

Be sure. **testo**



Guia prático

Análise de gases de combustão industriais.

Diretrizes para medições de emissões e processos

4ª edição revisada

Direitos autorais, garantia e responsabilidade

As informações reunidas neste Guia Prático estão protegidas por direitos autorais. Todos os direitos pertencem exclusivamente à Testo SE & Co. KGaA. O conteúdo e as imagens não podem ser reproduzidos comercialmente, modificados ou utilizados para fins diferentes da aplicação pretendida descrita, sem o consentimento prévio por escrito da Testo SE & Co. KGaA.

As informações contidas neste Guia Prático foram elaboradas com o máximo cuidado. No entanto, as informações fornecidas não são vinculativas, e a Testo SE & Co. KGaA reserva-se o direito de fazer alterações ou acréscimos. Por isso, a Testo SE & Co. KGaA não oferece qualquer garantia quanto à exatidão e integridade das informações fornecidas. A Testo AG não se responsabiliza por danos resultantes direta ou indiretamente do uso deste guia, na medida em que esses danos não possam ser atribuídos a dolo ou negligência.

Testo SE & Co. KGaA, dezembro de 2024

Prefácio

Caro Leitor,

A determinação das concentrações dos gases de combustão permite o monitoramento dos limites de emissão exigidos por lei, contribuindo assim para a proteção do meio ambiente. Por outro lado, as concentrações de gases ou as matrizes gasosas geradas durante o processo frequentemente fornecem uma excelente indicação da qualidade do processo existente, o que, por fim, exerce uma influência considerável na qualidade do produto.

Este Guia Prático contém os princípios básicos dos processos de combustão mais comuns, com um foco específico em sua aplicação na indústria.

Também são descritos os métodos de medição disponíveis, as características associadas às tarefas de medição, os parâmetros de medição de gases esperados, suas concentrações e seu significado em relação ao processo. Trata-se de um guia de referência útil para o uso de analisadores de gases portáteis na indústria, com base nas experiências de usuários dos instrumentos de medição da Testo em todo o mundo.

Ideias e sugestões adicionais para melhorias são sempre bem-vindas.

Boa leitura!



Prof. Burkart Knospe,
Presidente do Conselho de
Administração

Conteúdo

1. O processo de combustão	5
1.1 Energia e combustão	5
1.2 Usinas de combustão	9
1.3 Combustíveis	11
1.4 Ar de combustão, proporção de ar	12
1.4.1 Combustão ideal, relação ar-combustível, equilíbrio de materiais	13
1.4.2 Determinando a proporção de ar	16
1.4.3 Requisito de ar de combustão	18
1.4.4 Volume de gás, efeito de diluição, valor de referência	18
1.5 Gás de combustão (gás de exaustão) e sua composição	21
1.6 Valor calorífico bruto, valor calorífico líquido, eficiência, perda de gases de combustão	26
1.7 Ponto de orvalho, condensado	29
2. Razões para usar a análise de gás para gases de combustão industriais	33
2.1 Análise de gases para otimizar a combustão	35
2.2 Análise de gases para controle de processos	38
2.2.1 Instalação de combustão de processo para processos de combustão	38
2.2.2 Fornalhas industriais	40
2.2.3 Tratamento de superfície termoquímico	40
2.2.4 Medidas de segurança	41
2.3 Análise de gases para verificação de emissões	42
2.3.1 Estrutura legal para emissões/imissões em a República Federal da Alemanha	43
2.3.2 Disposições da Lei Federal de Controle de Imissões (BlmschG) na Alemanha (seleção)	45
2.3.3 Monitoramento de emissões nos EUA	56
2.3.4 Monitoramento de emissões na China	59
2.3.5 Processo de limpeza de gases de combustão	60
3. Tecnologia de análise de gases	67
3.1 Termos utilizados na tecnologia de análise (seleção)	67
3.1.1 Informações sobre concentração	67
3.1.2 Amostragem, preparação de gás	73
3.1.3 Sensibilidade cruzada	75
3.1.4 Calibração, ajuste	77
3.2 Analisadores de gás	78
3.2.1 Termos e utilização	78
3.2.2 Princípios de medição para detecção de gás (seleção)	83

4. Exemplos de aplicação	97
4.1 Geração de energia	98
4.1.1 Sistemas alimentados por combustível sólido	98
4.1.2 Instalações alimentadas a gás	100
4.1.3 Usinas de turbinas a gás	102
4.1.4 Instalações alimentadas a óleo	104
4.1.5 Usina termoeétrica a carvão	106
4.1.6 Centrais de cogeração (centrais de cogeração)	108
4.1.7 Usina elétrica de ciclo combinado (usina elétrica a gás e a vapor)	110
4.1.8 Estações de compressão	111
4.2 Eliminação de resíduos	114
4.2.1 Incineração de resíduos	114
4.2.2 Pirólise de resíduos	117
4.2.3 Pós-combustão térmica	119
4.3 Indústria de minerais não metálicos	121
4.3.1 Produção de cimento	121
4.3.2 Produção de cerâmica/porcelana	123
4.3.3 Olaria	125
4.3.4 Produção de vidro	126
4.3.5 Produção de cal	129
4.4 Indústria de metais e minérios	131
4.4.1 Processamento de minérios (sinterização)	131
4.4.2 Produção de ferro-gusa (alto-forno)	133
4.4.3 Produção de aço bruto	135
4.4.4 Usinas de coque	137
4.4.5 Produção de alumínio	139
4.4.6 Tratamento térmico de superfície	141
4.5 Indústria química	143
4.5.1 Aquecedores de processo	143
4.5.2 Refinarias	144
4.5.3 Chaminés de queima	146
4.5.4 Incineração de resíduos	147
4.6 Outros sistemas de combustão	148
4.6.1 Instalações de cremação	148
4.6.2 Bancos de teste	148
5. Tecnologia de análise de gases da Testo	151
5.1 A empresa	151
5.2 Características típicas	153
5.3 Visão geral dos analisadores de gases industriais da Testo	155
5.4 Visão geral dos acessórios	159
Endereços	165
Índice	167

1. O processo de combustão

1.1 Energia e Combustão

Energia

(do grego) significa "força atuante" e é definida como a capacidade de uma substância, corpo ou sistema de realizar trabalho. A energia pode ser atribuída a certos tipos de energia, dependendo de sua forma.

A energia pode ser classificada em seis categorias:

- Energia mecânica (água corrente, carro em movimento, mola helicoidal)
- Energia térmica (água fervente, chama de gás)
- Energia química (reações químicas, combustão, explosão)
- Energia elétrica (bateria de carro, corrente elétrica)
- Energia eletromagnética (luz, radiação térmica)
- Energia nuclear (fissão nuclear)

As diversas formas de energia podem ser convertidas de uma forma para outra, sendo que, dentro de um sistema idealmente fechado, a soma de todas as energias permanece constante (lei da conservação da

energia). Isso se aplica, de fato, ao universo como um sistema. Na prática, no entanto, parte da energia é perdida, em maior ou menor grau, durante a conversão de energia, e essa perda afeta a eficiência do processo de conversão.

Os portadores naturais de energia (carvão, gás natural, petróleo, radiação solar, energia hidrelétrica etc.) são descritos como energias primárias, enquanto as formas geradas por meio de conversões de energia (eletricidade, calor etc.) são chamadas de energias secundárias. Esses portadores de energia diferem não apenas em sua forma de apresentação, mas também em seu conteúdo energético. Para fins de comparação, geralmente se especifica a quantidade de energia que poderia ser liberada se uma determinada quantidade da fonte de energia fosse totalmente queimada. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos para ilustrar isso.

A unidade de medida da energia é o joule (J).

1. O processo de combustão

Fonte de energia	Conteúdo energético [MJ]
1 kg de linhito	9.0
1 kg de madeira	14.7
1 kg de carvão mineral	29.3
1 m ³ de gás natural	37.0
1 kg de petróleo bruto	42.6
1 kg de óleo combustível leve	42.7
1 kg de gasolina	43.5
Para comparação: 1 kWh	3.6

Tabela 1 – Conteúdo energético de vários combustíveis

Unidade	
Caloria	1 cal = 4.184 J
Unidade térmica britânica	1 Btu = 1,055.06 J
Tonelada equivalente de carvão	1 TCE = 29.3076 × 10 ⁹ J
Tonelada equivalente de petróleo	1 TOE = 41.868 × 10 ⁹ J

Tabela 2 – Conversão de várias unidades de energia

Prefixo	Símbolo	Valor
Quilo	k	10 ³
Mega	M	10 ⁶
Giga	G	10 ⁹
Tera	T	10 ¹²
Peta	P	10 ¹⁵
Exa	E	10 ¹⁸

Tabela 3 – Multiplicação de unidades de medida

Combustão

A combustão é a conversão da energia química primária contida em combustíveis como carvão, petróleo ou madeira em energia térmica secundária por meio do processo de oxidação. Combustão é, portanto, o termo técnico para a reação do oxigênio com os componentes combustíveis dos combustíveis, durante a qual a energia é liberada.

As combustões ocorrem em altas temperaturas (até 1000 °C e superiores) e com liberação de calor. O oxigênio necessário é fornecido como parte do ar de combustão. Ao mesmo tempo, forma-se um volume considerável de gases de combustão e, dependendo do tipo de combustível, uma certa quantidade de materiais residuais (cinzas, escória).

Oxidação

Termo para todas as reações químicas durante as quais uma substância se combina com o oxigênio. Durante a oxidação, há liberação de energia. A oxidação é de grande importância em termos de tecnologia (combustão) e biologia (respiração).

Efeito estufa

Em princípio, o efeito estufa é um fenômeno natural e um pré-requisito para a vida na Terra. Sem esse efeito, a temperatura média global próxima à superfície da Terra seria de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ em vez dos $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ atuais; a Terra seria inabitável!

A causa desse efeito natural é principalmente o teor de vapor d'água na atmosfera próxima à superfície da Terra, que permite a passagem da radiação solar, mas impede a saída da radiação térmica de comprimento de onda mais longo que se desenvolve no solo; esta é refletida de volta para a superfície da Terra. O gerenciamento de calor em estufas também se baseia nesse princípio.

No entanto, a queima excessiva de combustíveis fósseis (emissões de dióxido de carbono) e a liberação de substâncias químicas e agrícolas (CFCs, metano, etc.) intensificam consideravelmente esse efeito natural, o

que leva a um lento aumento da temperatura da Terra e afeta as condições climáticas, etc.

Até o início da industrialização, os efeitos da atividade humana limitavam-se a áreas locais ou regionais. Desde a industrialização, no entanto, mudanças suprarregionais e globais significativas na composição atmosférica têm sido observadas como resultado da influência humana. Isso é evidente no aumento das concentrações de gases de efeito estufa, que vêm aumentando em toda a atmosfera desde 1750. Em 2019, as concentrações de dióxido de carbono (CO_2) aumentaram mais de 48%, as de metano (CH_4) 160% e as de óxido nitroso (N_2O) 23% globalmente em comparação com os níveis pré-industriais.

Uma variedade de gases de efeito estufa contribui para o efeito estufa, mas nem todos impactam as mudanças climáticas com a mesma intensidade. Os gases de efeito estufa mais significativos que impulsionam as mudanças climáticas são o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e os hidrocarbonetos fluorados. No entanto, nem todos esses gases têm o mesmo impacto no efeito estufa. Para comparar e agregar o impacto climático de gases de efeito estufa individuais, eles são convertidos em

1. O processo de combustão

equivalentes de CO₂ (CO₂e) usando seu Potencial de Aquecimento Global (PAG). O PAG padroniza o impacto de todos os gases de efeito estufa em relação ao impacto do CO₂, o gás de efeito estufa mais amplamente emitido pelos humanos, ao qual, portanto, é atribuído um valor de PAG de 1. A maioria dos gases de efeito estufa está presente na atmosfera em quantidades variáveis, frequentemente em concentrações muito menores do que o CO₂, mas ainda assim têm um efeito maior no aquecimento global.

Gás de efeito estufa	Período de 100 anos
CO ₂	1
CH ₄	29.8
N ₂ O	273

Tabela 4 Potenciais de Aquecimento Global - Sexto Relatório de Avaliação do IPCC 2021

Mais detalhes sobre o tópico de combustão podem ser encontrados na Seção 1.4.

1.2 Usinas de Combustão

Usinas de combustão são instalações que geram calor pela queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. São necessárias para diversos fins, por exemplo:

- Para fins de aquecimento (usinas de aquecimento e sistemas de aquecimento de edifícios)
- Para geração de eletricidade
- Para geração de vapor ou água quente (usado em plantas de processamento, por exemplo)
- Para fabricação de certos materiais (para uso na indústria de cimento, vidro ou cerâmica, por exemplo)
- Para tratamento térmico de superfícies de peças metálicas
- Para queima de resíduos e sucata (resíduos, pneus usados, etc.)

Consulte os exemplos detalhados de aplicação na Seção 4.

A combustão ocorre em uma fornalha; outras partes da usina fornecem e distribuem o combustível, fornecem o ar de combustão, transferem o calor e transportam os gases e resíduos da combustão (cinzas e escória). Os combustíveis sólidos são queimados em leito fixo, leito fluidizado ou em uma nuvem de poeira arrastada. Através de um queimador, os combustíveis líquidos são alimentados na câmara de combustão juntamente com o ar de combustão na forma de névoa; os combustíveis gasosos já estão misturados com o ar de combustão no queimador. Os gases de combustão das usinas de combustão contêm os produtos da reação do combustível e do ar de combustão, bem como substâncias residuais, gerando principalmente poeira, óxidos de enxofre e nitrogênio, e também monóxido de carbono. Durante a combustão de carvão, HCl e HF, e durante a combustão de sucata, seus constituintes (HCl e HF, mas também vários hidrocarbonetos, metais pesados, etc.) também podem estar presentes nos gases de combustão.

1. O processo de combustão

No contexto da proteção ambiental, os gases de escape das instalações de combustão estão sujeitos a regulamentações rigorosas quanto aos valores-limite permitidos para poluentes como poeira, óxidos de enxofre e nitrogênio e monóxido de carbono no gás limpo (quando liberado na atmosfera). Para cumprir esses valores-limite, as instalações de combustão são equipadas com amplas instalações para a limpeza dos gases de combustão, como filtros de poeira e diversos lavadores de gases de combustão. Na Alemanha, os requisitos específicos são estabelecidos nas portarias da Lei Federal de Controle de Emissões e nas Instruções Técnicas sobre o Controle da Qualidade do Ar (TA Luft/TI Air). Mais informações sobre isso podem ser encontradas na Seção 2.3.

1.3 Combustíveis

Os combustíveis estão disponíveis em várias formas e composições:

- Combustíveis sólidos (carvão, turfa, madeira, palha) são compostos principalmente por carbono (C), hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), com menores quantidades de enxofre (S), nitrogênio (N₂) e água (H₂O).
- Combustíveis líquidos derivam do petróleo ou do seu processamento, sendo feita uma distinção entre óleos combustíveis extra-leves (EL), leves (L), médios (M) e pesados (S).
- Combustíveis gasosos são uma mistura de gases combustíveis (CO, H₂ e hidrocarbonetos) e não combustíveis. Atualmente, o gás natural, cujo principal componente é o gás metano (CH₄), é frequentemente utilizado.

Conhecer a composição do combustível é essencial para gerenciar a combustão de forma mais eficiente e, portanto, econômica. Uma maior quantidade de substâncias não inflamáveis (inertes) reduz o valor calorífico bruto/líquido e aumenta o nível de sujeira que se acumula nas superfícies de aquecimento. O aumento do teor de água eleva o ponto de orvalho do vapor d'água e consome energia do combustível para evaporar a água nos gases de escape. O enxofre contido no combustível se transforma em SO₂ e SO₃ durante a combustão, o que pode gerar ácido sulfuroso ou ácido sulfúrico agressivos quando o gás esfria abaixo do ponto de orvalho. Consulte também a Seção 1.7.

Para explicações sobre o valor calorífico dos combustíveis, consulte a Seção 1.6.

A composição de alguns combustíveis sólidos é mostrada na tabela a seguir.

Combustível	Conteúdo (conteúdo de massa em %)			
	Carbono na matéria seca	Enxofre	Cinzas	Água
Carvão mineral	80-90	1	5	3-10
Orto-linhito	60-70	2	5	30-60
Meta-linhito	70-80			10-30
Madeira (seca ao ar)	50	1	1	15
Turfa	50-60	1	5	15-30

Tabela 5 Composição dos combustíveis

1. O processo de combustão

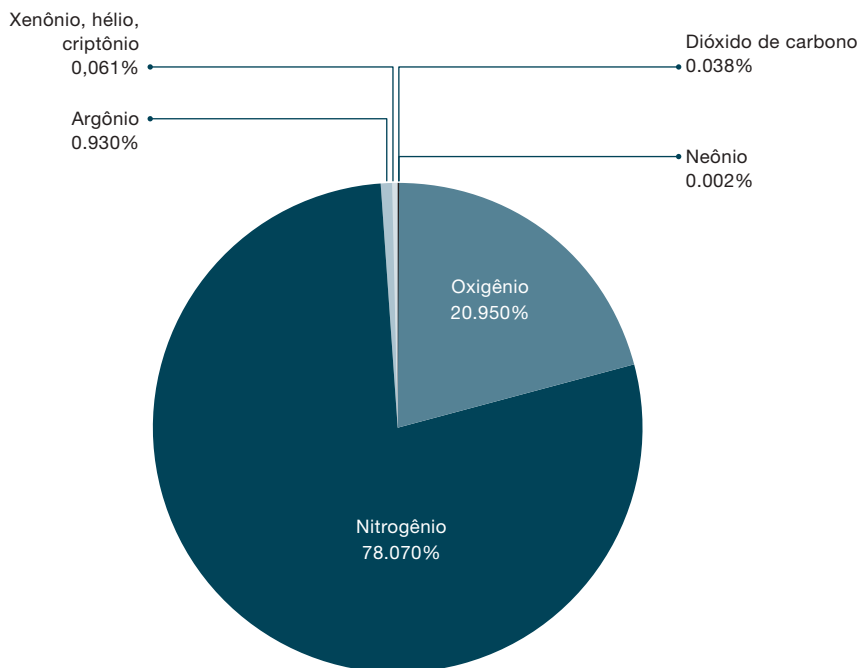
1.4 Ar de combustão, proporção de ar

O ar de combustão fornece o oxigênio necessário para a combustão. Ele é composto por nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), uma pequena proporção de gases nobres e uma proporção variável de vapor d'água (Tabela 6). Em alguns casos, até oxigênio puro ou uma mistura de oxigênio/ar é utilizada para a combustão.

Os constituintes essenciais do ar de combustão (exceto o oxigênio utilizado no processo de combustão) podem ser encontrados nos gases de exaustão.

