala



Fonte: a) Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios de Toledo

b) AZTECA Software Ltda.

Figura 4 – Smoke test

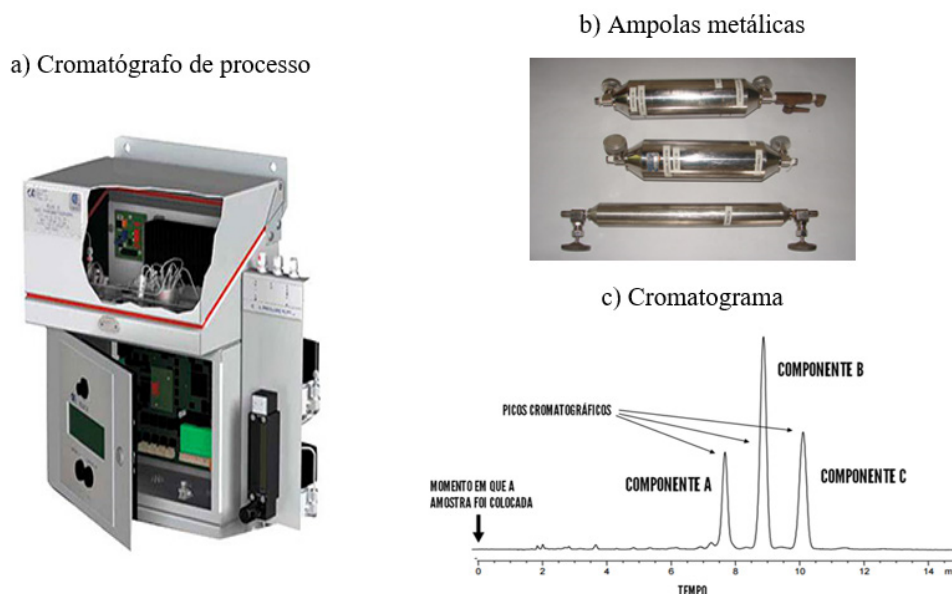


Fonte: MSA Safety Incorporated

2.1.4 Cromatógrafo (para constituintes gasosos dos gases)

A técnica de medição (cromatografia gasosa) consiste na coleta de uma amostra dos gases, utilizando ampolas metálicas ou *bags*, seguida de sua introdução em um cromatógrafo. Nele, a amostra passa por colunas cromatográficas, onde seus constituintes são separados e, na sequência, quantificados por detectores específicos para cada componente. Os resultados da análise são mostrados em um cromatograma, que é um registro gráfico que expressa os constituintes da amostra e suas respectivas concentrações. Vem avançando bastante o emprego pela indústria dos chamados cromatógrafos de processo ou cromatógrafos *on-line*, que fornecem uma medição praticamente contínua – instalados junto ao duto de gases, as amostras são automaticamente e seguidamente coletadas e analisadas (Figura 5).

Figura 5 – Cromatografia gasosa



Fonte: a) Engezer Produtos e Servicos Ltda.
b) e c) elaborado pelo autor

2.1.5 Métodos EPA (para todos os constituintes dos gases)

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) prescreve métodos de medição da concentração da totalidade dos constituintes dos gases de combustão (U.S. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1991). Para atender à exigência dos órgãos de controle ambiental nacionais, as indústrias contratam regularmente empresas especializadas em medições em chaminés que utilizam esses métodos. Tem-se conhecimento de cerca de 60 empresas no Brasil que prestam esse tipo de serviço.

Por exemplo, para H_2O , NO_x e SO_x há os métodos EPA números 4, 7 e 8, respectivamente. Para MP, os métodos EPA números 5 (5A, 5B, 5C, 5E, 5F, 5G, 5H) e 17, sendo o no 5 o mais empregado atualmente pelas indústrias no Brasil, porque é o que consta, geralmente, nas suas Licenças de Operação (L.O.). A tendência, porém, é que ele, progressivamente, seja substituído pelo nº 17, que é mais preciso ("o MP coletado fica retido exclusivamente no filtro") e mais seletivo ("compostos do tipo $H_2SO_4 \cdot nH_2O$ não são computados como MP").

Os métodos EPA mencionados para a medição da concentração de MP dos gases podem ser utilizados, também, para a coleta representativa de MP para análises laboratoriais de caracterização, tais como: análises imediata e elementar, distribuição granulométrica, morfologia etc.

A **Figura 6** e a **Figura 7** mostram os equipamentos prescritos nos métodos EPA números 5 e 17, respectivamente.