Componente	Conteúdo de volume [%]
Oxigênio	20.950%
Nitrogênio	78.070%
Argônio	0.930%
Dióxido de carbono	0.038%
Neônio	0.002%

Tabela 6 Composição do ar puro e seco na superfície da Terra



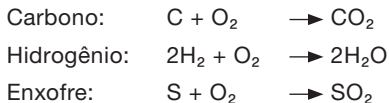
1.4.1 Combustão ideal, relação ar-combustível, equilíbrio de materiais

A necessidade mínima de oxigênio para a combustão completa (ideal) dos constituintes combustíveis depende da composição do combustível:

Por exemplo, a combustão de 1 kg de carbono requer 2,67 kg de oxigênio, mas 1 kg de hidrogênio requer 8 kg e 1 kg de enxofre requer apenas 1 kg de oxigênio.

Este caso de relações de quantidades exatas é considerado uma combustão ideal ou combustão sob condições estequiométricas.

As equações químicas correspondentes são as seguintes:



A combustão ideal pode ser baseada no modelo mostrado na Figura 1: A quantidade de oxigênio fornecida é suficiente para queimar completamente o combustível presente; não há excesso de oxigênio ou combustível.

Na prática, porém, essa quantidade ideal (mínima) de oxigênio não é

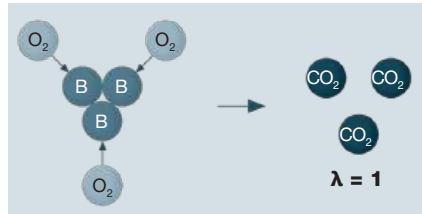


Figura 1 Modelo de uma combustão ideal

suficiente para a combustão completa devido à mistura imperfeita de combustível e oxigênio, de modo que o sistema precisa ser suprido com mais oxigênio e, portanto, ar de combustão, do que o necessário estequiometricamente.

Esse ar adicional é chamado de "excesso de ar" e a razão entre o volume de ar real e o volume de ar necessário estequiometricamente é chamada de razão ar-combustível (λ).

A Figura 2 mostra esse modelo de combustão com excesso de ar; aqui, devido ao excesso de ar, λ é > 1 .

1. O processo de combustão

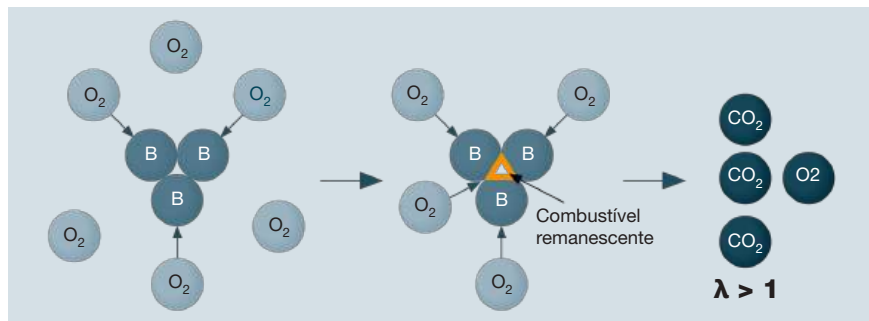


Figura 2 Modelo de combustão com excesso de ar

A eficiência máxima da combustão é, portanto, estabelecida com um excesso marginal de ar ou oxigênio, ou seja, em $\lambda > 1$ (atmosfera oxidante). A relação ar/ar e seu conhecimento são fatores extremamente importantes para garantir a combustão ideal e a eficiência econômica da operação da planta:

- Excesso desnecessário de ar reduz a temperatura de combustão e aumenta a quantidade de energia não utilizada dissipada pelo maior volume de gases de combustão.
- Com muito pouco excesso de ar, além do mau uso do combustível, isso também aumentará o impacto ambiental prejudicial devido aos resíduos não queimados nos gases de combustão.

A Tabela 7 mostra as faixas típicas de razão de ar para diversas usinas de combustão. Em princípio, aplica-se o seguinte: quanto menor a superfície

de reação do combustível em relação à unidade de massa (combustível de granulação grossa), maior a quantidade de ar em excesso que deve ser escolhida para garantir a combustão completa. O inverso também é verdadeiro, razão pela qual os combustíveis sólidos são moídos finamente e os combustíveis líquidos são atomizados. No entanto, processos especiais, como o tratamento térmico de superfície, são deliberadamente operados com ar insuficiente a $\lambda < 1$, pois isso é necessário para garantir o processo de refinamento necessário.

Usina de combustão	Faixa para λ
Motores de combustão	0.8 - 1.2
Instalações de jato de pressão a gás	1.1 - 1.3
Queimadores de óleo	1.2 - 1.5
Queimador de pó de carvão	1.1 - 1.3
Forno de grelha para carvão marrom	1.3 - 1.7

Tabela 7 Intervalos típicos para λ

Atmosfera oxidante

Aqui, há mais oxigênio disponível do que o necessário para a oxidação de substâncias oxidáveis no combustível.

Portanto, a oxidação completa (combustão) é possível.

Simplificando: Oxidação = adição de oxigênio (CO é oxidado a CO₂).

Atmosfera redutora

Aqui, há muito pouco oxigênio para oxidar todas as substâncias oxidáveis.

Ocorre o oposto da oxidação, ou seja, uma redução.

Simplificando:

Redução = remoção de oxigênio (SO₂ é reduzido a S).

1. O processo de combustão

1.4.2 Determinando a proporção de ar

A razão de ar pode ser determinada a partir das concentrações dos componentes dos gases de combustão CO , CO_2 e O_2 , sendo que as correlações são mostradas no chamado gráfico de combustão, na Figura 3. Quando há uma mistura ideal de combustível e ar, qualquer conteúdo de CO_2 está relacionado a um conteúdo específico de CO (na faixa $\lambda < 1$) ou a um conteúdo específico de O_2 (na faixa $\lambda > 1$).

O valor de CO_2 isolado não é claro devido ao perfil da curva ultrapassando um máximo, o que significa que um teste adicional é necessário para determinar se o gás também contém CO ou O_2 além do CO_2 .

Para a operação com excesso de ar (ou seja, o cenário normal), uma medição definitiva de O_2 agora é geralmente preferida. As progressões da curva são específicas para cada combustível, ou seja, cada combustível tem seu próprio diagrama e um valor específico para CO_2max , consulte a Tabela 10.

Na prática, as correlações entre esses diversos diagramas são frequentemente resumidas em um nomograma fácil de usar ("triângulo de fogo", não ilustrado aqui). Este pode ser aplicado a qualquer tipo de combustível.

As seguintes duas fórmulas aplicam-se aproximadamente ao cálculo teórico da razão de ar a partir das leituras de CO_2 ou O_2 :

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_2}$$

$$\lambda = 1 + \frac{\text{O}_2}{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_2}$$

com

CO_2max :

Valor máximo de CO_2 específico para o combustível em [%] (veja a Tabela 10). Se necessário, este valor pode ser determinado pela Testo como um serviço.

O_2ref :

Valor de referência de O_2 (tipicamente 21 vol.%)

CO_2 e O_2 :

Valores medidos (ou calculados) nos gases de combustão.

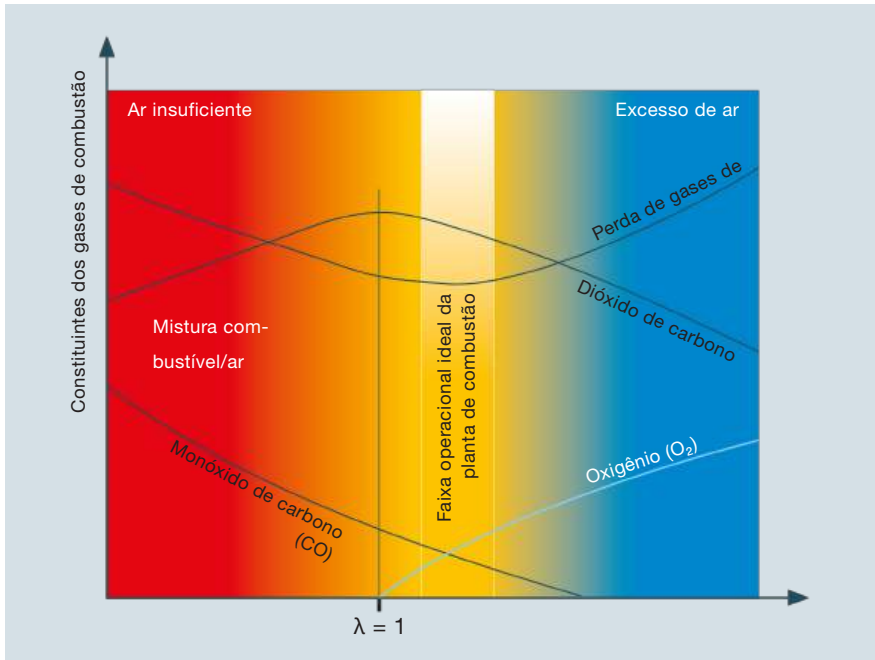


Figura 3 Gráfico de combustão

Consulte a Seção 2.1 (otimização da combustão) para uma representação detalhada das correlações no gráfico de combustão.

1. O processo de combustão

1.4.3 Requisito de ar de combustão

A necessidade real de ar é calculada

- A partir do oxigênio mínimo necessário para a combustão ideal (dependendo do combustível)
- O excesso de oxigênio necessário e
- O teor relativo de oxigênio no ar.

Para ar seco sob pressão atmosférica, este é de 20,95%. Na prática, porém, o ar ambiente utilizado como ar de combustão nunca é completamente seco, o que significa que a umidade também deve ser considerada no cálculo do volume de ar para garantir um processo preciso.

1.4.4 Volume de gás, efeito de diluição, valor de referência

O ar de combustão e a umidade (vapor d'água) aumentam o volume absoluto dos gases.

A Figura 4 ilustra esse fenômeno para a combustão de 1 kg de combustível. Em condições estequiométricas, ou seja, sem excesso de ar, isso produz aproximadamente 10 m³ de gases de combustão no estado seco e 11,2 m³ no estado úmido, enquanto a mesma quantidade de combustível queimada com 25% de excesso de ar no estado úmido produz um volume de gases de combustão de 13,9 m³. Isso tem o mesmo efeito de uma diluição, que reduz as porções relativas dos constituintes dos gases de combustão! Por exemplo, o teor de SO₂ absolutamente constante é reduzido em termos relativos de 0,2 (estequiométrico, seco) para 0,18 (estequiométrico, úmido) ou 0,14 (25% de excesso de ar, úmido) e o de oxigênio de 4,4 para 4. Consulte a Tabela 8.

	Nitrogênio	Dióxido de carbono	Dióxido de enxofre	Water	Oxigênio
	N ₂	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	O ₂
Estóico/seco	83.10	16.70	0.20	-	
Estóico/molhado	74.70	14.40	0.18	10.72	
25% EA/seco	82.80	12.70	0.16	-	4.40
25% EA/úmido	75.60	11.60	0.14	8.70	4.00

Tabela 8 Composição relativa dos gases de combustão em % em diferentes condições (EA = excesso de ar)

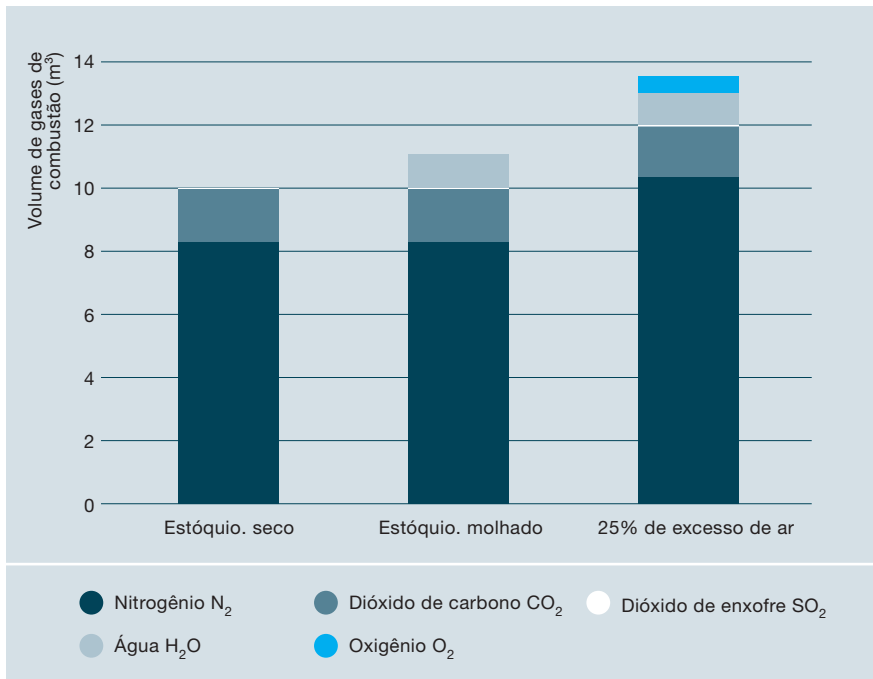


Figura 4 Efeito diluidor do teor de umidade e do excesso de ar

1. O processo de combustão

Valores de referência

A partir das correlações apresentadas, fica claro que as observações de concentração geralmente só podem ser feitas em conjunto com valores de referência. Somente então as medições têm algum significado e podem ser comparadas com outros resultados de medições, e, em particular, com os requisitos legais!

Na prática, são utilizados os seguintes:

- Referência para uma diluição específica devido ao excesso de ar; uma medida disso é o conteúdo de oxigênio, com a referência expressa, por exemplo, como "valor de referência 8% de oxigênio". Essa referência ao valor de oxigênio é padrão nas especificações de acordo com os diversos regulamentos da Lei Federal de Controle de Emissões (BlmSchV) e das Instruções Técnicas de Controle de Qualidade do Ar (TA Luft/TI Air). No entanto, também é utilizada fora desses contextos: para uma planta, o ponto de referência é definido próximo ao conteúdo de oxigênio que ocorre quando a

planta está em operação em regime estacionário.

Example from the 44th BlmSchV, § 3 - Conteúdo de Oxigênio de Referência: Os limites de emissão são baseados em um conteúdo de oxigênio nos gases de combustão de

1. 3% para plantas de combustão de porte médio que utilizam combustíveis líquidos ou gasosos;
2. 6% for medium-sized combustion plants using solid fuels;
3. 15% para plantas de turbinas a gás; e
4. 5% para plantas de motores a combustão.

- Referência para uma diluição específica devido ao conteúdo de umidade do gás; uma medida disso é a temperatura do gás, com a referência expressa, por exemplo, como "com base no gás de combustão seco" ou "a um ponto de orvalho de 4°C".
- Referência para o estado normal de um gás. Refere-se à dependência de um volume de gás dos valores reais de pressão e temperatura, consulte a Seção 3.1.1.

1.5 Gases de combustão (gases de exaustão) e sua composição

O gás de combustão gerado em processos de combustão também é denominado gás de escape. Sua composição depende do combustível e das condições de combustão, por exemplo, da razão de ar.

Muitos dos constituintes do gás de combustão são classificados como poluentes atmosféricos e, portanto, devem ser removidos do gás de combustão antes de serem liberados na atmosfera por meio de processos de limpeza, que são extremamente demorados e onerosos em alguns casos, de acordo com as regulamentações legais (consulte a Seção 2.3). O gás de combustão em sua composição original após a combustão também é chamado de gás bruto e, uma vez que tenha passado pelas etapas de limpeza, é chamado de gás limpo.

Os componentes mais importantes do gás de combustão são explicados abaixo.

Nitrogênio (N₂)

Com 79% em volume, o nitrogênio é o principal componente do ar. Este gás incolor, inodoro e sem sabor é fornecido através do ar de combustão, mas não desempenha um papel

direto no processo de combustão propriamente dito; ele atua como lastro e transportador de calor residual e é liberado de volta para a atmosfera. No entanto, partes do nitrogênio, em combinação com o oxigênio contido no combustível, contribuem para a formação dos óxidos de nitrogênio (veja abaixo).

Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é um gás incolor e inodoro, com um sabor levemente ácido, que é gerado em todos os processos de combustão e pela respiração. Devido à sua propriedade de filtrar o calor irradiado, ele é um dos principais contribuintes para o efeito estufa. O ar natural contém apenas 0,03%; a concentração máxima permitida (MAC - concentração máxima permitida) é de 0,5%; concentrações superiores a 15% no ar inalado por humanos causam perda de consciência.

Vapor d'água (umidade)

O hidrogênio contido no combustível se combina com o oxigênio para formar água (H₂O). Juntamente com

1. O processo de combustão

a água do combustível e do ar de combustão, dependendo da temperatura do gás de combustão (FT), isso é liberado como umidade de gás de combustão (em altas temperaturas de gás de combustão) ou como condensado (em baixas temperaturas de gás de combustão).

Oxigênio (O₂)

O oxigênio que não foi utilizado na combustão em caso de excesso de ar é liberado como um componente gasoso no gás de combustão e é uma medida da eficiência da combustão. Ele é utilizado para a determinação dos parâmetros de combustão e como valor de referência.

Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro, tóxico. Ele é gerado principalmente durante a combustão incompleta de combustíveis fósseis (fornalhas) e combustíveis automotivos (veículos) e outros materiais que contêm carbono. Em grandes áreas, o CO não representa um perigo significativo para os seres humanos, pois rapidamente se combina com o oxigênio no ar formando CO₂. No entanto, localmente, o CO é extremamente

perigoso, pois uma concentração de apenas 700 ppm no ar pode ser fatal para os humanos em poucas horas. O valor de MAC é 50 ppm.

Óxidos de nitrogênio (NO e NO₂, coletivamente chamados de NOx)

Nos processos de combustão, o nitrogênio do combustível e, em altas temperaturas, também o do ar de combustão, se combina até certo ponto com o oxigênio do ar, formando inicialmente o monóxido de nitrogênio NO (NO do combustível e NO térmico), que na presença de oxigênio é oxidado em uma etapa posterior para formar o dióxido de nitrogênio (NO₂) no duto de gás de combustão e depois na atmosfera. Ambos os óxidos são tóxicos; o NO₂, em particular, é um veneno respiratório perigoso e, em combinação com a luz solar, contribui para a formação de ozônio. Tecnologias complexas são utilizadas para o tratamento de gases de escape com NOx, como o processo SCR. Medidas combustivas especiais, como o fornecimento graduado de ar, são utilizadas para reduzir os óxidos de nitrogênio já na combustão.

¹ SCR ou Redução Catalítica Seletiva é o nome de uma tecnologia usada para tratamento de gases de escape, que usa ureia para converter óxidos de nitrogênio (NOx) em vapor de água e nitrogênio.

Dióxido de enxofre (SO₂)

O dióxido de enxofre é um gás incolor e tóxico com um cheiro pungente. Ele é produzido como resultado da oxidação do volume maior ou menor de enxofre contido no combustível. O valor de MAC é 5 ppm. Em combinação com água ou condensado, são produzidos o ácido sulfuroso (H₂SO₃) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄), ambos ligados a diferentes tipos de danos ambientais à vegetação e às construções. Sistemas de dessulfurização de gases de combustão (FGD) são usados para reduzir os óxidos de enxofre.