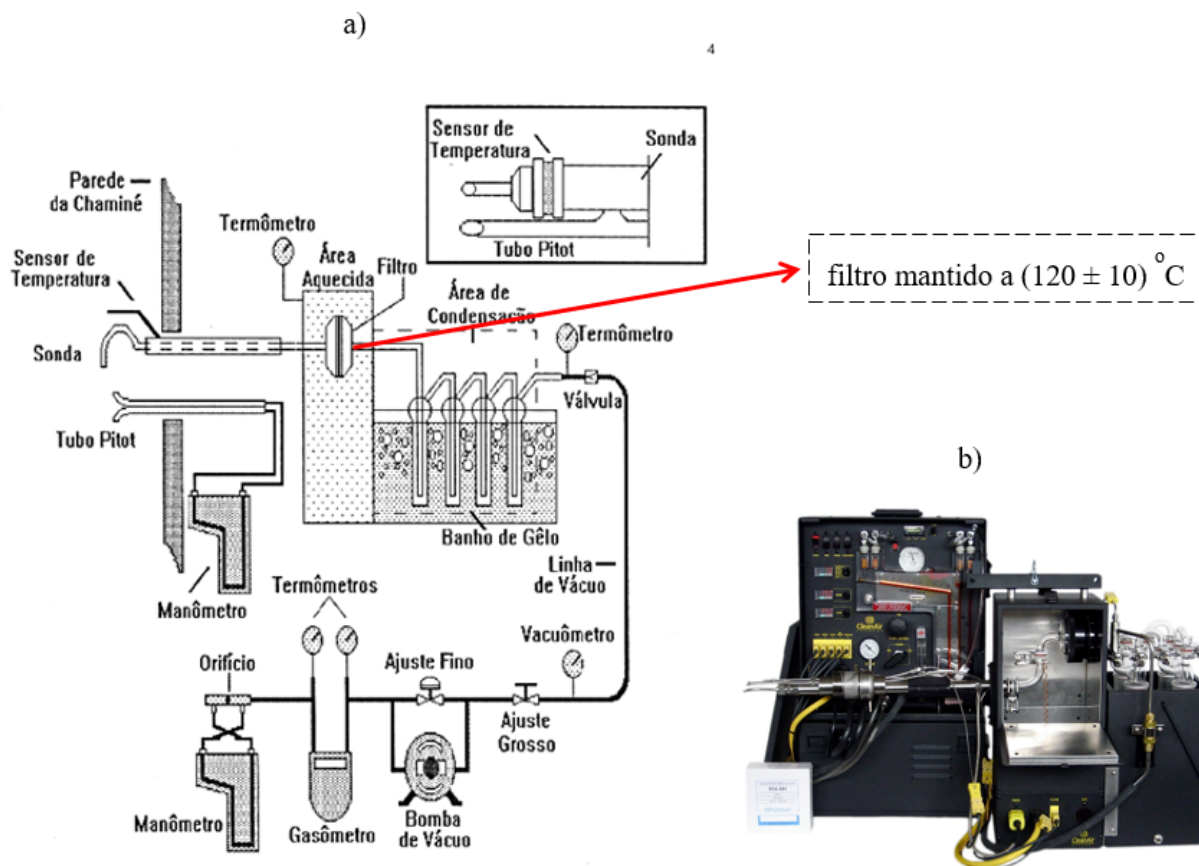
2.1.6 Impactador cascata (para MP - distribuição granulométrica)

O instrumento se presta à determinação da distribuição granulométrica do MP presente nos gases de combustão. Os gases passando, sequencialmente, por um conjunto de placas metálicas perfuradas - cada uma contendo certo número de furos e com furos de determinado diâmetro, vai desprendendo o MP presente em pratos metálicos, montados após cada placa, de forma progressiva e na ordem decrescente de tamanho. Como cada prato coleta partículas de determinada faixa de diâmetro, concluída a amostragem basta pesar o MP depositado em cada prato (**Figura 8**).

2.2 Instrumentos e métodos contínuos (para MP e constituintes gasosos dos gases)

Os analisadores contínuos de gases são classificados em in-situ e extrativos, e os sistemas de monitoramento de emissões que utilizam instrumentos desse tipo são denominados de CEMS (Continuous Emissions Monitoring Systems). Alternativamente à medição direta das emissões, os resultados podem ser estimados por meio de cálculos e modelos, simples ou muitas vezes bastante complexos, que os relacionam com características do equipamento de combustão, variáveis do processo (vazões, temperaturas, pressões) e propriedades do combustível, e que são aferidos por meio de medições - nesse caso, o sistema é denominado de PEMS (*Predictive Emissions Monitoring Systems*).

Figura 6 – Equipamento prescrito no método EPA nº 5



Fonte: a) Energética Ind. e Com. Ltda.

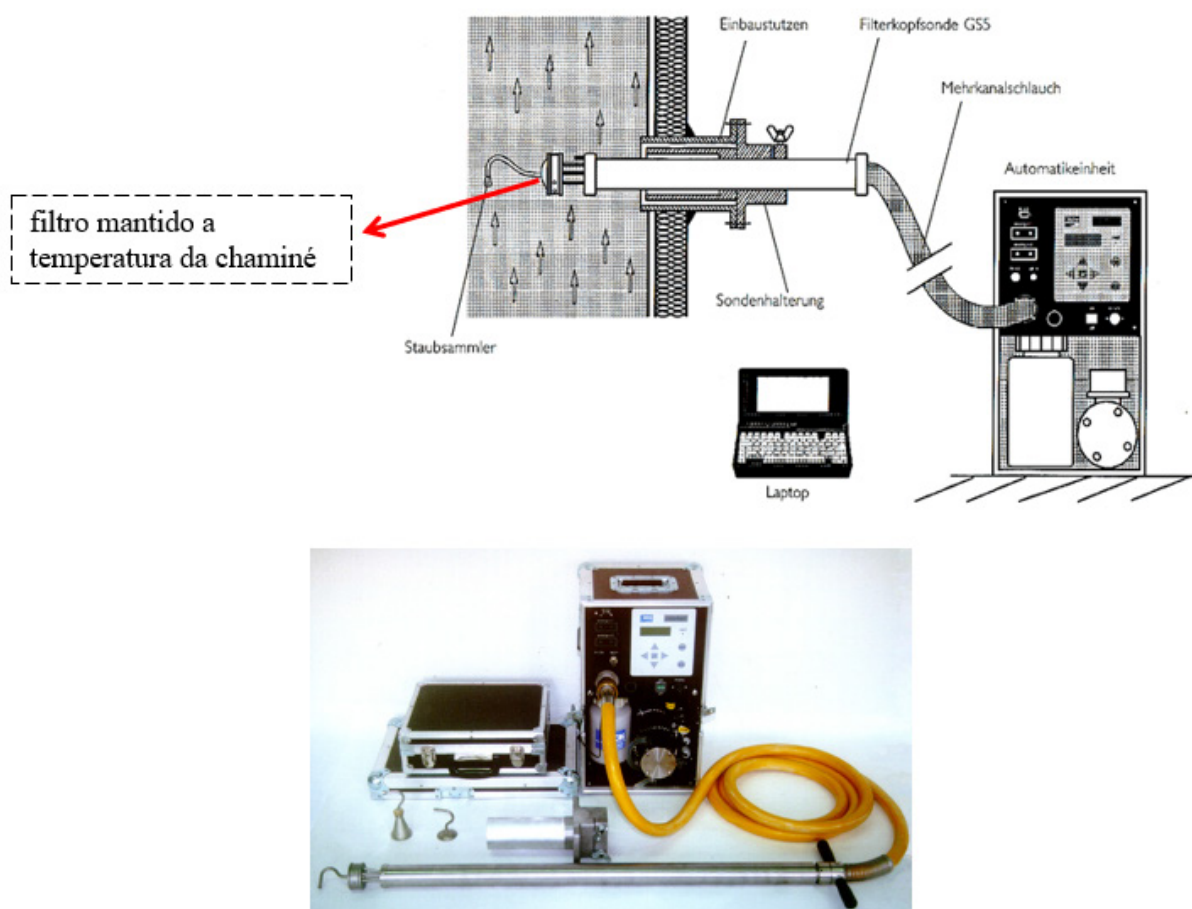
b) Clean Air Engineering

2.2.1 Analisadores contínuos *in-situ*

Os analisadores contínuos *in-situ* são montados diretamente no duto de gases e não necessitam que haja qualquer tipo de condicionamento da amostra como, por exemplo, remoção de MP e condensáveis, e redução de temperatura (Figura 9).

Eles são classificados em dois tipos. Nos instrumentos do primeiro tipo, os gases entram em contato diretamente com a célula de medição e o mais empregado deles se destina à medição de O_2 . Sua operação se baseia na geração em uma célula eletroquímica de uma corrente ou tensão proporcional ao teor de oxigênio da amostra e é conhecido pela indústria simplesmente por analisador por óxido de zircônio - denominação que vem do fato do eletrólito sólido utilizado ser de óxido de zircônio (Figura 10).