Sulfeto de hidrogênio (H₂S)

O sulfeto de hidrogênio é um gás tóxico e extremamente malcheiroso, mesmo em concentrações muito baixas (aproximadamente 2,5 µg/m³). Ele é um constituinte natural do gás natural e do petróleo e, portanto, está presente em refinarias e plantas de processamento de gás natural, mas também em curtumes, negócios agrícolas e, por último, mas não menos importante, devido

à combustão incompleta em conversores catalíticos de veículos. Além do metano, as bactérias em plantas de biogás também produzem sulfeto de hidrogênio. Inicialmente, isso não representa um problema para a planta de biogás. No entanto, o sulfeto de hidrogênio ataca o equipamento, causando depósitos no motor e no trocador de calor dos gases de escape, por exemplo. O sulfeto de hidrogênio deve, portanto, ser removido do biogás (por exemplo, dessulfurização com hidróxido de ferro ou ferro orgânico). Métodos para eliminar o H₂S dos gases de escape incluem combustão para SO₂, processos específicos de absorção ou, para grandes quantidades, conversão em enxofre elementar em uma planta Claus.

² THC = Hidrocarbonetos Totais

1. O processo de combustão

Hidrocarbonetos (C total, THC ou CxHy)

Os hidrocarbonetos são um extenso grupo de compostos químicos compostos exclusivamente por carbono e hidrogênio.

Os hidrocarbonetos são as substâncias mais importantes na química orgânica; eles ocorrem naturalmente no petróleo, gás natural ou carvão. Os hidrocarbonetos podem ser emitidos tanto quando produtos à base de hidrocarbonetos são fabricados (por exemplo, em refinarias) quanto quando são usados e descartados (solventes, plásticos, tintas, combustíveis, resíduos, etc.). Fontes de emissões de hidrocarbonetos incluem principalmente a combustão incompleta, que abrange incêndios florestais, incêndios em pastagens e até atividades como fumar. Em motores a gás, componentes de CH₄ podem estar presentes nos gases de escape devido à combustão incompleta. Nesse caso, é denominado o chamado vazamento de metano (CH₄) (veja a Seção 4.1.8). Os hidrocarbonetos contribuem significativamente para o efeito estufa.

Hidrogênio cianido (HCN)

O hidrogênio cianido (também conhecido como ácido cianídrico) é um líquido altamente tóxico com um ponto de ebulição de 25,6°C; ele existe nos gases de combustão, se presente, em forma gasosa. O HCN pode existir em plantas de incineração de resíduos.

Amônia (NH₃)

A amônia desempenha um papel nos gases de combustão em conjunto com o processo SCR para desnitrificação dos gases de combustão. Nos reatores de desnitrificação, é adicionada ao gás de combustão em quantidades precisamente dosadas, causando a conversão dos óxidos de nitrogênio em nitrogênio e água. O restante não reagido (vazamento de amônia) é significativamente reduzido pelas etapas de purificação subsequentes e normalmente é igual ou inferior a 2 mg/m³ (aproximadamente 3 ppm) no gás limpo.

Halogenetos de hidrogênio (HCl, HF)

Durante a combustão de carvão e/ou resíduos, podem se formar os halogenetos de hidrogênio HCl e HF, que formam ácidos agressivos em combinação com atmosferas úmidas. Essas substâncias são amplamente lavadas do gás de combustão pelas plantas de limpeza de gases de combustão (lavadores).

Formaldeído (HCHO)

O formaldeído é produzido como um produto intermediário durante a combustão do metano. Embora a maior parte do formaldeído seja queimada, uma porção pode permanecer em espaços mortos dentro da câmara de combustão do motor, particularmente devido às relativamente baixas temperaturas das paredes do cilindro. Melhorias no design da câmara de combustão podem reduzir significativamente esses espaços mortos, o que, por sua vez, leva a menores emissões de formaldeído. Ao mesmo tempo, os catalisadores de oxidação foram aprimorados para melhorar sua taxa de conversão de formaldeído e sua vida útil. Todo o sistema, incluindo o motor e o catalisador, foi otimizado para garantir que o limite de emissão de formaldeído

de 20 mg/m³ seja mantido de forma confiável durante a operação. Em combinação com a tecnologia SCR, essas baixas emissões são ainda mais estabilizadas.

De acordo com o Regulamento da União Europeia nº 1272/2008, o formaldeído foi classificado como carcinogênico, levando a uma redução nos limites de emissão para este poluente, com base na recomendação da Associação Federal e Estadual para Controle de Emissões. Esses limites revisados foram incorporados na nova Ordem de Controle de Emissões da Alemanha (BlmSchV), reduzindo-os em relação aos valores estabelecidos em 2016.

Sólidos (poeira, fuligem)

Os poluentes sólidos no gás de combustão vêm dos componentes não combustíveis dos combustíveis sólidos e líquidos. Estes incluem, por exemplo, os óxidos de silício, alumínio, cálcio etc., no caso do carvão e os sulfatos de várias substâncias no caso do óleo combustível pesado. O efeito prejudicial da poeira nos seres humanos deve-se principalmente ao acúmulo de substâncias tóxicas e cancerígenas nas partículas de poeira.

1. O processo de combustão

1.6 Valor calorífico bruto, valor calorífico líquido, eficiência, perda de gases de combustão

Valor calorífico bruto

O valor calorífico bruto (anteriormente referido como o valor calorífico líquido superior) é um valor característico para o combustível e se refere à energia liberada durante a combustão completa em relação à quantidade de combustível utilizada. O valor calorífico líquido (anteriormente referido como o valor calorífico inferior), por outro lado, é a energia liberada menos o calor de evaporação do vapor d'água gerado durante a combustão a 25 °C, novamente em relação à quantidade de combustível utilizada. Basicamente, o valor calorífico líquido é menor que o valor calorífico bruto.

Caldeira de condensação

As caldeiras de condensação são caldeiras que, além do calor da combustão, também aproveitam o calor de condensação dos gases de combustão por meio de trocadores de calor. De acordo com as especificações do fabricante, essas caldeiras podem alcançar uma eficiência térmica de 102 a 108 por cento com base no valor calorífico líquido. No entanto, o condensado gerado e contaminado com poluentes deve ser descartado de maneira ambientalmente correta.

Eficiência de uma combustão

A eficiência é uma variável determinada a partir de valores de desempenho enquanto a planta está em operação estacionária.

A eficiência é a razão entre a energia total fornecida à câmara de combustão e a energia necessária ou utilizada para realizar o processo (aquecimento, fusão, sinterização, etc.). A eficiência é composta por vários componentes:

- A eficiência de combustão descreve a proporção da potência total fornecida (energia por unidade de tempo) em relação à potência utilizável disponível na câmara de combustão após a combustão. Isso a torna um fator importante para a qualidade da combustão.
- A eficiência do forno, que depende em grande parte do seu design, descreve a qualidade do forno e a operação por meio da relação entre a energia fornecida e a energia disponível no forno.
- A eficiência total é obtida multiplicando as eficiências de combustão e do forno.

Balço energético de uma planta de combustão

Em modo de operação estacionária, a soma de todas as energias fornecidas à planta deve ser igual à soma das energias entregues pela planta; consulte a Tabela 9.

Energias fornecidas	Energias descarregadas
Valor calorífico líquido e energia tangível do combustível	Calor tangível e energia quimicamente ligada dos gases de combustão (perda de gases de combustão)
Calor tangível do ar de combustão	Calor tangível e valor calorífico líquido de resíduos de combustível em cinzas e escórias
Equivalente térmico da energia mecânica convertida na instalação	Perdas de superfície como resultado da condução de calor
Calor trazido através do produto	Calor dissipado com o produto
	Perdas por convecção devido a vazamentos no forno

Tabela 9 Contribuições para o equilíbrio energético

A principal contribuição para a perda é a perda de gases de combustão. Ela depende da diferença entre a temperatura dos gases de combustão e a temperatura do ar de combustão, da concentração de O₂ ou CO₂ nos gases de combustão, bem como de fatores específicos do combustível (Tabela 10). Em caldeiras de condensação, essa perda de gases de combustão é reduzida de duas maneiras – através da utilização do calor de condensação e pela consequente redução da temperatura dos gases de combustão.

A perda de gases de combustão pode ser calculada usando as seguintes fórmulas:

$$q_A = \left[(FT-AT) \times \left[\frac{A_2}{(O_{2ref}-O_2)} + B \right] \right] - Kk$$

$$q_A = (FT-AT) \times \left(\frac{A_1}{CO_2} \right) + B$$

FT: Temperatura dos gases de combustão

AT: Temperatura do ar de combustão

A1, A2, B: Fatores específicos do combustível (veja a Tabela 10)

O_{2ref}: Conteúdo de oxigênio do ar (tipicamente 21 vol.%)

O₂: Concentração medida de O₂ [vol.%]

Kk: Variável que mostra o valor variável qA como um valor negativo se o ponto de orvalho for atingido. O valor calculado para contabilizar o calor de condensação recuperado quando o ponto de orvalho é atingido (necessário para medições em caldeiras de condensação).

CO₂: Conteúdo de dióxido de carbono medido no gás de exaustão [vol.%]

1. O processo de combustão

Para combustíveis sólidos, o fator B é igual a zero, e a fórmula se simplifica para:

$$qA = \left[(FT-AT) \times \frac{A2}{(O_{2ref}-O_2)} \right] - Kk$$

$$qA = (FT-AT) \times \frac{A1}{CO_2}$$

Os fatores específicos do combustível usados nas fórmulas estão compilados abaixo para combustíveis selecionados.

Combustível	CO _{2max} [vol.%]	A1	A2	B
Óleo combustível EL	15.40	0.50	0.6800	0.0070
Diesel	15.50	-	0.6790	0.0069
Óleo combustível pesado	15.90	-	0.8060	-
Gás natural	11.90	0.37	0.6600	0.0090
GLP	13.70	0.42	0.6300	0.0080
Coque	20.30	-	0.7650	-
Briquetes	18.90	-	0.8330	-
Lignite	19.80	-	0.9550	-
Carvão duro	20.50	-	0.7580	-
Gás para coqueria	10.30	0.29	0.6000	0.0110
Gás urbano	13.60	0.35	0.6300	0.0110
Madeira 15%	20.30	-	0.6860	0.0096
Madeira 30%	20.30	-	0.6640	0.0118
Madeira 45%	20.30	-	0.6340	0.0150

Tabela 10 Fatores específicos do combustível

Note

Os fatores específicos do combustível podem ser determinados pela Testo, sob solicitação, com base na análise

elementar ou análise de substâncias (para gases).

1.7 Ponto de orvalho, condensado

Ponto de orvalho

O ponto de orvalho ou temperatura de ponto de orvalho de um gás refere-se à temperatura na qual a umidade contida no gás passa do estado gasoso para o estado líquido, como mostrado na Figura 5. Essa transição é chamada de condensação, e o líquido que ela produz é chamado de condensado. Abaixo do ponto de orvalho, o vapor d'água está no estado líquido, e acima do ponto de orvalho está no estado gasoso; um exemplo disso é a formação e evaporação de névoa ou orvalho à medida que a temperatura muda. O conteúdo de umidade determina a temperatura do ponto de orvalho:

O ar com 30% de umidade (a 50°C) tem um ponto de orvalho de aproximadamente 27,6°C, enquanto o ar mais seco, com apenas 10% de umidade, tem um ponto de orvalho em torno de 10°C.

Note:

Se as medições forem feitas com um instrumento sem condicionamento de gás, a temperatura do ponto de orvalho do gás será aproximadamente igual à temperatura ambiente, por exemplo, 25°C.

Se essas leituras forem comparadas com valores medidos com uma unidade de condicionamento de gás, ou seja, temperatura de ponto de orvalho de 5°C, por exemplo, a diferença resultante nas leituras devido ao conteúdo de umidade diferente é de aproximadamente 3%!

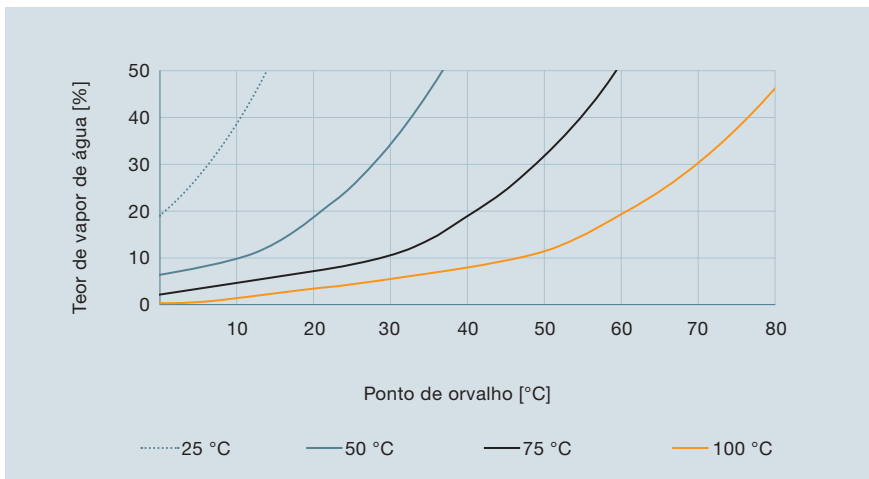


Figura 5 Teor de vapor de água em função do ponto de orvalho em diferentes temperaturas ambientes (pressão atmosférica 1013 mbar).

1. O processo de combustão

Linhas aquecidas, resfriadores de gás de medição

Os gases de combustão com 8% de umidade, por exemplo, têm um ponto de orvalho de cerca de 40°C, o que significa que o condensado se forma abaixo dessa temperatura. Isso tem duas consequências importantes para a planta como um todo, bem como para os equipamentos de medição:

- Se o gás de combustão contiver dióxidos de enxofre, por exemplo, a temperaturas abaixo de 40°C (por exemplo, em tubos não aquecidos), esses se combinam com o vapor d'água condensado para formar ácido sulfuroso (H_2SO_3) ou ácido sulfúrico (H_2SO_4), ambos altamente corrosivos e que podem causar danos significativos aos componentes do sistema com os quais entram em contato. Por essa razão, a temperatura dos gases de combustão no sistema é mantida acima do ponto de orvalho (neste exemplo, acima de 40°C) até que os gases de combustão cheguem ao depurador. O mesmo se aplica aos componentes dos instrumentos de medição que estão expostos aos gases de combustão, e especialmente às partes do sistema de amostragem, como a sonda e as mangueiras. Por isso, são utilizadas

sondas aquecidas e linhas de medição de gás, e sua temperatura é mantida acima do ponto de orvalho do gás. Não observar essa medida resultará em danos aos instrumentos de medição e medições incorretas!

- O método recém-desenvolvido e patenteado pela Testo, que combina uma velocidade de fluxo de gás particularmente alta com uma superfície especialmente revestida das linhas de gás de medição, oferece uma alternativa adicional para prevenir a formação de condensado. Como resultado, não é mais necessário aquecer as linhas, o que é extremamente importante para dispositivos móveis, considerando a redução no consumo de energia.

O vapor d'água está ausente nos gases de combustão resfriados em maior ou menor grau, dependendo da temperatura à qual o gás é resfriado, o que resulta no fato de que os outros componentes do gás, como o CO, que não mudaram quantitativamente, formam uma maior parte relativa dos gases de combustão; as leituras

correspondentes serão então mais altas do que nos gases de combustão úmidos! Para leituras comparáveis, o respectivo gás de medição deve, portanto, ter as mesmas temperaturas e, portanto, o mesmo conteúdo de umidade. Como consequência, os resfriadores de gás de medição (também poderiam ser chamados de secadores de gás de medição) são usados na análise de gás antes do analisador; eles trazem o gás para uma temperatura definida e, portanto, um nível definido de secagem e mantêm-no lá.

Note

- Gás resfriado significa gás seco.
- No gás seco, as leituras dos componentes do gás são comparativamente mais altas do que no gás úmido.

Os instrumentos da Testo utilizam o que é conhecido como um resfriador Peltier para resfriamento do gás de medição, cuja função se baseia no fato de que a interface entre dois tipos diferentes de metais aquece ou resfria dependendo da direção do fluxo de corrente. Esse resfriador pode resfriar o gás de medição no testo 350 para +3°C e mantê-lo constante.

Os resfriadores de permeação, que também são comuns no mercado, têm a desvantagem de não poderem manter um ponto de orvalho definido; além disso, são suscetíveis ao entupimento por partículas de poeira, o que leva ao aumento dos custos com peças de reposição.

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão

A análise de gases (ou seja, a tecnologia de medição para determinar a composição dos gases) é uma ferramenta indispensável para garantir uma gestão econômica e segura dos processos em praticamente todas as áreas da indústria. O foco está nos processos de combustão, embora este seja um termo genérico que abrange uma grande quantidade de processos diferentes.

Na Figura 6, a progressão de um processo de combustão é apresentada em seções, começando (à esquerda) com a entrada de combustível e ar de combustão em uma câmara de combustão, passando pela combustão propriamente dita e pelos diversos processos gerados por ela, até a limpeza dos gases de exaustão e, finalmente, a medição de emissões.



Figura 6: Variedade e estágios dos processos de combustão

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

A análise de gases fornece informações sobre a composição dos gases de combustão e dos gases de exaustão em todas as etapas dessa cadeia de processos. Isso a torna uma ferramenta indispensável para a operação econômica e segura de plantas que cumprem as regulamentações oficiais e, ao mesmo tempo, para garantir a qualidade e eficiência da produção.

Os analisadores de gases são oferecidos por diversos fabricantes em diferentes modelos e com base em uma variedade de princípios de medição; mais detalhes podem ser encontrados na Seção 3 deste Guia.

Os analisadores de gases da Testo são amplamente utilizados na indústria para analisar gases de combustão, e não se limitam apenas ao monitoramento de emissões. Com um certo grau de sobreposição, as seguintes áreas de aplicação podem ser diferenciadas:

1. Trabalho de ajuste e manutenção para monitoramento geral, por exemplo, após a manutenção da planta, para resolução de problemas em caso de processos instáveis, em preparação para medições oficiais, após reparos, etc.

2. Medições de processo para otimização da combustão de combustível, ar de combustão, queimadores e na câmara de combustão, com o objetivo de economizar combustível, melhorar a eficiência e prolongar a vida útil do sistema. Essas aplicações também estão relacionadas às medições de emissões (pontos 4 e 5 abaixo), pois a combustão otimizada geralmente também resulta em uma redução nos níveis de emissão.

3. Medições de processo para monitoramento de uma atmosfera gasosa definida em caldeiras ou em câmaras de combustão ou fornos especiais durante processos como queima, torrefação, tratamento de superfícies, etc.

4. Medições de processo e emissões para monitoramento de equipamentos de limpeza de gases de exaustão para garantir que estejam funcionando corretamente.

5. Medições de emissões para monitoramento da conformidade com os valores limites de poluentes nos gases de exaustão antes ou na chaminé.

2.1 Análise de gases para otimizar a combustão

Contribuições importantes para a otimização da combustão são feitas por:

- A composição do combustível e do ar de combustão (campo de aplicação da análise de gases)
- O comportamento da ignição e a temperatura de combustão
- O design do queimador e da câmara de combustão, bem como
- A relação combustível/ar de combustão (campo de aplicação da análise de gases).

A relação ótima entre combustível e ar de combustão (razão de ar λ) para uma planta determinada e um combustível específico pode ser determinada a partir das leituras de análise de gases usando o gráfico de combustão (ver Figura 7). Aqui, as progressões de concentração dos componentes gasosos CO , CO_2 e O_2 são mostradas em relação à razão de ar.