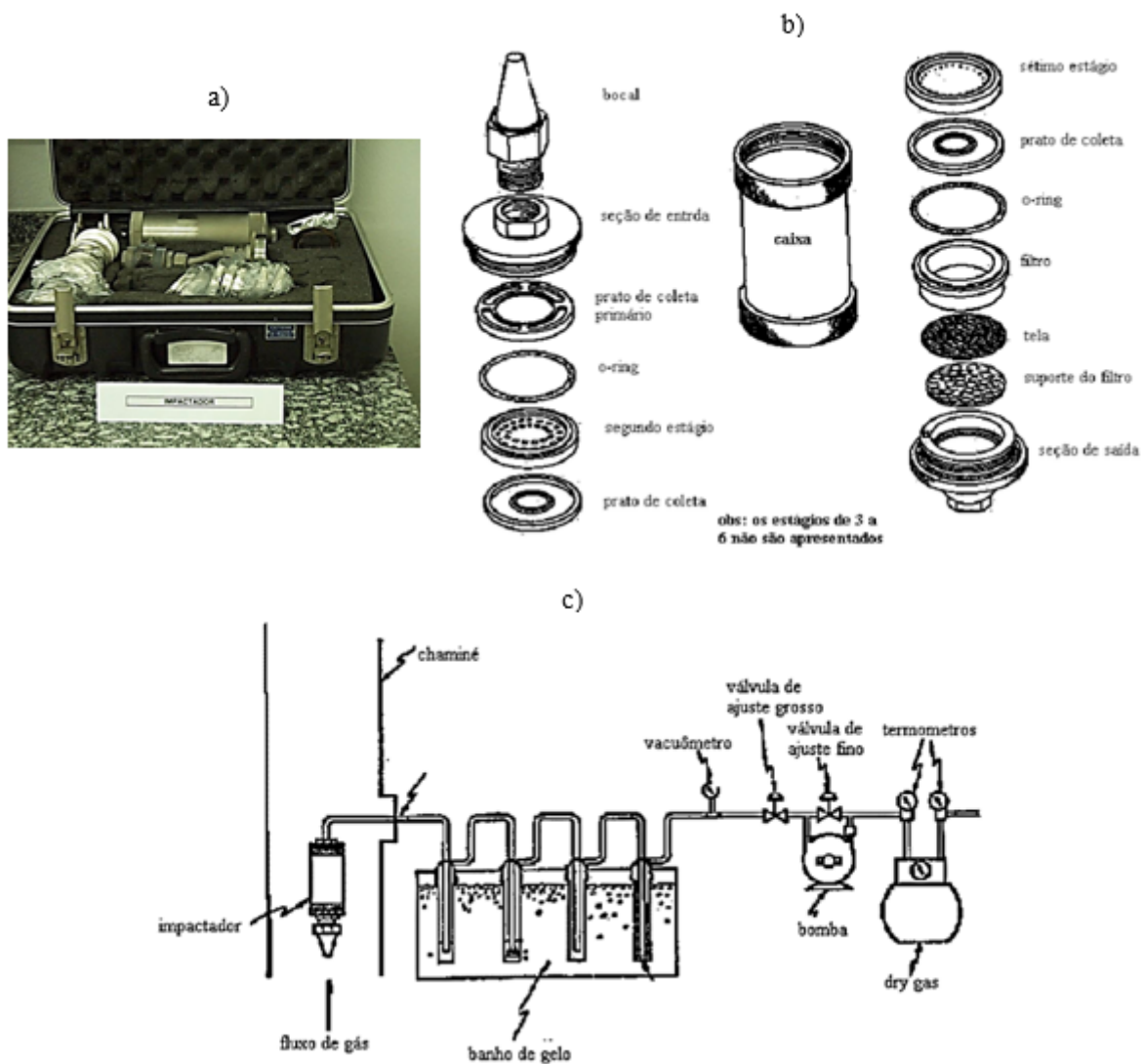
Figura 7 – Equipamento prescrito no método EPA nº 17



Fonte: Sick AG

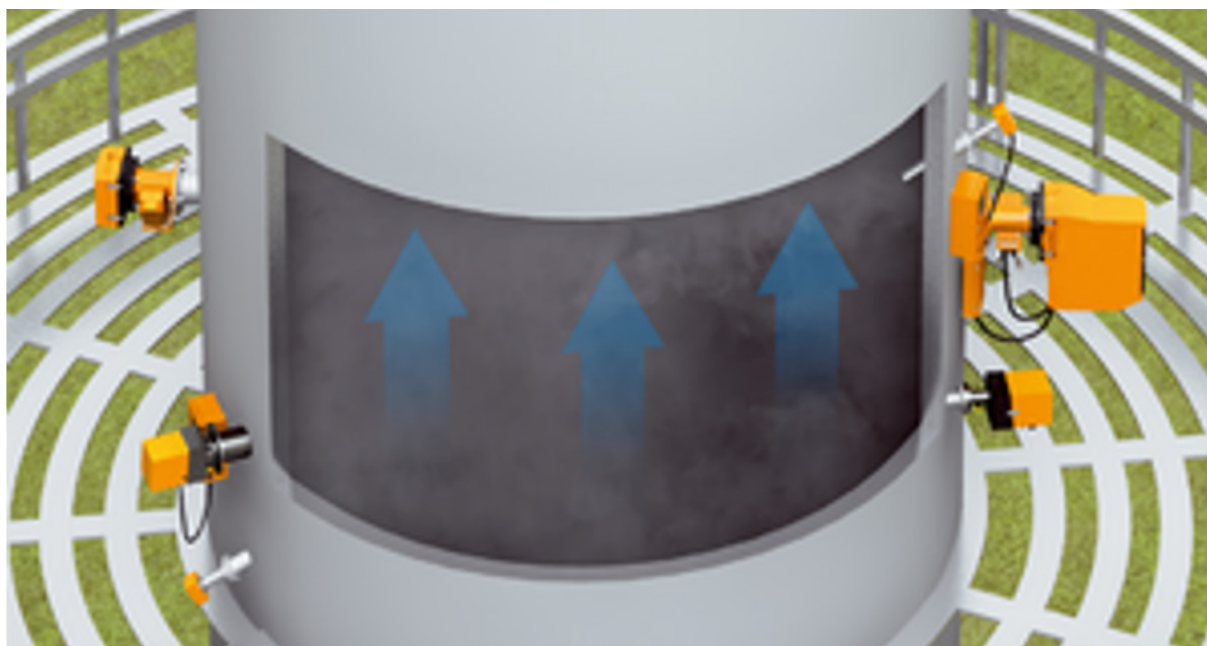
Nos analisadores do segundo tipo, a diferença é que neles não há contato da célula de medição com os gases. Há versões tanto para montagem em um único lado do duto de gases como para instalação em lados opostos (versão denominada de *cross-duct*). Para a medição dos constituintes gasosos dos gases, os instrumentos mais modernos, conhecidos pela sigla TDLS (*Tunable Diode Laser Spectrometer* - Espectrômetro de diodo laser ajustável), baseiam-se na espectrometria por absorção - o sistema opera medindo a quantidade de luz que é absorvida (perdida) quando passa através da amostra (Figura 11).