A linha de combustão ideal com 0 de excesso de ar está localizada em uma razão de ar $\lambda = 1$. Para a direita, o excesso de ar aumenta, enquanto à esquerda está a faixa de deficiência de

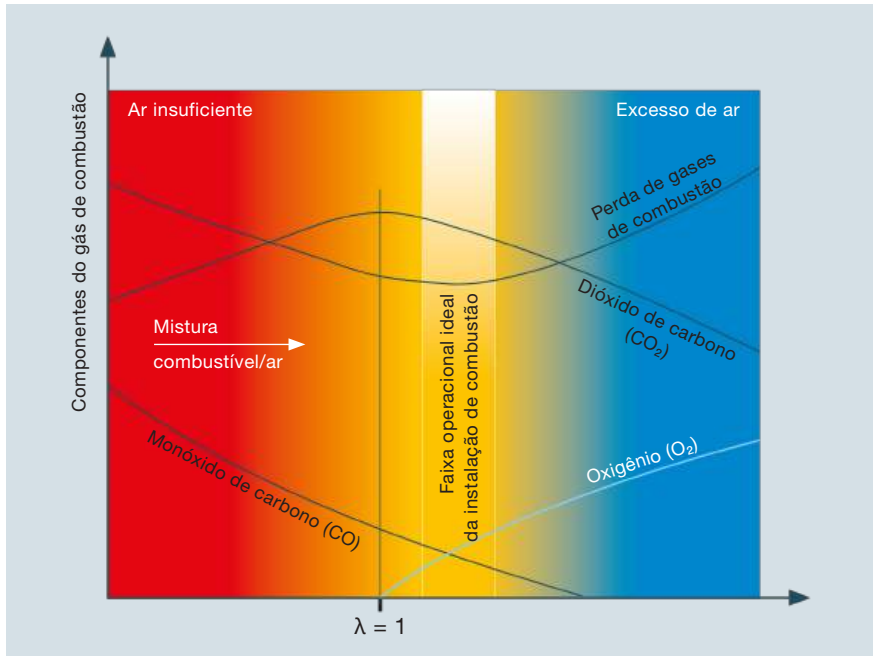


Figura 7 Gráfico de combustão

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

ar crescente (ar insuficiente também significa oxigênio insuficiente!). As progressões de concentração mostradas fornecem as seguintes informações:

Área à esquerda, em $\lambda < 1$ (ar insuficiente):

- Ar insuficiente significa que o CO está presente, pois não há oxigênio suficiente para a oxidação completa do CO a CO₂. Devido à sua toxicidade, o CO presente em caso de ar insuficiente é extremamente perigoso quando vaza da planta!
- À medida que a deficiência de ar diminui, ou seja, a concentração de O₂ aumenta, a concentração de CO diminui devido à sua oxidação para CO₂, e a concentração de CO₂ aumenta de acordo. Esse processo é completado em ou logo acima de $\lambda = 1$, onde o CO se aproxima de zero e o CO₂ atinge seu valor máximo.
- O oxigênio não está presente nesta faixa ou não é mensurável, pois qualquer oxigênio adicionado é imediatamente utilizado para oxidar o CO.

Área à direita, em $\lambda > 1$ (excesso de ar):

Na faixa $\lambda > 1$, o O₂ aumenta porque o oxigênio fornecido pelo excesso de ar

não é mais consumido pela oxidação devido à falta de CO. Na prática, no entanto, sempre é necessário um certo excesso de ar para garantir uma combustão completa, pois a distribuição de oxigênio pela câmara de combustão não é uniforme. O tamanho das partículas do combustível também é significativo: quanto menor a partícula, mais intenso é o contato com o oxigênio e menos excesso de ar é necessário.

O CO₂, por outro lado, diminui novamente em relação ao seu valor máximo em $\lambda = 1$, mas não devido a uma reação química, e sim como um efeito de diluição causado pelo aumento da quantidade de ar de combustão, que praticamente não contribui com CO₂.

Conclusão

A combustão ótima é alcançada quando há oxigênio suficiente para que todo o CO seja queimado (faixa $\lambda = 1,0$ a aproximadamente 1,3), mas ao mesmo tempo o excesso de ar é limitado, para que a menor quantidade possível de gases de exaustão quentes e, portanto, de energia térmica, seja perdida na atmosfera devido a quantidades desnecessariamente altas de excesso de ar.

A faixa λ otimizada para a energia de uma planta de combustão (isso também depende de dados específicos da planta) pode ser determinada medindo-se os dois componentes CO_2 e CO (o CO_2 sozinho é ambíguo devido à progressão da curva até um máximo!) ou medindo-se apenas o O_2 . Esta última opção de medir O_2 é amplamente utilizada atualmente. Dependendo da planta e de seu operador, os pontos de medição ou amostragem de gases podem ser localizados em vários pontos da câmara de combustão. As correlações entre razão de ar, excesso de ar e o conteúdo típico de oxigênio em gases de exaustão secos, mostradas no diagrama, estão descritas em figuras na Tabela 11 para a combustão de carvão mineral.

Proporção de ar λ	Excesso de ar [%]	Teor de oxigênio [%]
0.9	Ar insuficiente	Oxigênio insuficiente
1	0	0
1.1	10%	2.0%
1.2	20%	3.5%
1.3	30%	4.8%
1.4	40%	6.2%

Tabela 11 Correlação entre o excesso de ar e o teor de oxigênio nos gases de combustão secos de uma instalação de combustão a carvão mineral

Relevância econômica

Além de reduzir as emissões, o principal objetivo de otimizar a combustão operando uma planta com a quantidade mais eficiente, ou seja, geralmente a menor quantidade possível de excesso de ar, é cortar custos por meio da economia de combustível.

Uma regra prática, comum na prática e documentada na literatura, afirma que ao diminuir o oxigênio excedente em um ponto percentual (não 1% relativo!), ou seja, de 4,5% para 3,5%, por exemplo, a eficiência de uma planta de combustão pode ser aumentada em 1% e os custos com combustível podem ser reduzidos proporcionalmente.

Por exemplo, com custos mensais de combustível de $\$15$ milhões para uma planta de médio porte, isso resulta em uma economia mensal de $\$30.000$ se, por meio da análise de gases, a operação regular da planta puder ser implementada com apenas 0,2% de excesso de ar a mais próxima do valor ótimo do que antes! Economias semelhantes são possíveis se desvios de curto prazo das condições ótimas de operação puderem ser detectados e corrigidos precocemente com o uso da análise de gases.

2.2 Análise de gases para controle de processos

2.2.1 Instalação de combustão de processo para processos de combustão

Em contraste com as plantas de combustão convencionais (sistemas de caldeiras), os aquecedores de processo apresentam contato direto entre o forno ou os gases de combustão quentes e um material submetido a tratamento térmico, iniciando uma série de etapas do processo. A produção de clínquer de cimento ilustra isso, como exemplo de outros processos semelhantes (consulte a Figura 8, Seção 4.3.1 para detalhes):

- O material bruto úmido é triturado e seco com gases quentes de exaustão.
- A mistura crua separada é aquecida a aproximadamente 800°C por gás quente à medida que se move para baixo no fluxo em contracorrente.
- No calcineiro, o CO₂ é expulso da mistura crua a aproximadamente 950°C por meio de um processo de combustão em várias etapas (o material é desacidificado).
- A mistura crua, juntamente com aditivos, é queimada (sintrada) no forno a cerca de 1400°C.

GA análise de gás permite avaliar essas etapas do processo com relação

ao ar em excesso, calcular fluxos de ar falso e balancear separadamente os componentes individuais da planta. Isso é importante, por exemplo, para o calcineiro (medição de CO₂ e O₂), pois uma calcinação inadequada pode causar prejuízos significativos no funcionamento do forno. Em processos desse tipo, substâncias podem passar do produto sendo processado para os gases de exaustão, aumentando as emissões usuais geradas pela planta de combustão. Em certos casos, no entanto, poluentes podem ser transferidos dos gases para o produto processado ou para substâncias especialmente designadas (escória).

Um exemplo disso é a indústria de cimento ou cal, onde o enxofre no combustível se torna um componente do produto como óxido de enxofre no processo de combustão. De forma inversa, durante a produção de vidro ou tijolos, os óxidos de enxofre são liberados do produto sendo queimado, aumentando consideravelmente a concentração de gases de exaustão. O mesmo se aplica ao aumento das emissões de CO em processos operados contracorrentemente ao material de entrada e gás de exaustão (por

exemplo, em fornos rotativos).

Em zonas distantes do forno, pode haver oxigênio insuficiente, resultando em combustão incompleta com aumento da concentração de CO. Metais pesados podem ser integrados à carga do incinerador (cimento, cal) ou liberados dessa carga para os gases de exaustão (indústria metalúrgica,

produção de vidro).

Por meio de medidas relacionadas ao processo, como o design da câmara do forno, condução da chama, carga do incinerador e temperatura da câmara do forno, fornecimento de ar de combustão, etc., as emissões relacionadas ao processo podem ser amplamente reduzidas.

A análise de gás fornece as informações necessárias para alcançar isso.

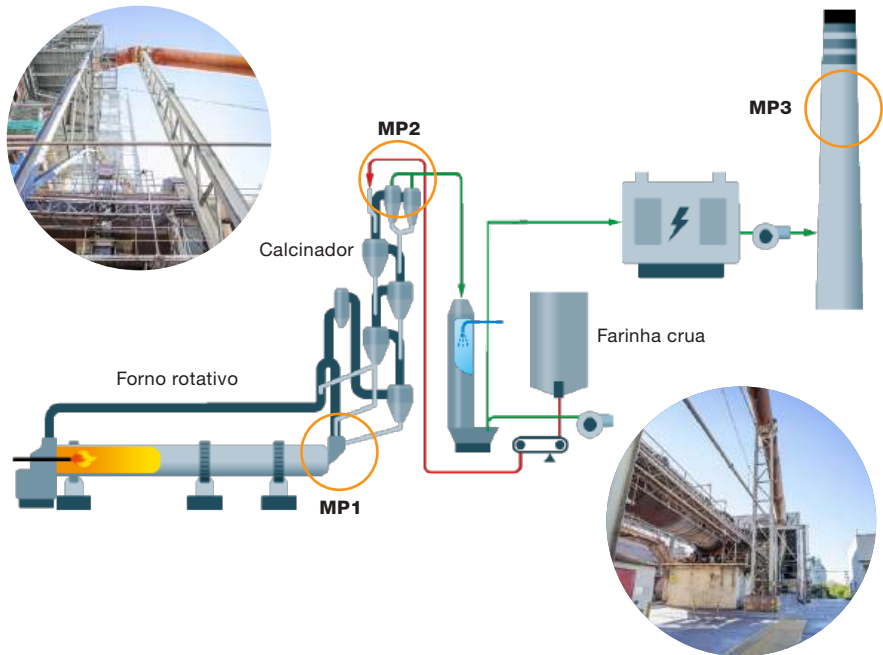


Figura 8 Representação esquemática de uma planta de cimento com pontos de medição (MP) típicos para utilização de analisadores

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

2.2.2 Fornalhas industriais

O termo “planta de combustão industrial” refere-se a plantas de combustão usadas na indústria para gerar vapor e água quente ou aquecer outros meios de transferência de calor. Isso inclui também plantas de combustão para conversão de materiais, como em refinarias ou plantas de coqueificação, por exemplo. A potência térmica das plantas de combustão industriais geralmente está na faixa de megawatts. Na Alemanha, por exemplo, a 44ª Ordem de Controle de Emissões Federal (BImSchV) se aplica a plantas de combustão, turbinas a gás e motores de combustão interna de médio porte, com uma potência térmica nominal de pelo menos 1 megawatt e menos de 50 megawatts, enquanto a 13ª BImSchV se aplica a grandes plantas de combustão, turbinas a gás e motores de combustão interna com potência térmica nominal de 50 megawatts ou mais.

Aqui, as tarefas de análise de gás estão relacionadas à otimização da combustão, controle da limpeza dos gases de exaustão e monitoramento dos valores limite.

2.2.3 Tratamento de superfície termoquímico

Este é um processo de tratamento térmico que altera a composição química de uma peça ou sua superfície por meio da difusão de certos elementos para dentro ou para fora da atmosfera gasosa ao redor. Ele é utilizado principalmente para endurecer o aço, mas também para queimar vidros e tintas na indústria cerâmica. Esses processos usam quase exclusivamente gás como meio de tratamento (em raros casos, pó também) e são caracterizados pela natureza e concentração dos elementos difusos (por exemplo, nitrogênio para nitratação, cromo para cromagem) e pelas temperaturas do processo (aproximadamente 400 - 1100°C). Fornos de fluxo contínuo e de batelada vêm em uma ampla gama de designs diferentes. Em todos os casos, a análise de gás é necessária tanto para a operação ótima da planta (redução de custos e segurança) quanto para o monitoramento da atmosfera gasosa específica do processo (qualidade do produto, incluindo documentação de acordo com a ISO 9000 ff.). Os componentes mais importantes para análise são O₂, CO, CO₂ e SO₂. Consulte o exemplo de aplicação na Seção 4.4.6.

2.2.4 Medidas de segurança

As aplicações de análise de gás também podem incluir medições usadas para proteger o pessoal e as plantas. Isso se refere a gases tóxicos, mas principalmente a gases inflamáveis e explosivos, especialmente o monóxido de carbono CO.

Em silos de poeira de carvão e plantas de pulverização de carvão, por exemplo, o monitoramento de CO permite detectar precocemente os riscos de combustão lenta e prevenir a formação de misturas de gases explosivos em precipitadores eletrostáticos. O mesmo se aplica ao monitoramento de plantas quanto às concentrações perigosas de metano ou outros gases explosivos, particularmente em plantas químicas.

Limites de Explosão

Misturas de substâncias combustíveis com ar ou oxigênio são inflamáveis em certas proporções de concentração. Existe um limite inferior e superior de explosão (LEL e UEL) para cada mistura. Esses valores dependem de pressão e temperatura; eles indicam a proporção do componente combustível para am-

bos os limites a uma temperatura e pressão específicas (geralmente 20°C e 1 bar) em $[\text{vol.}\%]$ ou $[\text{g}/\text{m}^3]$. Entre os dois limites está o intervalo de ignição ou explosão, como mostrado na Figura 9 e na Tabela 12.

Substâncias inflamáveis	Formula	Limites de inflamabilidade no ar em vol.% para T=20 °C e p=1 bar	
		lower	upper
Amônia	NH ₃	15.0	28.0
Monóxido de carbono	CO	12.5	74.0
Hidrogênio	H ₂	4.0	75.6
Metano	CH ₄	5.0	15.0
Propano	C ₃ H ₈	2.1	9.5
Butano	C ₄ H ₁₀	1.5	8.5
Acetileno	C ₂ H ₂	1.5	82.5

Tabela 12 Limites de explosão de gases com-

Para a análise de misturas de gás para componentes combustíveis, utiliza-se o princípio de medição do efeito térmico (consulte a Seção 3.2.2), que, no entanto, determina a soma de todos os componentes combustíveis. Ao monitorar uma mistura para seu limite inferior de explosão (LEL), o intervalo de medição do instrumento deve, portanto, ser baseado no componente com o LEL mais baixo.



Figura 9 Representação esquemática da zona de risco de explosão

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

2.3 Análise de gases para verificação de emissões

Em muitos países, diversos tipos de instalações industriais (grandes usinas de energia, siderúrgicas, fábricas de cimento, fábricas de vidro, indústrias químicas e muitas outras) e instalações de autoridades locais, até mesmo pequenos sites de produção, estão sujeitos a regulamentações rigorosas que governam as emissões de gases de exaustão na atmosfera. Medidas ade-

quadas devem ser tomadas para garantir e verificar regularmente que os componentes definidos como poluentes não ultrapassem determinados valores-limite nos gases de exaustão. Cada país criou leis e regulamentações extensas para este fim; na Alemanha, existe a Lei Federal de Controle de Emissões (BlmSchG), enquanto nos EUA, sua contraparte é a Lei do Ar Limpo (Clean Air Act). A Figura 10 mostra como as diretivas europeias são implementadas nas leis e regulamentações nacionais na Europa.

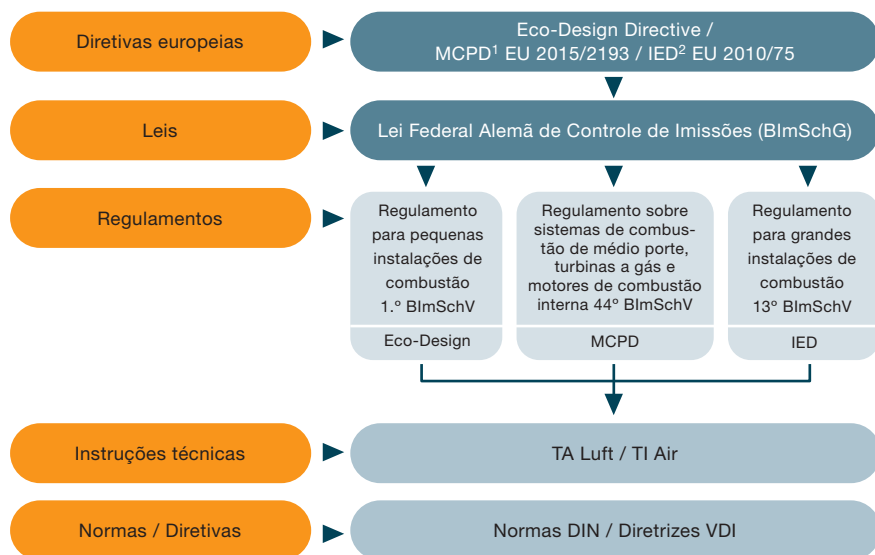


Figura 10 Implementação de diretivas europeias em regulamentações nacionais na Alemanha

A análise de gás desempenha um papel crucial na implementação e monitoramento das medidas necessárias para limitar as emissões.

¹ MCPD = Diretiva de Plantas de Combustão Média

² IED = Diretiva de Emissões Industriais

Emissão

São os poluentes do ar, ruídos, vibrações, calor, etc., que saem de uma planta (fonte).

Imissão

São os poluentes do ar, ruídos, vibrações, etc., que afetam pessoas, animais, plantas, solo, edifícios, etc.

2.3.1 Estrutura legal para emissões/imissões em a República Federal da Alemanha

A estrutura legal para todas as regulamentações de proteção ambiental na Alemanha é composta por:

- A Lei Federal de Controle de Imissões da Alemanha (BImSchG) para a proteção do meio ambiente na versão de 2024; e com base nisso

- Numerosas regulamentações legais (Regulamento Federal de Controle de Imissões da Alemanha (BImSchV)) para implementar esta lei e, por fim,
- O TI Air, que contém diretrizes técnicas específicas para autoridades com requisitos específicos sobre a aprovação e monitoramento de instalações de acordo com a 4ª BImSchV.

Atualmente (em 2024), existem 35 ordens legais em vigor.

A Tabela 13 oferece uma seleção dessas ordens, com cinco conjuntos de regulamentações especialmente relevantes para sistemas de combustão destacados.

1° BImSchV	Regulamento sobre pequenas e médias instalações de combustão
4° BImSchV	Regulamento sobre instalações que necessitam de licença
9° BImSchV	Regulamento do procedimento de aprovação
10° BImSchV	Regulamento sobre a qualidade e rotulagem de combustíveis
11° BImSchV	Regulamento sobre declarações de emissões
13° BImSchV	Regulamento sobre grandes instalações de combustão, turbinas a gás e instalações de motores de combustão interna
17° BImSchV	Regulamento sobre a incineração e coincineração de resíduos (utilização térmica)
27th BImSchV	Regulamento sobre instalações de cremação
44° BImSchV	Regulamento sobre instalações de combustão de médio porte, turbinas a gás e instalações com motores de combustão interna

Tabela 13 Regulamentos sob a Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (seleção)

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

TI Air vs. BImSchVs:

O TI Air (Instruções Técnicas sobre Controle da Qualidade do Ar) e as regulamentações da Lei Federal de Controle de Emissões da Alemanha (BImSchG) são componentes-chave

da legislação ambiental alemã e visam proteger o meio ambiente, especialmente a qualidade do ar. Ambos desempenham papéis diferentes dentro do quadro regulatório de controle de emissões. Aqui estão as principais diferenças:

	TI Air	Portarias da Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG)
Natureza jurídica	A TI Air é uma diretriz administrativa emitida com base na Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG). Não se trata de uma regulamentação estatutária, mas sim de uma diretriz técnica para as autoridades.	As portarias são juridicamente vinculativas e têm força de lei. São emitidas pelo governo federal e fazem parte da lei formal.
Foco no conteúdo	<ul style="list-style-type: none"> • A TI Air especifica os requisitos da Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG), especialmente para instalações industriais. • Ela especifica os limites de emissão e contém requisitos para limitar a poluição do ar de fontes industriais. • A TI Air também regulamenta os procedimentos de medição e monitoramento de emissões. 	<p>As portarias da Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG) abrangem uma ampla gama de normas, indo além do mero controle da qualidade do ar. Exemplos incluem as portarias para a implementação da Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV). Elas abrangem diversas áreas, como proteção contra ruído, controle da qualidade do ar, manuseio de substâncias perigosas e conservação de energia. Consulte a Tabela 13.</p> <p>Cada portaria possui disposições específicas para diferentes tipos de instalações e atividades.</p>
Área de aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Aplica-se principalmente a instalações que exigem uma licença nos termos da Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG). • É direcionado às autoridades de licenciamento e supervisão, bem como aos operadores das instalações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os regulamentos aplicam-se a uma ampla gama de instalações e atividades que podem ter impactos ambientais. • São direcionados tanto a empresas industriais e comerciais quanto às autoridades responsáveis.

Tabela 14 Comparação entre TI Air e Regulamentos da Lei Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchG)

Valores e Limites de Emissão

- Valores de Emissão são padrões abaixo da natureza vinculativa dos limites de emissão; eles são definidos para controle de qualidade do ar no TI Air. Estes são definidos como valores "cujo excedente pode ser evitado aplicando tecnologia de ponta".
- Limites de Emissão são padrões de emissão com força de lei, tornando-os diretamente vinculativos para os afetados. Tais valores são definidos, entre outros, na 1ª BImSchV (Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha), assim como na 13ª, 17ª, 27ª e 44ª BImSchV.

2.3.2 Disposições da Lei Federal de Controle de Emissões (BImSchG) na Alemanha (seleção) Regulamento sobre plantas de combustão de pequeno porte (1ª Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha (BImSchV))

Este regulamento se aplica a todas as plantas de combustão que não exigem licença (exceto para plantas de combustão para queima de combustíveis gasosos ou líquidos com uma potência térmica nominal de 1 megawatt ou mais). O "caldeireiro" é a pessoa oficialmente designada para monitorar

essas plantas. Ele ou ela deve estabelecer uma vez por ano se os requisitos para as plantas de aquecimento em relação aos limites de emissões estão sendo atendidos. No caso de plantas a combustível sólido, são determinadas as emissões em forma de poeira e, em certos casos, monóxido de carbono (CO). Para instalações a óleo e gás, a perda de gás de exaustão é determinada como um parâmetro a partir da medição do conteúdo de oxigênio ou dióxido de carbono no gás de exaustão e a diferença entre a temperatura dos gases de exaustão e a temperatura ambiente (a temperatura do ar de combustão corresponde largamente à temperatura ambiente). O número de fumaça também é determinado para instalações a óleo.

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

Regulamento sobre instalações que exigem licença (4ª Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha (BlmSchV))

O 4º Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha (BlmSchV) especifica quais instalações exigem aprovação devido ao seu potencial impacto ambiental. Inclui uma lista de instalações sujeitas a aprovação, como plantas industriais, instalações

de energia e instalações de tratamento de resíduos, em seu anexo. O regulamento visa minimizar os riscos ambientais e de saúde, garantindo que essas instalações só possam ser operadas sob condições rigorosas e monitoramento regular. Também define os procedimentos para concessão, alteração e monitoramento de permissões, garantindo um alto padrão de proteção.

Grupo	Tipo de instalação	Descrição
1	Geração de energia	Usinas elétricas, usinas de aquecimento, usinas de gás, vapor e turbinas a gás
2	Processamento de metais	Siderurgias, fundições, forjarias, fundição de metais
3	Processamento de minerais	Cimenteiras, fábricas de cal, fábricas de vidro, produção de cerâmica
4	Indústria química	Instalações químicas, refinarias, processamento de plásticos, produção de tintas e revestimentos
5	Tratamento e acabamento de superfície	Instalações de galvanoplastia, oficinas de pintura, instalações de decapagem, instalações de galvanização por imersão a quente
6	Produção de alimentos e ração animal	Matadouros, fábricas de açúcar, cervejarias, fábricas de ração
7	Gestão de resíduos e reciclagem	Usinas de incineração de resíduos, instalações de reciclagem, aterros sanitários, usinas de compostagem
8	Processamento de papel e madeira	Fábricas de papel, fábricas de celulose, processamento de madeira, produção de aglomerado
9	Processamento de têxteis e couro	Fábricas têxteis, tinturarias, curtumes
10	Outros processamentos industriais	Processamento de tabaco, fabricação de produtos médicos, fabricação de componentes eletrônicos
11	Armazenamento e manuseio de substâncias perigosas	Parques de tanques, áreas de manuseio de produtos químicos, terminais de mercadorias perigosas
12	Instalações agrícolas e florestais	Grandes celeiros para gado, usinas de biogás, silos, instalações de secagem

Tabela 15 Classificação de grupos de tipos de plantas na 4ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BlmSchV)

TI Air (Instruções Técnicas sobre Controle da Qualidade do Ar)

O TI Air é uma regulamentação administrativa na Alemanha que define limites de emissões e normas técnicas para controle da qualidade do ar. Ele serve para proteger o meio ambiente e a saúde humana, regulamentando as emissões de poluentes de instalações industriais.

O TI Air inclui requisitos para a aprovação, monitoramento e operação das instalações para melhorar a qual-

idade do ar e minimizar os impactos ambientais prejudiciais. É um componente-chave da legislação alemã de controle de imissões.

Parte 2 define as regras gerais, com substâncias classificadas em quatro categorias de acordo com seus efeitos nocivos: o valor-limite para as substâncias mais perigosas (Classe I, como arsina ou foscênio) é 0,5 mg/m³, enquanto o valor-limite para substâncias como óxidos de enxofre

O TI Air é dividido nas seguintes partes:

Parte	Conteúdo
Introdução	Objetivos, escopo e fundamentos legais
Parte 1: Disposições gerais	Definições, princípios de controle da qualidade do ar, requisitos para licenças de instalação
Parte 2: Requisitos de emissão	Valores-limite para vários poluentes (por exemplo, poeira, metais pesados, compostos orgânicos)
Parte 3: Requisitos para instalações	Requisitos técnicos e organizacionais para a operação de instalações
Parte 4: Monitoramento e medição	Regulamentos para medição de emissões, obrigações de monitoramento e documentação
Parte 5: Requisitos para instalações existentes	Disposições transitórias, obrigações de ajustamento para instalações mais antigas
Parte 6: Disposições processuais	Requisitos para procedimentos de aprovação e participação pública
Anexos	Regulamentações detalhadas para poluentes específicos e tipos de instalações, normas técnicas

Tabela 16 Principais partes do TA Luft / TI Air

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

ou óxidos de nitrogênio (Classe IV) é 350 mg/m³. Esses requisitos são geralmente aplicáveis. No entanto, em casos específicos descritos em mais detalhes na Parte 2, são substituídos por requisitos mais rigorosos.

Parte 4 trata especificamente do procedimento para medir e monitorar as emissões e especifica, entre outras coisas, que

- Ao aprovar plantas, pontos de amostragem e locais de medição adequados devem ser designados, o que facilitará medições representativas e tecnicamente precisas das emissões;
- Emissões de poluentes atmosféricos para os quais limites foram definidos no aviso de aprovação devem ser estabelecidas por meio de medições individuais iniciais e recorrentes;
- Em caso de fluxos de massa particularmente altos de substâncias sujeitas a limites de emissões, essas devem ser monitoradas por meio de medições contínuas; e
- Leituras individuais devem ser feitas regularmente para substâncias particularmente perigosas para as quais a medição contínua seria desejável, mas tecnicamente inviável.

Medições Individuais de Acordo com o TI Air (Medições conforme § 26, 28 do BImSchG)

Antes da medição individual, uma medição inicial é realizada por um centro de teste aprovado após a instalação nova ou modificação substancial de uma planta. Essa medição inicial pode ser considerada como uma aceitação da planta e é realizada entre 3 e 12 meses após a colocação em operação. As medições individuais são então realizadas anualmente ou a cada 3 anos. As concentrações dos gases nocivos sujeitos à medição são determinadas como valor médio ao longo de um período de medição de meia hora e verificadas quanto à conformidade com os limites de emissão.

Medição Contínua de Acordo com o TI Air

Durante a duração operacional diária da planta, a "média de meia hora" é calculada a partir dos dados de medição adquiridos a cada meia hora. A partir desses valores, as "médias diárias" são então calculadas, armazenadas e avaliadas estatisticamente, sendo que os limites de emissão especificados para a planta não devem ser ultrapassados.

Finalmente, a Seção 5.4 contém regulamentos especiais para certos tipos de plantas, afetando grandes áreas da indústria, como mostrado na Tabela 17.

Seção em TI Air	Tipo de planta que está sendo tratada
5.4.1	Produção de calor, mineração, energia
5.4.2	Rocha e solo, vidro, cerâmica, materiais de construção
5.4.3	Aço, ferro e outros metais, incluindo seu processamento
5.4.4	Produtos químicos, farmacêuticos, refino de óleo mineral e processamento posterior
5.4.5	Tratamento de superfície com substâncias orgânicas, produção de materiais plásticos do tipo tira, outros processamentos de resinas e plásticos
5.4.6	Madeira, celulose
5.4.7	Alimentos, bebidas, tabaco e ração animal, produtos agrícolas
5.4.8	Instalações para recuperação e eliminação de resíduos e outros materiais
5.4.9	Armazenamento, carga e descarga de materiais e preparações
5.4.10	Diversos (por exemplo, bancos de ensaio para ou com motores de combustão, turbinas a gás ou motores com uma potência térmica nominal total inferior a 50 MW...)

Tabela 17 Classificação por tipo de instalação na TI Air (Seção 5.4)

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

Regulamento sobre Plantas de Combustão de Grande Escala (13ª Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha)

Estas incluem sistemas de combustão com uma produção de calor > 50 MW usando combustíveis sólidos e líquidos e > 100 MW usando combustíveis gasosos. Essas plantas não estão cobertas pela 4ª Regulamento Federal de Controle de Emissões da Alemanha (BImSchV) ou TI Air.

Limites de emissões são estabelecidos para poeira, componentes da poeira, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e compostos gasosos de cloro e flúor, dependendo da produção de calor e do tipo de planta. Alguns desses valores estão sujeitos a um princípio de amostragem dinâmica, o que significa que os valores podem ser reduzidos assim que a tecnologia de ponta permitir.

Combustível	Valor limite de poluente [mg/m ³] de acordo com a 13ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV)							
Limites de emissão para grandes instalações de combustão (médias diárias)								
	Poeira	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC**	NH ₃ *	HCHO***
Combustível sólido	10	150 - 200	125 - 200	110 - 220	0.02		10	-
Biocombustível	10	150 - 250	150 - 250	70 - 175	0.005	10		-
Combustíveis líquidos	10	80	100	120 - 200	-	-		-
Combustíveis gasosos	5 - 10	50 - 100	85	5 - 300	-	-		-
Limites de emissão para usinas de turbinas a gás (médias diárias)								
	Dust	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC**	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	10	100		-	-	-	10	-
Combustíveis gasosos	-	100	40 - 50	-	-	-		5
Limites de emissão para usinas de motores de combustão interna (médias diárias)								
	Dust	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC**	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	20	300	140	-	-	-	-	20
Combustíveis gasosos	10	250	100	-	-	300 - 1330	-	20

Tabela 18 Valores-limite de poluentes de acordo com a 13ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV) (trecho)

Portaria sobre plantas de combustão de médio porte, turbinas a gás e motores de combustão interna (44ª BImSchV)

A 44ª BImSchV aplica-se à construção, projeto e operação de plantas de combustão, tanto as que exigem licença quanto as que não exigem. Isso inclui plantas de combustão de médio porte, instalações de turbinas a gás e motores de combustão interna com uma capacidade térmica nominal de pelo menos 1 megawatt e menos de 50 megawatts, independentemente do tipo ou tipos de combustível utilizados.

Os limites de emissão são diferenciados com base em:

- Tipo de planta de combustão
- Capacidade (térmica)
- Combustível utilizado
- Médias anuais, diárias e de meia hora
- Se a instalação é existente ou recém-construída
- Área de aplicação (por exemplo, plantas de combustão usadas na produção de celulose, papel e papelão, refinarias ou na fabricação de produtos químicos)

* O valor limite aplica-se a instalações de combustão que utilizam redução catalítica seletiva (RCS) ou redução não catalítica seletiva (RCSN).

** Metano expresso em hidrocarbonetos totais (THC)

*** HCHO = Formaldeído

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

Combustível		Valores-limite de poluentes [mg/m³] de acordo com a 44ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV)						
Limites de emissão para instalações de combustão de combustíveis sólidos (médias diárias)								
	Poeira	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC	NH ₃ *	HCHO
Combustível sólido	20	160	200	375 - 400	50	-	30	-
Biocombustível	20	220 - 370	200 - 370	200	50	10 - 15	-	-
Instalações de combustão de médio porte que não requerem licença com uma potência térmica nominal de 10 megawatts ou mais, ou em instalações de combustão de médio porte que requerem licença								
	Poeira	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	10 - 20	80	150 - 200	350	-	-	-	-
Gaseous fuels	5 - 10	50 - 80	100 - 200	5 - 1700	-	-	-	-
Instalações de combustão de médio porte que não necessitam de licença e com potência térmica nominal inferior a 10 megawatts								
	Número de fumaça	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	1	80 - 150	200	-	-	-	-	-
Combustíveis gasosos		80 - 110	100 -150	-	-	-	-	-
Limites de emissão para usinas de turbinas a gás								
	Número de fumaça	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	1	100	75	-	-	-	-	5
Combustíveis gasosos		100	50 - 75	-	-	-	-	5
Limites de emissão para usinas de motores de combustão interna***								
	Poeira	CO	NO, NO ₂	SO ₂ , SO ₃	Hg	THC	NH ₃ *	HCHO
Combustíveis líquidos	5 - 50	300	100		-	-	-	20
Combustíveis gasosos**		250 - 500	100 - 500	5 - 1700	-	300 - 1300	-	10 - 20

Tabela 19 Valores-limite de poluentes de acordo com a 44ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV) (excerto)

Portaria sobre plantas de incineração de resíduos (17ª BImSchV)

Plantas de incineração de resíduos são usadas para o tratamento térmico de resíduos sólidos, líquidos ou tipo pasta (resíduos domésticos e hospitalares, lodo, pneus usados, e também tintas, vernizes e solventes), com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos e seus níveis potenciais de poluição. Os gases de combustão resultantes dessa incineração estão sujeitos aos limites permissíveis de poluentes definidos na regulamentação específica aplicável à incineração de resíduos (17ª BImSchV); uma seleção dos valores especificados lá é mostrada na Tabela 20.

Analisadores para monitoramento de emissões de acordo com a Lei Alemã de Controle de Emissões (BImSchG)

A qualidade das medições de emissões é garantida por:

- Qualificação e acreditação de especialistas e órgãos,
- Realização de testes de qualificação para instrumentos de medição,
- Fornecimento de métodos de medição de referência,
- Testes interlaboratoriais para tarefas de monitoramento de emissões e imissões para corpos de medição acreditados.

Poluente		Valores-limite de poluentes em mg/m ³ de acordo com a 17ª Portaria Federal Alemã de Controle de Emissões (BImSchV)	
		Média diária máxima	Média máxima de meia hora
Poeira total		5	20
Carbono total	THC	10	20
Cloreto de hidrogênio	HCl	6	40
Fluoreto de hidrogênio	HF	0.9	4
Óxidos de enxofre	SO ₂ / SO ₃	30	200
Óxidos de nitrogênio	NO, NO ₂	120	400
Mercúrio	Hg	0.01	0.035
Monóxido de carbono	CO	50	100
Amônia	NH ₃	10	15

Tabela 20 Limites de emissão para instalações de incineração de resíduos

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

Os métodos analíticos utilizados para o monitoramento de emissões de acordo com a Lei Alemã de Controle de Emissões (BImSchG) seguem os mesmos princípios físicos ou químicos usados em outras áreas de análise de gases. No entanto, os requisitos para os instrumentos são especificados aqui e os instrumentos devem comprovar que atendem às especificações por meio de um teste de qualificação. O grande número de componentes nos gases de combustão exige seletividade suficiente dos métodos e instrumentos, bem como baixos e conhecidos graus de sensibilidade cruzada.

Os métodos de medição devem ser confiáveis, reproduzíveis e permitir calibração. Um alto grau de disponibilidade também deve ser garantido, com requisitos mínimos de manutenção. Devido às altas temperaturas dos gases de combustão, altos níveis de umidade e poeira, além de componentes agressivos dos gases de combustão, as tarefas de medição também exigem requisitos especiais no processo de amostragem. Além disso, ao realizar a amostragem, é importante lembrar que a amostragem deve ser representativa da planta, o que, em plantas com alta variabilidade temporal e/ou espacial dos poluentes, exige medições em grade ou pontos de medição individuais distribuídos, por exemplo.

Teste de qualificação para instrumentos de medição

Somente instrumentos de medição que tenham demonstrado com sucesso sua qualificação para esse fim podem ser usados para monitorar o controle da poluição do ar de acordo com os requisitos da Lei Alemã de Controle de Emissões (BImSchG). Este princípio visa garantir qualidade e comparabilidade suficientes nas medições e estabelecer uma prática uniforme no monitoramento das plantas. O teste de qualificação é realizado de acordo com diretrizes prescritas (requisitos mínimos); ele é concluído por meio de testes laboratoriais e um teste de campo realizado por algumas instituições de teste especialmente aprovadas. A prova de um teste de qualificação bem-sucedido é fornecida por um certificado correspondente e pelo anúncio público dos resultados no chamado Bundesanzeiger (Gazeta Federal).