Figura 8 - Impactador cascata



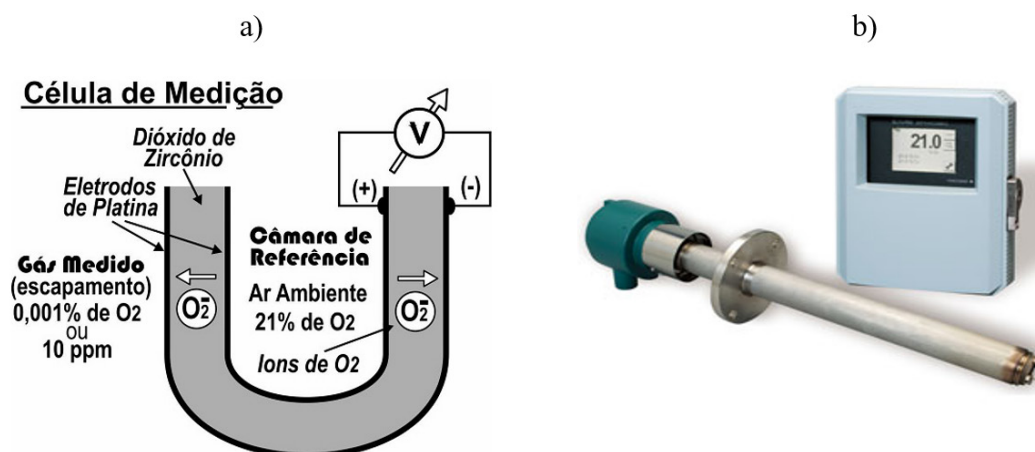
Fonte: a) Elaborado pelo autor
 b) Elaborado pelo autor
 c) University of Washington

Figura 9 – Analisadores *in-situ*



Fonte: Sick AG

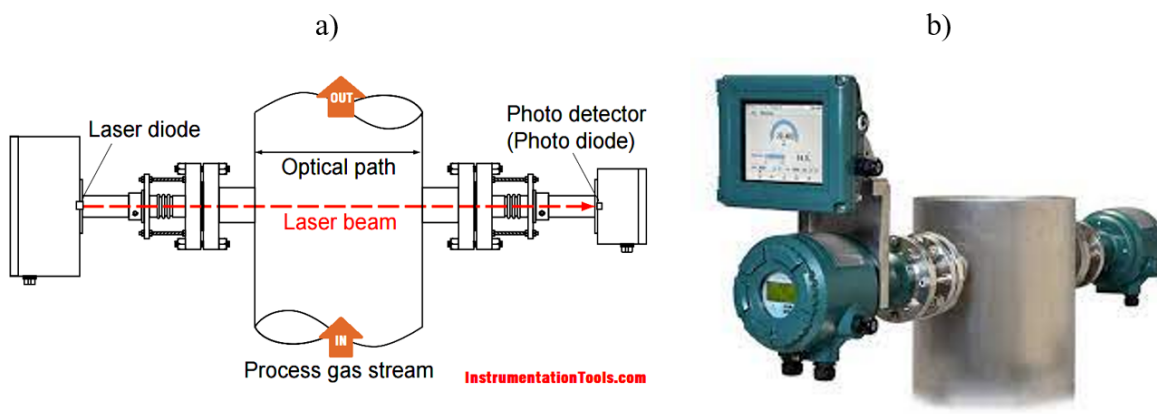
Figura 10 – Analisador utilizando óxido de zircônio



Fonte: a) Grupo Oficina Brasil
b) Yokogawa América do Sul

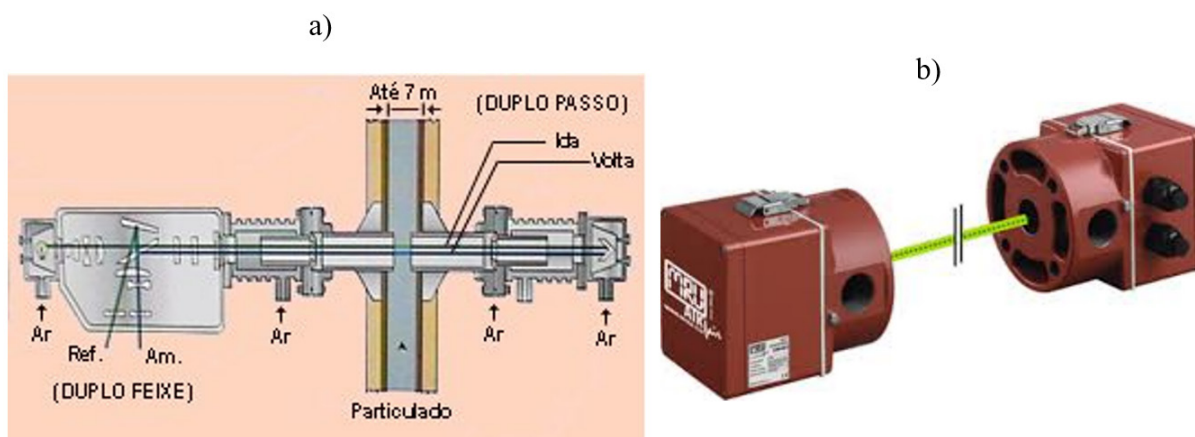
Para a medição de MP, o princípio de operação desses analisadores se baseia na interação (absorção, reflexão, difração ou refração) de um feixe de luz de características definidas com o MP presente nos gases. Eles costumam ser denominados genericamente por opacímetros e necessitam ser calibrados ou parametrizados, utilizando-se um daqueles métodos EPA para MP apresentados anteriormente, para que os resultados sejam expressos como "concentração de MP" (Figura 12).