Métodos de Medição

Medições individuais oficiais, bem como medições contínuas com equipamentos de medição estacionários, só podem ser realizadas utilizando instrumentos de medição que tenham passado no teste de qualificação. Os instrumentos de medição devem ser certificados de acordo com as normas europeias da série EN 15267.

Para medições individuais e medições comparativas durante a calibração de sistemas de monitoramento estacionários, existem métodos de referência padronizados estabelecidos

nas normas da União Europeia (CEN - Comitê Europeu de Normalização) ou em leis nacionais (Tabela 21).

Além disso, existem os chamados métodos de referência (RM), que fornecem o valor de referência reconhecido para o parâmetro de medição. Um método de referência pode ser manual ou automático.

Poluente		Padrão	Método
Cloreto de hidrogênio	HCl	EN 1911	Métodos de separação
Hidrocarbonetos	CxHy	EN 12619	Detector de ionização de chama (FID)
Oxigênio	O ₂	EN 14789	Método paramagnético
Dióxido de enxofre	SO ₂	EN 14791	Cromatografia de íons ou método Thorin
Óxidos de nitrogênio	NOx	EN 14792	Quimioluminescência
Óxido nitroso	N ₂ O	EN ISO 21258	Espectrometria infravermelha não dispersiva
Amônia	NH ₃	EN ISO 21877	Métodos de separação
Monóxido de carbono	CO	EN 15058	Espectrometria infravermelha não dispersiva
Dióxido de carbono	CO ₂	CEN/TS17405	Espectrometria infravermelha não dispersiva

Tabela 21 Exemplos de métodos de referência padrão europeus

Métodos de Referência

Se forem utilizados instrumentos de medição que não atendem aos métodos de referência (padrão) (os chamados métodos alternativos), deve-se demonstrar sua equivalência com um método de referência (de acordo com a EN 14793). Essa verificação envolve três etapas:

1. Descrição do método alternativo e definição do escopo de aplicação (faixa de medição e tipo de matriz de gases de combustão),
2. Determinação dos parâmetros processuais do método alternativo e, se necessário, cálculo da incerteza expandida, bem como verificação do cumprimento da incerteza expandida máxima permitida para o método de referência;
3. Verificação da repetibilidade e da ausência de desvios sistemáticos do método alternativo quando utilizado no campo ou em um banco de testes acreditado, por meio da comparação com o método de referência para o tipo de matriz de gases de combustão definida na faixa de equivalência.

2.3.3 Monitoramento de emissões nos EUA

1. O monitoramento de emissões nos EUA é baseado na Lei do Ar Limpo e suas emendas (Clean Air Act Amendments, CAAA) de 1991. A CAAA é uma lei federal. Com base nesta lei, a EPA (Agência de Proteção Ambiental) aprovou regulamentos gerais projetados para reduzir e monitorar emissões. Isso marcou principalmente a mudança do monitoramento de emissores muito grandes para fontes menores (títulos 5 e 7, veja abaixo).
2. A CAAA divide os emissores em 7 seções (títulos) de acordo com seu tamanho, sendo três das quais particularmente relevantes para o uso de instrumentos Testo:
Título 4: Usinas de energia
Título 5: Fontes industriais
Título 7: Fontes menores
A avaliação de um emissor é realizada com base em vários critérios, como potência térmica ou seu potencial para emitir uma certa quantidade de poluentes especificados, como 100 toneladas métricas de NOx por ano. Mais subdivisões focam nos limites permissíveis de emissão (partes) e nas normas/guias para instrumentos de medição (métodos) para certos tipos de plantas. A mudança em direção

a plantas menores também tem consequências para a tecnologia de medição. Sistemas de Monitoramento de Emissões Contínuas (CEMs) foram e continuam sendo exigidos para monitorar grandes emissores. Esses sistemas representam um investimento inicial que pode variar de 100 USD a 500.000 USD, dependendo dos parâmetros medidos. Além disso, há um custo anual de manutenção de 20.000 USD por ano para trabalho e 65.000 USD para garantia de qualidade/ controle de qualidade anual, relatórios correspondentes e peças e materiais como cilindros de gás. Como esses custos são totalmente desproporcionais para emissores menores, a agência federal EPA e as autoridades reguladoras estaduais gradualmente mudaram para instrumentos de medição portáteis ao longo dos anos. Esses dispositivos oferecem a mesma precisão de medição, mas envolvem apenas uma fração dos custos mencionados.

3. Nos EUA, há uma divisão de responsabilidades entre as autoridades federais e as autoridades dos estados individuais. O Título 4 geralmente está sob jurisdição federal, o

título 7 sob jurisdição estadual; no caso do título 5, os estados têm jurisdição desde que demonstrem atividades correspondentes para implementação. Para exercer sua jurisdição, os estados individuais possuem agências (Departamentos de Qualidade Ambiental, DEQ) que podem implementar as normas definidas pela EPA ou introduzir regulamentos mais rigorosos. Uma dessas agências é a SCAQMD (Distrito de Gestão da Qualidade do Ar da Costa Sul), com 2.400 funcionários na Califórnia, que implementou uma série de regulamentações específicas e mais rigorosas e exige métodos de medição que, entre outras coisas, se aplicam ao uso de dispositivos portáteis para determinar as concentrações de NO_x, CO e O₂.

4. A EPA não realiza testes de equipamentos ou certificações; em vez disso, ela define métodos de teste que descrevem sua aplicação para tarefas de medição específicas. Um exemplo disso é o método para medir poluentes com critérios específicos usando sensores eletroquímicos: exemplos de tais métodos incluem EPA CTM-030, OTM-38 & 39 e outros métodos equivalentes aprovados pela EPA, como ASTM D6522-11. Muitas

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

autoridades estaduais e espaços aéreos designados aprovaram instrumentos de medição portáteis para testes de NO_x, CO e O₂ usando protocolos locais de teste.

5. Com o hardware e software adequados, o teste 350 pode ser personalizado para atender aos diversos métodos de teste.

6. Além da conformidade com os protocolos de teste oficiais mencionados acima, o teste 350 também é usado em testes de pré-conformidade. Isso pode incluir, por exemplo, a medição das concentrações de NO_x e CO ou o monitoramento de gases de efeito estufa (GHGs). O teste 350 pode ser configurado com um sensor de CO₂ e/ou hidrocarbonetos. Isso pode fornecer informações abrangentes sobre as emissões de CO₂ e metano de uma instalação.

7. O teste 350 é equipado com hardware e firmware especializados, além de sensores específicos para medir motores a diesel para aplicações marítimas, adaptados aos requisitos exclusivos do ambiente marítimo e cumprindo os rigorosos padrões do Anexo IV da MARPOL e do Código Técnico de NO_x. O teste

350 MARITIME é atualmente usado em todos os tipos de aplicações marítimas para testes de NO_x, CO, SO₂, CO₂ e O₂. O teste 350 MARITIME foi certificado por diversas autoridades marítimas (veja Seção 5.3).

2.3.4 Monitoramento de emissões na China

Na China, o monitoramento de emissões está sujeito a diretrizes rigorosas definidas nos documentos normativos "Especificações Técnicas para o Monitoramento de Emissões de Fontes Estacionárias (HJ/T 397-2007)" e "Norma de Emissões de Poluentes do Ar para Caldeiras (GB 13271-2014)". Os principais poluentes gasosos monitorados incluem NO, NO₂, SO₂, CO, HCl, fluoretos, Hg e partículas finas. Além disso, o O₂ é utilizado como um parâmetro de medição essencial para processos de cálculo específicos. O Departamento de Proteção Ambiental da China (EPD) opera centros de monitoramento ambiental em cada província. Esses centros colaboram com empresas regulatórias nacionais, provinciais e municipais com base em valores anuais de emissão. As empresas que causam poluição ambiental são designadas aos respectivos centros de monitoramento ambiental de acordo com uma lista mantida pelo EPD. Os centros de monitoramento ambiental (EMCs) monitoram as emissões dessas empresas conforme os padrões de emissão de poluentes de vários setores, como cimento, vidro, usinas de energia, incineração de resíduos e indústria química.

Além disso, existem prestadores de serviços terceirizados que lidam com as tarefas de monitoramento anual atribuídas pelos centros de monitoramento estatal. Essas empresas de monitoramento externo atendem aos requisitos do EPD e fornecem o serviço de monitoramento anual para os EMCs. As empresas também são obrigadas a realizar o auto-monitoramento regular de suas emissões, seja diário, mensal ou trimestral. Essas atividades de auto-monitoramento são realizadas de acordo com as diretrizes específicas para o auto-monitoramento de fontes de poluição aplicáveis à respectiva indústria.

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

2.3.5 Processo de limpeza de gases de combustão

As emissões de poluentes do ar provenientes dos gases de combustão podem ser consideravelmente reduzidas através de medidas apropriadas ou pela instalação dos componentes necessários na planta:

- A emissão de partículas é reduzida ou praticamente eliminada com o uso de um separador de poeira.
- As emissões de gases nocivos podem ser reduzidas até certo ponto com o uso de combustíveis de baixa poluição.
- No entanto, a redução crucial é alcançada otimizando o processo de combustão e purificando os gases de combustão resultantes por meio de reações de absorção ou adsorção ou por processos de pós-combustão. Nestes procedimentos, a análise de gases desempenha um papel decisivo no monitoramento e otimização das medidas adotadas!

Catalisadores (ou Conversores Catalíticos)

De modo geral, um catalisador é uma substância que aumenta a taxa de reação (a temperaturas moderadas) ao reduzir a energia de ativação da reação. Catalisadores são amplamente utilizados para a oxidação e redução

de poluentes gasosos. Eles são principalmente aplicados em motores de combustão interna, bem como em turbinas a gás, sistemas de caldeiras e aplicações industriais especializadas.

- **Catalisador de oxidação:** Esses catalisadores são usados em condições ricas em oxigênio (por exemplo, em motores de combustão pobre). Eles facilitam a oxidação de poluentes como monóxido de carbono e hidrocarbonetos, mas não reduzem óxidos de nitrogênio. Isso se aplica a muitos catalisadores quando os gases de escape contêm excesso de oxigênio. Isso é tipicamente o caso de gases de escape de motores a gasolina com combustão pobre ou motores a diesel, ambos operando com uma alta razão ar-combustível. Catalisadores de oxidação puros (catalisadores não regulados) eram comumente usados no passado como catalisadores de retrofit para motores a gasolina.

Hoje em dia, os catalisadores de oxidação também estão sendo desenvolvidos para uso em fogões a lenha. Eles podem, por exemplo, ser instalados na câmara de combustão perto da saída para a chaminé. Como às vezes ficam expostos a temperaturas muito

altas nessa área, devem ser feitos de material resistente a altas temperaturas. Esse tipo de catalisador pode reduzir significativamente as emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e até mesmo partículas finas.

- **Catalisador de três vias:** Para motores a gasolina de quatro tempos, que também podem funcionar com gás natural, o catalisador de três vias é o mais utilizado atualmente. Esse tipo de catalisador pode simultaneamente oxidar monóxido de carbono e hidrocarbonetos enquanto reduz óxidos de nitrogênio (daí o "três vias" em referência à remoção de três poluentes diferentes).

A redução de óxidos de nitrogênio ocorre através de uma reação com monóxido de carbono, que remove oxigênio dos óxidos de nitrogênio, convertendo-os em dióxido de carbono inofensivo. O conteúdo residual de oxigênio nos gases de escape é de-

terminado pela razão ar-combustível, também conhecida como valor lambda (λ). Um valor lambda muito próximo de 1 é necessário para que o catalisador de três vias funcione corretamente. Isso só é tecnicamente possível com a ajuda de um sistema de controle automático, que depende de um sinal de erro de um sensor lambda. O catalisador de três vias funciona apenas com combustão quase estequiométrica, o que significa que não é adequado para motores de combustão pobre ou motores a diesel.

A base de um catalisador de três vias consiste em folhetos finos e estáveis a altas temperaturas, feitos de ligas resistentes ao calor. Através de uma especial forma de enrolamento dos folhetos, o suporte do catalisador assume uma estrutura semelhante a um favo de mel. Para garantir uma redução efetiva dos poluentes, os folhetos metálicos enrolados são revestidos com uma camada especial contendo metais preciosos.

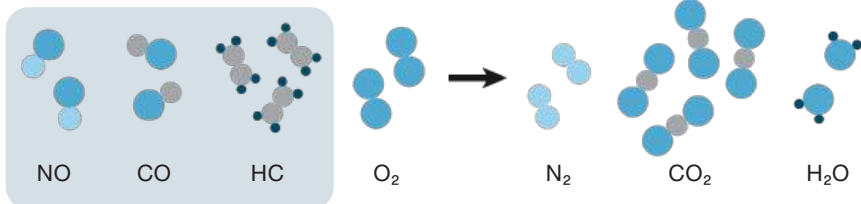


Figura 11 Conversão de poluentes em um catalisador de três vias

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

• **Catalisador SCR:** O método mais eficaz para reduzir os óxidos de nitrogênio nos gases de escape de motores a diesel hoje depende de um catalisador SCR. O processo de redução catalítica seletiva (SCR) envolve a adição controlada de gás amônia (NH_3) ou uma solução de ureia (como AdBlue), que se decompõe em amônia e vapor d'água (e é mais fácil de transportar em veículos do que a amônia). A amônia é um gás tóxico, mas é em grande parte convertida no catalisador, portanto deve estar quase ausente nos gases de escape tratados – exceto em casos de overdose de amônia ou

ureia, conhecidos como vazamento de amônia (NH_3).

Existem também os chamados catalisadores SCR passivos, que utilizam hidrocarbonetos não queimados presentes nos gases de escape como agente redutor, ou seja, não exigem um líquido consumível adicional. Eles são, portanto, aplicáveis apenas a gases de escape com uma composição adequada e, às vezes, estão sujeitos a limitações adicionais, como uma menor tolerância ao enxofre. Com essa tecnologia, também pode não ser possível otimizar o motor para máxima eficiência.

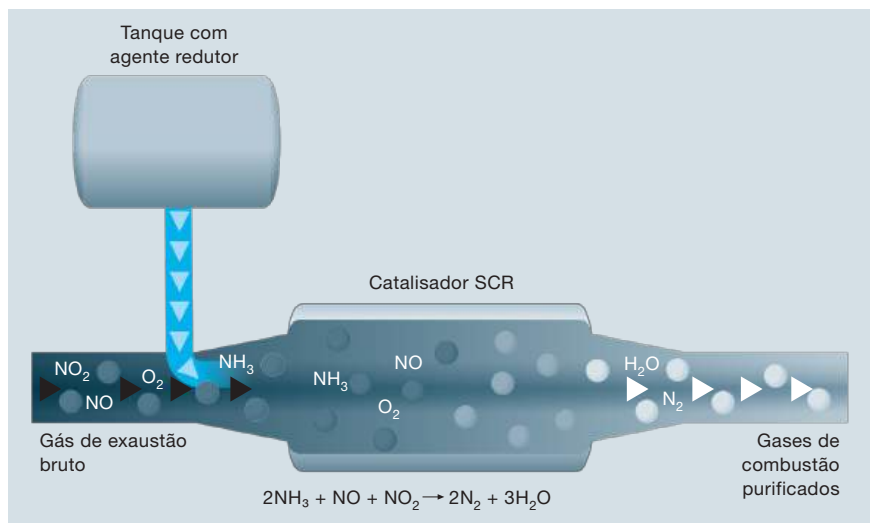


Figura 12 Representação esquemática do processo SCR

Métodos de Denitrificação

Para reduzir os óxidos de nitrogênio nos gases de combustão (especificamente para remover os óxidos de nitrogênio NO e NO₂), medidas primárias e/ou secundárias são aplicadas alternadamente.

- Medidas primárias incluem o método de fornecimento de ar em estágios, combustão em leito fluidizado e o uso de queimadores especiais. Todas essas medidas reduzirão consideravelmente a formação de óxidos de nitrogênio durante a combustão.
- O catalisador SCR descrito é classificado como uma medida secundária para reduzir os óxidos de nitrogênio nos gases de exaustão.

Métodos de despoeiramento

As plantas para despoeiramento de fluxos gasosos (separadores de poeira) funcionam com base em diversos princípios:

- Separação por força centrífuga ou gravitacional: Aqui, as partículas são canalizadas por sua gravidade ou por forças centrífugas para zonas de separação fora do fluxo de gases de combustão. Exemplos bem conhecidos desse tipo de separação são os separadores baseados na força centrífuga, conhecidos como ciclones, nos quais as partículas ganham um

momento de impulso a partir de uma abertura de entrada de gás especialmente projetada, que transporta as partículas para uma câmara de separação. A partir daí, elas são encaminhadas para um coletor de poeira.

- Separação por forças elétricas em precipitadores eletrostáticos: Os precipitadores eletrostáticos utilizam o efeito de força sobre partículas carregadas em um campo elétrico para separar a poeira. As partículas de poeira são inicialmente carregadas por adição de íons negativos e, como resultado dessa carga, são conduzidas até um eletrodo coletor no campo elétrico. Lá, a poeira é depositada como uma camada; essa camada é solta (limpa) por batidas contra o eletrodo e a poeira é transportada para um bunker. Precipitadores eletrostáticos são principalmente usados para limpar volumes extremamente grandes de gás em usinas de energia, siderúrgicas, fábricas metalúrgicas ou fábricas de cimento, por exemplo. Em princípio, os precipitadores eletrostáticos podem explodir devido à formação de uma mistura gasosa explosiva dentro do campo elétrico. Para uma proteção eficaz, a concentração de CO antes do filtro deve ser monitorada.

2. Razões para usar a análise de gases para gases de combustão industriais

- Separação por forças adesivas em, por exemplo, filtros de tecido: Neste método, as partículas são separadas na superfície ou dentro de certos meios filtrantes (membrana, tecido, grãos) pelos quais o gás passa. Os mais comuns são filtros de bolsa ou filtros de bolso feitos de fibras. Os filtros de profundidade incluem principalmente filtros de leito packeado, onde a separação ocorre na superfície de grânulos pelos quais o gás flui.

- Separação por formação de gotículas em, por exemplo, lavadores por pulverização: Aqui, as partículas são ligadas a um líquido de lavagem introduzido no fluxo de gás e separadas juntamente com ele. A desvantagem desse processo é a geração de um líquido de lavagem contaminado.

Combustão em leito fluidizado

Nos sistemas de combustão em leito fluidizado, o combustível pulverizado é fornecido para a câmara de combustão, acima de uma base equipada com bicos.

O ar de combustão flui pelos bicos de baixo para cima, fazendo com que as partículas de combustível formem um leito fluidizado. As partículas não queimadas ou parcialmente queimadas são conduzidas de volta para a câmara de combustão a partir do

fluxo de gases de exaustão por meio de medidas apropriadas, criando assim um leito fluidizado circulante. O processo de leito fluidizado oferece vantagens significativas: as partículas de combustível entram em contato particularmente próximo com o oxigênio no ar de combustão e a combustão, portanto, é quase completa. A temperatura de combustão é cerca de 900 °C, o que impede a formação de óxidos de nitrogênio térmicos em quase todos os casos; a adição de calor ao combustível também possibilita a dessulfurização durante a combustão.

Fornecimento de ar em estágios

O fornecimento de ar em estágios também é uma medida primária muito eficaz, pois suprime a formação tanto de NO de combustível quanto de NO térmico. Isso reduz o fornecimento de ar diretamente no queimador (ar primário), a razão de ar é, portanto, <1, a formação de CO aumenta, o conteúdo de NOx permanece baixo e é ainda mais reduzido pela formação de moléculas estáveis de N₂. Acima do

queimador, um estágio adicional introduz ar de combustão (ar secundário), o que facilita uma combustão adicional. Isso reduz significativamente o CO enquanto forma quase nenhum NO, pois o nitrogênio já está presente como moléculas estáveis de N_2 .

Queimadores otimizados para NOx

Semelhante ao fornecimento de ar em estágios na câmara de combustão, esses queimadores operam com um fornecimento de ar distribuído por vários pontos diferentes dentro do queimador e incluem recirculação interna de ar. Isso resulta em uma combustão completa com formação reduzida de óxidos de nitrogênio.

Métodos de dessulfurização

Entre os muitos métodos de dessulfurização de gases de exaustão, a lavagem úmida com cal/calcareia (medida secundária) é o mais comum. Em uma torre de lavagem, os gases de exaustão são pulverizados com uma suspensão de lavagem (calcareia finamente moída em água), que liga em grande parte o dióxido de enxofre (SO_2) por meio de uma reação química. Nesse processo, o SO_2 gasoso primeiro se dissolve antes de ser ligado como sulfato de cálcio diidratado (gesso). O gesso gerado em grandes

quantidades é, pelo menos em parte, reutilizado como material de construção. A abreviação FGD (planta de dessulfurização de gases de exaustão) também é usada para essas plantas.

Queima térmica pós-combustão

Por favor, consulte o exemplo de aplicação na Seção 4.2.3.

3. Tecnologia de análise de gás

3.1 Termos utilizados na tecnologia de análise (seleção)

3.1.1 Informações sobre concentração

O termo “concentração” refere-se à proporção de uma substância em uma mistura sólida, gasosa ou líquida, por exemplo, álcool na cerveja ou oxigênio no ar. Diversas medições são usadas para especificar uma concentração, como:

- Concentração em massa (referência à massa da substância) com a dimensão $[g \text{ substância}/m^3 \text{ volume de gás}]$
- Concentração em volume (referência ao volume da substância) com a dimensão $[cm^3 \text{ substância}/m^3 \text{ volume de gás}]$
- Concentração de partículas (referência ao número de partículas da substância) com a dimensão $[\text{número de partículas da substância}/\text{número total de partículas}]$

Na tecnologia de medição de emissões e imissões, as unidades concentração em massa e concentração de partículas são usadas paralelamente. A unidade de massa utilizada neste caso é o grama, ou

suas subdivisões, enquanto o termo ppm (partes por milhão) é comum para concentração de partículas. As subdivisões dessas unidades são usadas dependendo da concentração, consulte a Tabela 22 e a Tabela 23 a seguir.

Uma quantidade de poluentes é assim especificada:

- Seja em g (ou mg ou μg , etc.) com referência a um volume de gás específico, geralmente por metro cúbico (m^3), por exemplo, $200 \text{ mg}/m^3$
- Ou em ppm sem qualquer referência, por exemplo 140 ppm

Designação	Escrito como	
Gramas	g	
Miligramas	mg	10^{-3} g
Microgramas	μg	10^{-6} g
Nanogramas	ng	10^{-9} g
Picogramas	pg	10^{-12} g
Femtogramas	fg	10^{-15} g

Tabela 22 Unidade de massa [g] com subdivisões

Designação	Escrito como		
partes por bilhões	ppb	0.001 ppm	0.0000001%
partes por milhão	ppm	1 ppm	0.0001%
		10 ppm	0.001%
		100 ppm	0.01%
		1000 ppm	0.1%
		10000 ppm	1%

Tabela 23 Concentrações de partículas [ppm] e [%] com subdivisões

3. Tecnologia de análise de gás

Nota

Devido à dependência geral do volume de gás em relação à sua temperatura e pressão, é também necessário fazer o seguinte para garantir a clareza da leitura ao usar a concentração em massa:

- Especifique os valores atuais para a pressão e temperatura do gás aplicáveis no momento da medição, ou
- Converta as leituras atuais para o que são consideradas condições padrão; veja a próxima seção. Após esse tipo de conversão, o volume é então especificado em metros cúbicos padrão (denotados como [Nm³] ou [m³N]).

Condições padrão; volume padrão de um gás (VN)

O volume de um gás depende de sua temperatura e da pressão a que está submetido. Para fins de comparação, foi definido um volume padrão:

Um gás tem seu volume padrão quando sua temperatura e pressão correspondem aos valores definidos como condições padrão, ou seja, 273,15 K (equivalente a 0 °C) e 1013 mbar (hPa).

Conversão de valores de concentração

A conversão de uma leitura atual (status C1) para condições padrão (status C2) é realizada utilizando a fórmula:

$$C_2 = C_1 \times \frac{T_1 \times p_2}{T_2 \times p_1}$$

onde as variáveis na fórmula têm os seguintes significados:

Status 1: Status de medição	T ₁ : Temperatura do gás durante a medição em [K] (273 K + temperatura atual em [°C]) p ₁ : Pressão do gás durante a medição em [hPa] C ₁ : Concentração medida
Status 2: Status padrão	T ₂ : Temperatura padrão (= 273,15 K) p ₂ : Pressão padrão (= 1013 hPa) C ₂ : Concentração convertida para condições padrão

Exemplo:

200 mg/m³ a 35 °C e 920 hPa é convertido para 248,4 mg/Nm³ em condições padrão.

Conversão de [ppm] para concentração em massa [mg/Nm³]

ppm (abreviação de partes por milhão) é uma unidade comum de concentração na forma de uma relação de mistura; ela tem um correspondente comum na unidade de concentração em massa. Uma especificação em [ppm] pode ser convertida para a unidade correspondente de concentração em massa [mg/Nm³] utilizando a densidade padrão do gás em questão como fator para as fórmulas mostradas abaixo. A "diluição" do gás de exaustão pelo ar (da exaustão excessiva de ar e, quando necessário, pelas adições direcionadas de ar ou por vazamentos possíveis na planta),

da qual a concentração de oxigênio é uma medida, também deve ser levada em conta. As leituras devem, portanto, ser geralmente convertidas para uma certa porção de oxigênio (chamada de "referência O₂"). Somente especificações com o mesmo valor de referência de oxigênio são diretamente comparáveis! Por essa razão, os valores correspondentes de referência de oxigênio também são sempre especificados nos requisitos oficiais juntamente com os poluentes. Além disso, a porção real de oxigênio medida, que é uma medida da diluição real, também é necessária para a conversão (O₂ no denominador da fórmula).

As fórmulas de conversão para os gases CO, SO₂ e NO_x são as seguintes:

$$\text{CO}[\text{mg}/\text{m}^3] = \left(\frac{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_{2\text{bez}}}{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_2} \right) \times \text{CO} [\text{ppm}] \times 1,25$$

$$\text{SO}_2[\text{mg}/\text{m}^3] = \left(\frac{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_{2\text{bez}}}{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_2} \right) \times \text{SO}_2 [\text{ppm}] \times 2,86$$

$$\text{NO}_x[\text{mg}/\text{m}^3] = \left(\frac{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_{2\text{bez}}}{\text{O}_{2\text{ref}} - \text{O}_2} \right) \times (\text{NO}[\text{ppm}] + \text{NO}_2[\text{ppm}]) \times 2,05$$

Com

O_{2ref} = referência de oxigênio (= 21 Vol.-%)

O_{2bez} = referência de oxigênio [Vol.-%]

3. Tecnologia de análise de gás

Nota

Os fatores numéricos utilizados nas fórmulas correspondem à densidade padrão (a 0 °C; 1013 hPa) do respectivo gás em $[\text{mg}/\text{m}^3]$. Deve-se levar em consideração:

- Para SO_2 , a literatura especifica valores de densidade padrão na faixa de 2,86 a 2,93 mg/m^3 (diferença entre comportamento ideal e real do gás SO_2)
- Para NO_x , utiliza-se a densidade padrão de NO_2 ($= 2,05$), já que este é o único composto estável (NO se combina rapidamente com oxigênio após sua formação para formar NO_2).
- Para H_2S , o fator 1,52 deve ser aplicado, mantendo a fórmula inalterada.

Se a conversão for realizada sem referência ao teor de oxigênio, a fórmula é simplificada omitindo a expressão entre parênteses para CO , para deixar

$$\text{CO in } [\text{mg}/\text{m}^3] = \text{CO}[\text{ppm}] \times 1,25$$

Para os outros gases aplicam-se as regras correspondentes

Conversão de ppm para unidades relacionadas à energia

Para expressar as concentrações de poluentes em duas unidades relacionadas à energia, como [g/GJ] ou [mg/kWh] (1 kWh = 3,6 MJ), são necessárias conversões utilizando fatores específicos do combustível (FBr).

Consulte as fórmulas a seguir e a Tabela 24 para o fator FBr.

A conversão de [ppm] para [g/GJ] é realizada usando as seguintes fórmulas:

$$CO[g/GJ] = \left(\frac{O_{2ref}}{O_{2ref} - O_2} \right) \times CO[ppm] \times F_{Br} \times 1.25$$

$$SO_2 [g/GJ] = \left(\frac{O_{2ref}}{O_{2ref} - O_2} \right) \times SO_2 [ppm] \times F_{Br} \times 2.86$$

$$NO_x [g/GJ] = \left(\frac{O_{2ref}}{O_{2ref} - O_2} \right) \times (NO[ppm] + NO_2 [ppm]) \times F_{Br} \times 2.05$$

Óleo combustível EL	0.2466
Óleo combustível pesado	0.2460
Gás natural	0.2437
LPG	0.2332
Gás de forno de coque	0.2220

Gás urbano	0.2238
Briquetes	0.2685
Lignite	0.2661
Carvão duro	0.2643
Coca, madeira	0.2633

Tabela 24 Fator FBr para diferentes combustíveis

3. Tecnologia de análise de gás

Para a conversão de [ppm] para [mg/kWh], o fator aplicável de 3,6 também deve ser incluído em fórmulas que não sejam alteradas:

$$\text{CO}[\text{mg/kWh}] = \left(\frac{O_{2\text{ref}}}{O_{2\text{ref}} - O_2} \right) \times \text{CO}[\text{ppm}] \times F_{\text{Br}} \times 3,6 \times 1.25$$

$$\text{CO}_2[\text{mg/kWh}] = \left(\frac{O_{2\text{ref}}}{O_{2\text{ref}} - O_2} \right) \times \text{SO}_2 [\text{ppm}] \times F_{\text{Br}} \times 3,6 \times 2.86$$

$$\text{NO}_x[\text{mg/kWh}] = \left(\frac{O_{2\text{ref}}}{O_{2\text{ref}} - O_2} \right) \times (\text{NO}[\text{ppm}] + \text{NO}_2 [\text{ppm}]) \times F_{\text{Br}} \times 3,6 \times 2.05$$

3.1.2 Amostragem, preparação de gás

Amostragem extrativa

Na maioria dos métodos de análise de gases, o gás medido é extraído como uma porção representativa do gás do processo (daí o termo métodos extrativos, em contraste com os métodos in-situ), condicionado e alimentado ao analisador. Condicionamento, também referido como preparação da amostra, entende-se como a limpeza do gás utilizando um filtro e, principalmente, resfriando-o, e, portanto, secando-o até um valor constante definido. As vantagens desse conceito de medição são:

- Separação e proteção da tecnologia sensível do analisador das condições extremamente severas no fluxo do processo
- A capacidade de condicionar o gás amostrado para um estado prático e consistente (e, portanto, comparável)
- Além disso, a capacidade de operar vários analisadores com uma unidade de amostragem ou um analisador (via um interruptor) em vários pontos de amostragem.

Os instrumentos para extrair e condicionar o gás podem ser projetados como unidades separadas ou combinados em uma ou duas unidades compactas. Em termos simples, as funções são as seguintes:

Amostragem e condicionamento de gás

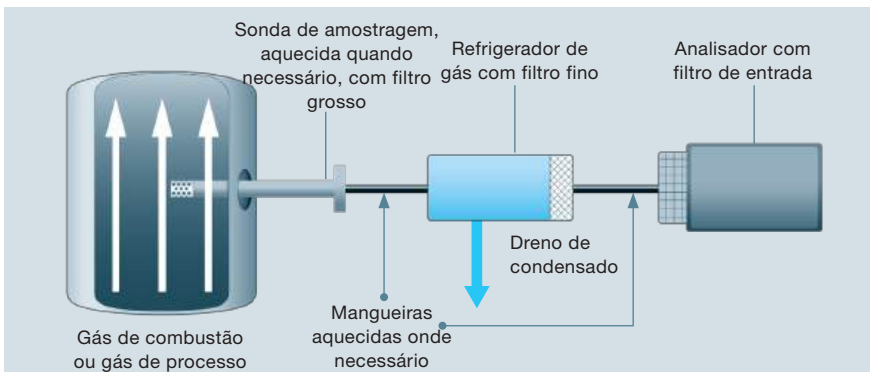


Figura 13 Extração e condicionamento do gás de amostra (esquemático)

3. Tecnologia de análise de gás

- A amostragem de gás é realizada através de uma sonda de amostragem aquecida ou não aquecida feita de diferentes materiais e para diferentes faixas de temperatura (até 1800 °C e acima). Há um pré-filtro localizado na cabeça da sonda.
- O resfriador de gás medido está localizado entre a sonda e o analisador. Gases de exaustão e de processo sempre transportam uma certa quantidade de água, que a altas temperaturas (acima do ponto de orvalho) existe como vapor d'água e a baixas temperaturas (abaixo do ponto de orvalho) como gotas de água. Em ambos os casos, o resultado da medição é distorcido por reações químicas entre outros componentes do gás medido e a água. Além disso, o equipamento de medição pode ser atacado e destruído por soluções agressivas formadas, por exemplo, pela reação do SO_2 com a água. Resfriadores de gás de medição são usados para remover a maior parte do vapor d'água (umidade) do gás medido, resfriando-o até uma temperatura fixa, por exemplo, 4 °C, e manter o nível de umidade restante constante, e portanto comparável, mantendo uma temperatura constante. O condensado resultante é geralmente descarregado por bombas peristálticas ou de diafragma.
- As linhas ou mangueiras de gás medido são ou não aquecidas (no caso de gases não críticos ou temperaturas ambientais extremamente altas) ou aquecidas para manter o gás acima do ponto de orvalho e, assim, evitar a formação de condensado.
- Dependendo do fabricante, o analisador também pode ter um filtro de gás e, em alguns casos, um separador de condensado ou um aquecedor interno.

O conteúdo de umidade do gás é uma variável extremamente crítica na análise de gases em dois aspectos:

- Como vapor, ele dilui o gás de exaustão, e se a umidade variar, essa diluição também variará, assim como as leituras.
- Como água, ela forma compostos com certos componentes do gás, alterando sua concentração e, conseqüentemente, as leituras também.

Medidas corretivas:

- Sempre medir simultaneamente o nível de umidade como um parâmetro importante.
- Leve a umidade a um nível definido e, portanto, comparável, utilizando um resfriador de gás de medição.
- Evite sempre a formação de condensação sobre os componentes ou sobre todo o equipamento de medição utilizando um sistema de aquecimento!

3.1.3 Sensibilidade cruzada

A sensibilidade cruzada de um sistema de detecção é causada pelo fato de que sua resolução específica não é ilimitada. O sistema de detecção, portanto, muitas vezes é sensível não apenas ao componente de interesse que está sendo medido, mas também, até certo ponto, a outros componentes (associados) presentes no gás de medição. Alterações nas concentrações desses componentes terão um efeito na leitura do componente realmente medido, que deve ser corrigido dentro do dispositivo ou retrospectivamente. Para tanto, os componentes associados também devem ser medidos. A sensibilidade cruzada é expressa pelo efeito (aumento ou diminuição) que um componente associado do gás de medição tem sobre a leitura do componente que está sendo analisado. A extensão da sensibilidade cruzada depende do tipo de sistema de detecção (ou seja, é específico do instrumento!) e da concentração dos componentes associados. Consulte a Tabela 25 para o teste 350.

3. Tecnologia de análise de gás

Gás alvo	Sensibilidades Cruzadas									
	Esta tabela é válida para sensores novos com filtros potencialmente não utilizados e para concentrações transversais de gás na faixa de ppm (até alguns milhares de ppm). O valor "0" significa: <1% de sensibilidade cruzada.									
	CO	NO	SO ₂	NO ₂	H ₂ S	H ₂	Cl ₂	HCl	HCN	CO ₂
O ₂	0	0	0 ⁴	0	0	0	0	0 ⁴	0	See ⁵
CO(H ₂)	---	0 ¹ (w) ²	0 ¹ (w) ²	0 ¹ (w) ²	0	0 ⁶	0	0	0	0
CO(H ₂) _{low}	---	0 ¹ (w) ²	0 ¹ (w) ²	0 ¹ (w) ²	0	0 ⁶	0	0	0	0
NO	0	---	0 ⁵ (w) ²	6% ³	0	0	0	0	0	0
NO _{low}	0	---	0 ¹	<5% ³	0	0	0	0	0	0
NO ₂	0	0	<-2%	---	-20% ³	0	100%	0	0	0
SO ₂	<5% ³	0	---	-110% ³	0 ¹	<3%	-80%	0 ¹	30%	0
SO _{2low}	<5% ³	0	---	-110% ³	0 ¹	<3%	-80%	0 ¹	30%	0
C _x H _y	35% ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0	130% ⁷	n/s	n/s	n/s	0

¹ Com filtro não saturado

² w = filtro substituível

³ Compensado se o gás transversal também for medido pelo instrumento (ou seja, se o instrumento estiver equipado com o sensor relevante)

⁴ Sem influência até alguns milhares de ppm; para concentrações de gás transversal na faixa de % 0,3% O₂ por 1% SO₂ / HCl

⁵ 0,3% O₂ por 1% CO₂; compensado

⁶ Após compensação de H₂

⁷ Compensado usando a leitura de H₂ do sensor de CO(H₂)

Tabela 25 Sensibilidades cruzadas no analisador testo 350

- O sinal “+” significa um efeito positivo (aumento na leitura)
- O sinal “-” significa um efeito negativo (diminuição na leitura)
- CO₂ e NH₃, bem como hidrocarbonetos saturados, não geram sensibilidades cruzadas

Informações adicionais sobre os efeitos de componentes associados:

- Concentrações mais altas de hidrocarbonetos insaturados podem resultar em desvio de zero e redução da intensidade de resposta, especialmente para a célula de medição de CO e NO.

- Concentrações altas de gases agressivos, como HCN, HCl ou fluoretos, podem atacar os caminhos do gás ou as carcaças das células.