Figura 11 – Analisador TDLS



Fonte: a) Instrumentation Tools
b) Yokogawa América do Sul

Figura 12 – Opacímetro



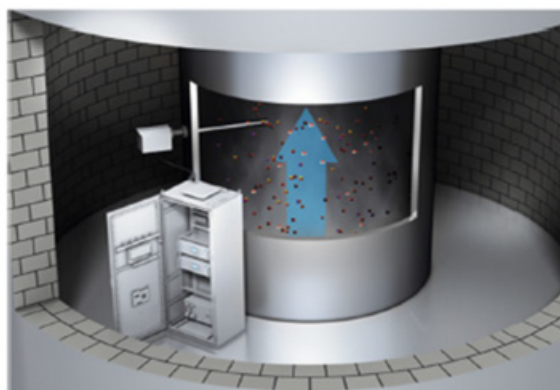
Fonte: a) Digimed Analítica Ltda.
b) Confor Instrumentos de Medição Ltda.

2.2.2 Analisadores contínuos extrativos (para constituintes gasosos dos gases)

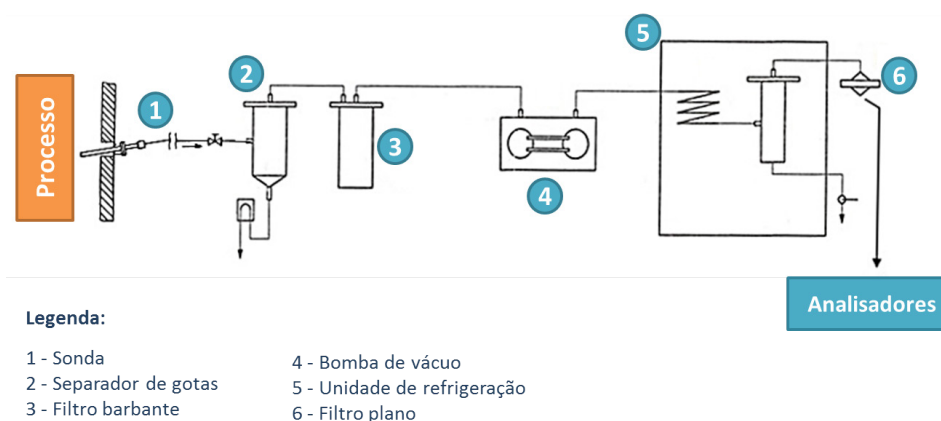
Nos analisadores contínuos extrativos, os gases devem ser admitidos isentos de sólidos e líquidos, e a temperatura próxima a ambiente, ou seja, requerem que eles sejam condicionados. Numa montagem típica, o sistema de análise se constitui de: sonda (refrigerada ou não), linha de amostragem, bomba de vácuo, filtros de um ou mais tipos (barbante, plano, cartucho), condensador (tipo Peltier, por exemplo) e um ou mais analisadores, montados em série ou paralelo (Figura 13).

Figura 13 – Analisadores extrativos

a)



b) Sistema de sucção e condicionamento de amostra típico



Fonte: a) Sick AG

b) elaborado pelo autor

Uma das vantagens dos analisadores extrativos comparado aos *in-situ* é que eles permitem a possibilidade de se medir a composição dos gases em mais de um ponto ou em mais de um equipamento com um único conjunto de sucção e condicionamento de amostra, e de analisadores. Para isso, bastam instalar uma sonda em cada ponto de medição, linhas de amostragem ligando cada ponto ao sistema de condicionamento e um mecanismo de chaveamento manual ou automático na entrada do sistema de condicionamento de forma que a composição dos gases em cada ponto seja lida sequencialmente. São vários os princípios de operação desses analisadores; por exemplo:

- para NO_x o princípio usual é o de quimiluminescência - baseia-se na emissão de luz pela amostra que, por alguma maneira, passou do seu estado fundamental para um estado excitado;

- para CO_2 , CO e SO_2 , absorção da radiação infravermelha não dispersiva (princípio conhecido pela sigla NDIR - *Non-Dispersive Infrared Radiation*) e
- para O_2 , suscetibilidade magnética - baseia-se na atração da amostra por um campo magnético (o O_2 é o único constituinte dos "gases" que é paramagnético) ou célula eletroquímica.

2.3 Instrumentos e métodos semicontínuos (para O_2 , CO e NO)

Analísadores contínuos, geralmente do tipo portátil, adequados apenas para curtos períodos de medição, sob risco de saturação da célula, costumam receber a denominação de semicontínuos. Eles medem, efetivamente, apenas os teores de O_2 , CO e NO dos gases, utilizando células eletroquímicas. Porém, costumam calcular ou estimar, baseados em uma série de premissas e hipóteses, e no tipo de combustível que o usuário seleciona entre os disponíveis no painel, as concentrações de vários outros constituintes dos gases, como CO_2 , SO_x , H_2O , N_2 e NO_2 , o excesso de ar de combustão, e as vazões relativas de ar e gases de combustão. Alguns desses instrumentos trazem, solidário a sonda de amostragem, um termopar e aí indicam, também, a temperatura dos gases, a potência térmica perdida pelos gases e o rendimento energético do equipamento de combustão. Os valores medidos e calculados, ou estimados, por esses analisadores são mostrados no painel e alguns os apresentam, também, na forma de um registro em papel.

Observa-se que tais instrumentos substituíram, em boa parte, os descontínuos por absorção, citados anteriormente, utilizados nas empresas de menor porte; já nas maiores, prepondera o emprego dos analisadores contínuos. A **Figura 14** mostra exemplos de analisadores semicontínuos.

3 Experiência do IPT na análise de "gases" de combustão

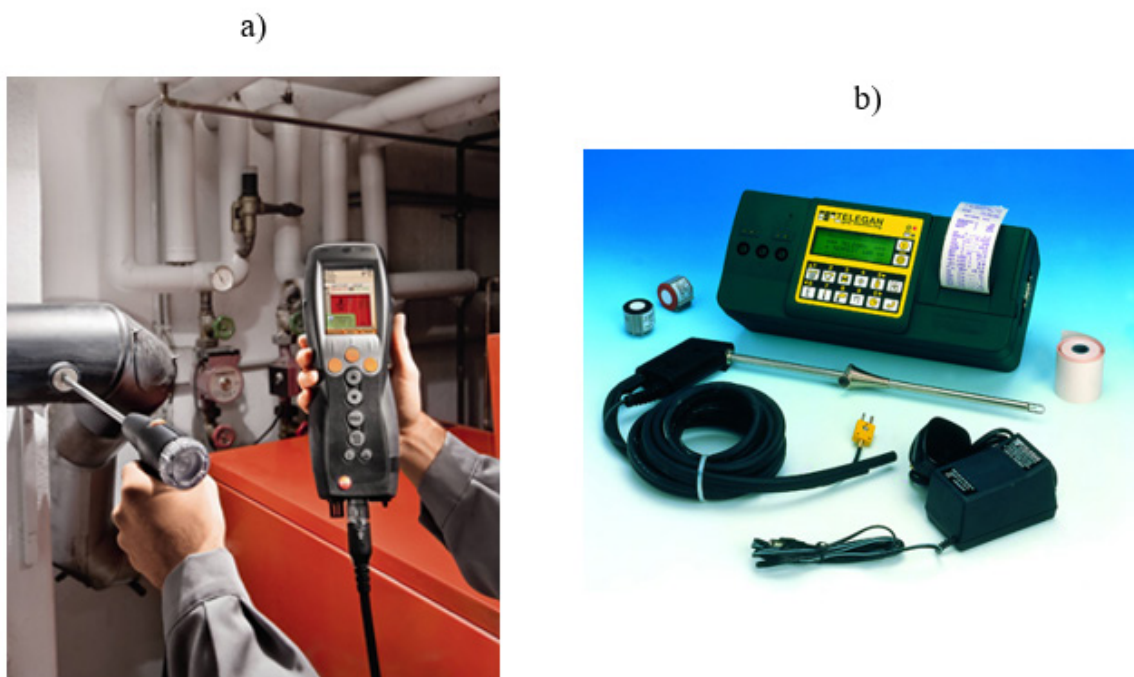
Nos trabalhos realizados na área de combustão industrial, seja no IPT, de pesquisa e desenvolvimento, seja na indústria, envolvendo otimização energética e redução da emissão de poluentes atmosféricos, é usual a necessidade do conhecimento da composição dos gases gerados nos equipamentos.

Na **Figura 15**, são mostrados analisadores de "gases" instalados na unidade móvel do LBE, na **Figura 16**, parte da instrumentação instalada no galpão do LBE e na **Figura 17**, a equipe do IPT realizando medições da composição de gases de combustão.

A experiência do LBE no manejo de analisadores de gases de combustão dos mais variados tipos, adquirida nos cerca de quarenta anos de existência do grupo, vem permitindo a prestação de assessoria

a indústria na especificação, montagem e avaliação de sistemas de análise, e a apresentação de cursos sobre o tema, nas modalidades aberta e *in-company*. Por exemplo, há quatro anos vem sendo apresentado o curso "Análise de gases de combustão na indústria: o que medir, para que medir, como medir" na modalidade aberta.

Figura 14 – Analisadores semicontínuos



Fonte: a) Testo do Brasil – Instrumentos de Medição Ltda.
b) KEISON International Limited.

Figura 15 – Unidade móvel do LBE com analisadores de gases montados em seu interior



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 16 – Analisadores de gases instalados no galpão do LBE



Fonte: elaborado pelo autor

3 Observações finais

Nas frequentes idas do IPT às indústrias, tem-se notado que a instalação de sistemas de análise de gases em seus equipamentos de combustão está em rápido crescimento. Mas, por outro lado, continuam sendo raros os sistemas que fornecem resultados confiáveis, permitindo que sejam inseridos em malhas de controle ou que sejam utilizados pelos técnicos na operação dos equipamentos. E a causa do problema parece não estar na especificação ou na qualidade dos analisadores, mas em questões mais operacionais, tais como:

- infiltração de ar ambiente entre a sonda de amostragem e a bomba de vácuo ou pela própria bomba, que não é hermética;
- localização do ponto de amostragem num local onde a composição dos gases não é representativa, pela existência de estratificações ou de infiltrações de ar ambiente;
- deficiência na manutenção dos analisadores e dos componentes do sistema de condicionamento dos gases;
- emprego de gases padrão errados na calibração dos analisadores ou mesmo ausência de calibração e
- erro na conversão do valor lido pelo instrumento para o indicado no painel do equipamento de combustão.

Figura 17 – Equipe do IPT realizando medição da composição de gases

a) Medições no galpão do LBE



b) Medições na indústria



Fonte: elaborado pelo autor

4 Referências

AZTECA Software Ltda. Disponível em: <http://e-licencie.com.br/wp-content/uploads/2019/07/COMO-UTILIZAR-A-ESCALA-DE-RINGELMANN%E2%80%8B.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022.

CLEAN Air Engineering. Disponível em: <https://www.cleanair.com/product/method-5-isokinetic-train/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

CONFOR Instrumentos de Medição Ltda. Disponível em: <https://www.confor.com.br/produto/opa-cimetro-continuo-industrial>. Acesso em: 30 mar. 2022.

DIGIMED Analítica Ltda. Disponível em: <https://www.digimed.ind.br/https://digimed.tripod.com/opa01ab.htm>. Acesso em: 30 mar. 2022.

ENERGÉTICA Ind. e Com. Ltda. Disponível em: https://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2016/01/env1_40cfr60_apa_met5_det_emis_part_fontes_estacionarias.pdf. Acesso em: 30 mar. 2022.

ENGEZER Produtos e Serviços Ltda. Disponível em: <https://www.engezer.com.br/cromatografos-processo>. Acesso em: 30 mar. 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Code of Federal Regulations (CFR), Title 40:** Protection of Environment, Chapter I: Environmental Protection Agency, Subchapter C: Air Programs, Part 60: Standards of Performance for New Stationary Sources, Appendix A: Test Methods, Jul. 1991.

GRUPO OFICINA BRASIL. Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/sensores-de-oxigenio-como-funcionam-e-a-sua-importancia-na-eletronica-do-motor>. Acesso em: 30 mar. 2022.

INDIAMART InterMESH Ltd. Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/orsat-gas-apparatus-4318620362.html>. Acesso em: 30 mar. 2022.

INSTRUMENTATION TOOLS. Disponível em: <https://instrumentationtools.com/tunable-diode-laser-analyzer-working-principle/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

KEISON International Limited. Disponível em: http://www.keison.co.uk/guide_fluegasanalysers.shtml. Acesso em 30.03.2022.

MSA Safety Incorporated. Disponível em: <https://www.mybacharach.com/product/true-spot-smoke-scale/>. Acesso em 30.03.2022.

OMNI Controls Inc. Consulta geral a homepage oficial. Disponível em: <https://www.omnicontrols.com/product/co2-fyrite-indicator-20-dry/>. Acesso em 30.03.2022.

SICK AG. Disponível em https://www.sick.com/br/pt/medidores-de-particulados/c/g54727?q=:Def_Type:ProductFamily&fs=10000#%20benefit_2. Acesso em: 30 mar. 2022.

SICK AG. Disponível em: <https://www.sick.com/br>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SICK AG. Disponível em: https://www.sick.com/media/docs/6/16/316/Operating_instructions_GRA-VIMAT_SHC502_Gravimetric_Dust_Concentration_Measuring_System_en_IM0011316.PDF. Acesso em: 30 mar. 2022.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE REPARAÇÃO DE VEÍCULOS E ACESSÓRIOS DE TOLEDO. Disponível em: <https://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindirepatoledo/escala-de-ringelmann-1-11560-301452.shtml>. Acesso em: 20 out. 2021.

TESTO DO BRASIL – Instrumentos de Medição Ltda. Disponível em: https://www.testo.com/pt-BR/produtos/products_emission_industry. Acesso em: 30 mar. 2022.

UNIVERSITY OF WASHINGTON. Disponível em: <http://faculty.washington.edu/mpilat/opman.htm>. Acesso em: 30 mar. 2022.

YOKOGAWA América do Sul. Disponível em: <https://www.yokogawa.com.br/produtos/analísadores-de-processo/analísadores-de-gases/oxigenio-zr402g>. Acesso em: 30 mar. 2022.

YOKOGAWA América do Sul. Disponível em: <https://www.yokogawa.com.br/produtos/analísadores-de-processo/analísadores-de-gases/analísadores-de-oxigenio/tdls8000>. Acesso em: 30 mar. 2022.

10.34033/2526-5830-v6n19-5