Mais informações sobre sensibilidades cruzadas podem ser encontradas no White Paper da Testo Emission [“Compensação de sensibilidade cruzada em sensores de gás eletroquímicos”](#).

3.1.4 Calibração, ajuste

Calibração

Em tecnologia de medição, calibração de acordo com a DIN 1319, Parte 1, refere-se ao processo de determinar e registrar o desvio de medição existente de um dispositivo acabado e operacional. No caso de instrumentos de medição com display, a discrepância entre o display e o valor correto para o parâmetro, ou o valor considerado correto, é determinada e registrada usando fatores ou funções. Ao contrário do ajuste, a calibração não envolve fazer alterações no instrumento de medição. A calibração é um elemento essencial da garantia de qualidade na monitorização de emissões. Materiais de referência cuja composição é conhecida com alta precisão dentro de certos limites são usados para calibração. Gases de calibração (também chamados de gases de teste) são usados para análise de gás.

Ajuste

Em tecnologia de medição, ajuste de acordo com a DIN 1319, Parte 1, refere-se ao processo de configurar um instrumento de medição de modo que o desvio de medição seja minimizado o máximo possível. Este processo envolve a realização de alterações no instrumento.

Calibração oficial

A calibração oficial de um instrumento de medição é muito semelhante à calibração, mas deve ser realizada apenas por entidades oficiais. A calibração oficial é um termo legalmente definido e protegido para uma inspeção de qualidade oficial, com a devida rotulagem. Na Alemanha, a calibração oficial é realizada exclusivamente pelos escritórios oficiais de calibração estaduais. Na Áustria, é realizada pelo Escritório Federal de Metrologia e Cartografia (BEV) e na Suíça, pelo Instituto Federal de Metrologia (METAS). Somente instrumentos de medição com aprovação de tipo podem ser calibrados oficialmente.



Figura 14 Exemplos de selos de calibração

Homologação

A homologação de tipo A homologação de tipo de um produto é uma autorização oficial que permite que o produto seja comercializado ou utilizado para uma finalidade específica. Isso requer uma regulamentação legal que geralmente proíbe o uso do produto e estipula que somente produtos oficialmente aprovados podem ser utilizados ou colocados no mercado. (Exemplos de instrumentos de medição oficialmente calibrados: analisadores de gases de escape de veículos)

3. Tecnologia de análise de gás

Gás de teste (gás de referência)

É um gás cuja composição é conhecida com alta precisão e certificada. Gases de teste são usados para calibrar um analisador de gás.

Gás zero

Gás de teste usado para ajustar o ponto zero de um analisador de gás. Não deve conter o componente que está sendo analisado (gás de processo sem o componente a ser analisado, ou, por exemplo, nitrogênio).

Gás associado

Gás de medição sem o componente a ser analisado.

3.2 Analisadores de Gás

3.2.1 Termos e utilização

Análise de processo

A análise de processo, distinta da análise de laboratório, refere-se aos processos de medição geralmente contínuos usados para determinar as propriedades físicas ou químicas e as concentrações de componentes químicos em meios de processo no local, em uma planta.

As aplicações mais comuns de análise de processo estão em plantas das indústrias química e petroquímica,

geração de energia, metais e minerais, alimentos e alimentos de luxo, papel e celulose, minerais não metálicos, mas também na construção de motores e pesquisa e desenvolvimento, por exemplo. No caso de meios de processo gasosos (ou seja, gases de combustão, gases de processo, gases de exaustão, também ar), isso é chamado de análise de gás de processo.

Pontos de medição com amostragem contínua e os instrumentos de medição (analisadores de gás) são distribuídos pelas plantas (na caldeira, chaminé, forno de cimento, a montante do precipitador eletrostático, na coluna de destilação, etc.) em condições operacionais muitas vezes muito severas. Isso destaca as distinções em relação à análise de laboratório, onde as amostras coletadas de forma descontínua de um processo são analisadas centralmente em um laboratório sob condições controladas e estáveis. Os resultados de medição são usados:

- Para controlar o processo, por exemplo, medindo aditivos e otimizando processos
- Para a segurança da planta, verificando se há misturas de gases explosivos
- Para a qualidade do produto, monitorando os processos e as especificações do produto, e

- Para proteção ambiental, monitorando os gases de combustão para verificar a conformidade com os limites de emissão permitidos para poluentes.

Analísadores

O elemento central de todo analisador é composto por sensores ou sistemas de sensores específicos para substâncias. Seu funcionamento é baseado em princípios físicos ou químicos, como absorção, adsorção, transmissão, ionização, efeito térmico ou propriedades paramagnéticas ou eletroquímicas. Os sensores reagem a uma alteração no parâmetro de medição com uma mudança correspondente em suas propriedades (por exemplo, aumento da absorção de luz ou redução da condutividade), a partir da qual um sinal de medição pode ser obtido.

Em termos de design, distingue-se entre:

- Analísadores móveis, leves e portáteis para medições rápidas em diversos locais e
- Analísadores estacionários, instalados permanentemente na planta para medições contínuas a longo prazo durante meses e anos, e entre

- Analísadores que medem diretamente no fluxo do processo (dispositivos “in situ”) e
- Analísadores aos quais uma amostra extraída do fluxo do processo e preparada é adicionada para medição (instrumentos “extrativos”).

Áreas de aplicação

O uso de analisadores de gases de processo concentra-se principalmente em três áreas:

1. Otimização de processos de combustão para reduzir os custos operacionais, proteger as plantas e minimizar as emissões de poluentes (otimização da combustão)
2. Gerar e monitorar uma composição específica de gás dentro de um processo de produção para criar e manter determinadas qualidades de produto (controle do processo).
3. Monitoramento das funções das plantas de limpeza de gases de exaustão e monitoramento dos gases de exaustão liberados na atmosfera para garantir a conformidade com as concentrações permitidas de poluentes (controle de emissões).

3. Tecnologia de análise de gás

A Tabela 26 fornece exemplos dessas três áreas de aplicação e seus objetivos metrológicos com referência às áreas típicas de aplicação.

	1	2	3
	Otimizando um sistema de combustão	Monitoramento da composição de uma atmosfera de gás definida	Verificação do funcionamento dos sistemas de purificação de gases e monitoramento dos gases de combustão para verificar a presença de poluentes gasosos
	Minimizar custos operacionais e emissões de poluentes	Estabelecer e garantir a qualidade definida do produto	Conformidade com os requisitos legais
Aplicações	Otimização da combustão	Controle de processo	Controle de emissões
Minerais não metálicos/vidro			
Produção de metal	✓	✓	✓
Tratamento de metais	✓		✓
Produção de calor	✓	✓	✓
Geração de energia	✓		✓
Descarte de resíduos	✓		✓

Tabela 26 Áreas de aplicação e objetivos da análise de gases

Sensores

O termo sensores geralmente se refere a todos os tipos de instrumentos que fornecem informações sobre uma grandeza física ou química. Um sensor é composto pelo elemento sensorial real (também chamado de sensor elemental) e um transmissor. O elemento sensorial deve ter uma característica, por exemplo, condutividade, que também muda à medida que a variável a ser medida, como a temperatura, muda. Essa “reação” do

sensor é então transformada pelo transmissor (geralmente um amplificador) em um sinal de medição elétrico.

Os principais grupos de sensores são sensores para:

- Medição de temperatura
- Medição de pressão
- Medição de fluxo
- Determinação de concentrações e propriedades de substâncias (tecnologia de análise)

Alguns sensores comumente usados para determinar componentes em gases são mostrados na Tabela 27.

Nota: Em tecnologia de análise, o termo sensor é frequentemente usado coloquialmente apenas para aqueles elementos sensoriais que são particularmente pequenos em tamanho, enquanto sensores maiores são descritos como “analisadores”.

Tipo de sensor/princípio de medição	Efeito medido
Sensores semicondutores	Mudança na condutividade
Sensores de eletrólito sólido / Sensores de eletrólito líquido	Interação entre energia de reação química e energia elétrica
Sensores ópticos	Mudança nas propriedades ópticas
Sensores calorimétricos	Calor de reação da interação com gases
Sensores fotométricos (instrumentos)	Absorção de radiação infravermelha (NDIR) ou ultravioleta (UV), por exemplo
Sensores paramagnéticos (instrumentos)	Propriedades paramagnéticas do oxigênio
Sensores de quimioluminescência (instrumentos)	Reação química com formação de radiação luminescente
Ionização de chama (FID) (instrumentos)	Ionização em chama com medição de corrente
Biossensores	Biorreações

Tabela 27 Tipos comuns de sensores (seleção)

3. Tecnologia de análise de gás

Dispositivos portáteis

Os requisitos para analisadores portáteis na indústria de processos representam um desafio particular para o fabricante do instrumento:

- Ambiente de medição geralmente muito severo
- Alto nível de precisão exigido
- Alta confiabilidade de medição com
- Dimensões compactas do dispositivo e
- Peso reduzido do dispositivo.

O design do testo 350 estabeleceu novos padrões nesse sentido, que foram confirmados de forma impressionante pela concessão de aprovações oficiais para esses instrumentos.

O testo 350 é um instrumento de medição extrativa portátil que, devido às suas características específicas (resfriador de gás de medição, calibração automática, etc.), também pode ser usado em instalações estacionárias por um determinado período de tempo. Com isso, ele abre uma nova área de aplicação e oferece ao usuário uma solução extremamente econômica para diversas tarefas. Idealmente, são utilizados sensores eletroquímicos de gás, que são adequados para dispositivos portáteis em termos de peso, espaço necessário e consumo de energia. No entanto, seu princípio de operação requer conhecimento especializado significativo para garantir a precisão, confiabilidade, vida útil e operabilidade necessárias ao projetar o ambiente de sensor apropriado.

3.2.2 Princípios de Medição para Detecção de Gás (selecção)

Uma variedade de princípios de medição é aplicada para detectar gases em misturas gasosas (Figura 15).

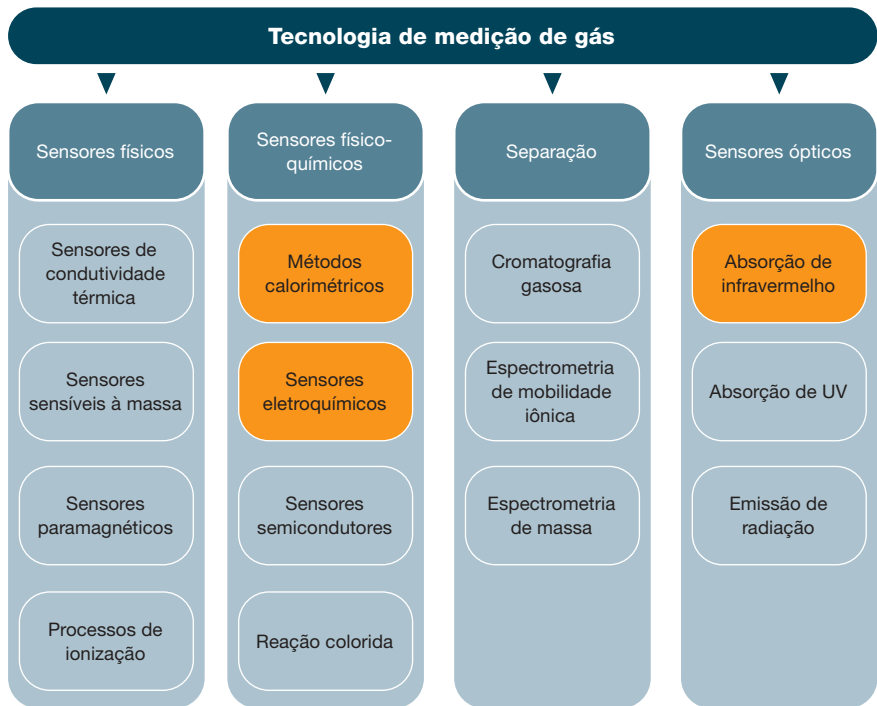


Figura 15 Métodos de tecnologia de medição de gás

3. Tecnologia de análise de gás

A Tabela 28 fornece uma visão geral desses princípios, junto com uma referência aos princípios usados pela Testo.

Princípio de medição	Componentes sendo medidos						
	O ₂	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂	H ₂ S	HC
NDIR		•			•		
NDUV		•	X	•	•		•
Método paramagnético				•	•		
Quimioluminescência	•						
Efeito de calor				•			
Ionização de chama		•					X
Eletroquímica (amperometria)	X	X		X	X	X	
Eletrólito em estado sólido	X						

Tabela 28 Componentes sendo medidos e princípios de medição apropriados para verificar estes.

Sensores eletroquímicos (EC) são usados principalmente nos analisadores de gases de escape da Testo. Além dos sensores EC, o testo 350 também utiliza sensores de condutividade térmica e sensores infravermelhos.

Sensores Eletroquímicos

Sensores eletroquímicos adequados para determinar oxigênio, bem como componentes poluentes como CO, SO₂, NO / NO₂ ou H₂S, operam amperometricamente com a ajuda de eletrodos de difusão de gás. Isso significa que a corrente gerada eletricamente é proporcional à concentração do gás medido e serve como o sinal do sensor.

Os sensores são preenchidos, especificamente para sua tarefa de medição, com uma solução eletrolítica aquosa. Dois ou três eletrodos, igualmente específicos para a tarefa, são colocados na solução com um campo elétrico aplicado a eles. Do lado de fora, os sensores são selados com membranas permeáveis a gases. Consulte as Figuras 16 e 17. O design e a função específicos dos sensores diferem dependendo do componente de gás a ser medido, como mostrado nos dois exemplos a seguir.

Exemplo 1: Sensor de oxigênio (sensor de dois eletrodos)

Os gases de escape ou as moléculas de oxigênio contidas nele passam através da membrana permeável ao gás até o cátodo. Devido à sua composição material, ocorre uma reação química no cátodo com a formação de íons OH^- (íons são partículas carregadas). Esses íons migram através do eletrólito líquido até o ânodo, gerando um fluxo de corrente proporcional à concentração de O_2 .

A queda de tensão gerada em um resistor localizado no circuito serve como sinal de medição, que é utilizado para processamento eletrônico poste-

rior. O resistor embutido com um coeficiente de temperatura negativo (NTC) compensa as influências da temperatura e garante uma performance termicamente estável do sensor.

Equações químicas do sensor de oxigênio:

No cátodo:



No ânodo:



Globalmente:

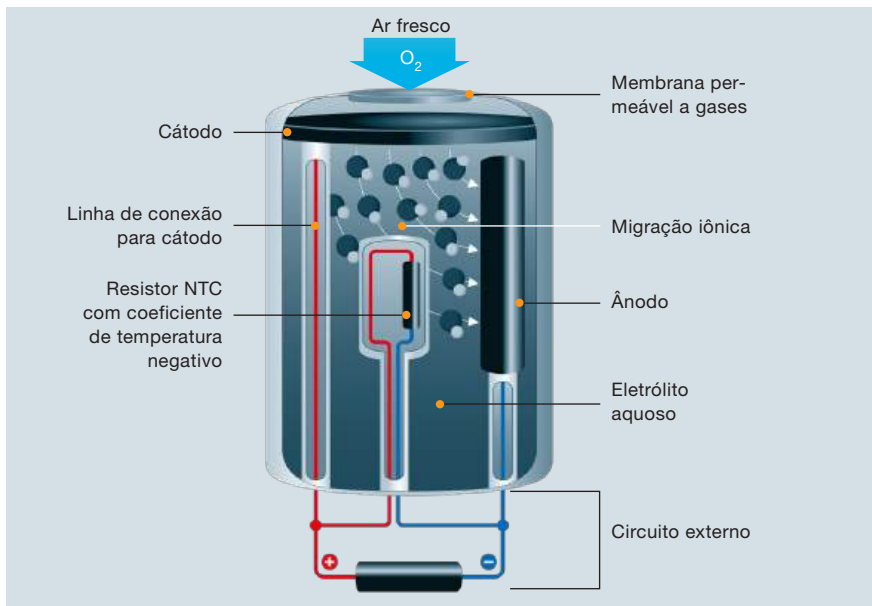


Figura 16 Sensor de oxigênio (esquemático)

3. Tecnologia de análise de gás

Exemplo 2: Sensores para CO, SO₂ e NO, NO₂ (sensor de três eletrodos)
Sensores com três eletrodos são usados para esses componentes de gás. A função é explicada utilizando um sensor de CO; a transferência para os outros componentes é evidente pelas equações químicas. As moléculas de monóxido de carbono (CO) passam pela membrana permeável ao gás até o eletrodo de trabalho, onde íons H⁺ são formados devido a uma reação química. No campo elétrico, esses íons migram até o contraeletrodo, onde um fluxo de corrente é gerado no circuito externo por meio de uma outra reação química desencadeada pelo oxigênio (O₂) do ar fresco também fornecido.

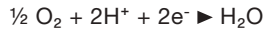
O terceiro eletrodo (eletrodo de referência) é usado para estabilizar o sinal do sensor.

Equações de reação para CO

Ânodo:



Cátodo:



Outras equações de reação

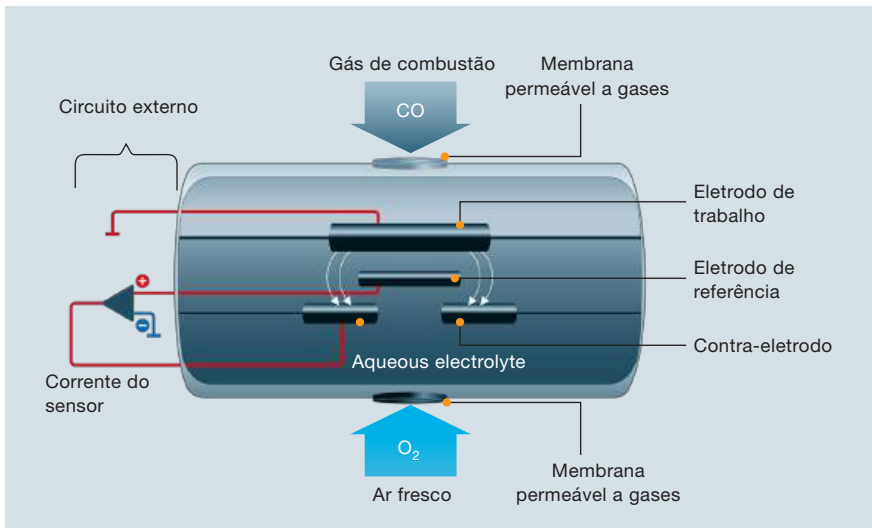
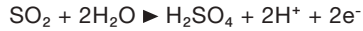


Figura 17 Sensor para CO e outros gases (esquemático)

A tecnologia de sensores eletroquímicos combina várias vantagens.

Para mencionar alguns exemplos:

- Design compacto
- Consumo mínimo de energia para o circuito elétrico necessário, tipicamente 0,3 mW ($3\text{ V} \cdot 100\ \mu\text{A}$)
- Sinais de ponto zero estáveis, tipicamente de 1 a 2 ppm
- Excelente linearidade, permitindo calibração e ajuste simples de um ponto
- Além de boa precisão de medição.

Mais informações sobre o uso de sensores eletroquímicos em analisadores portáteis de gases de escape para medições de emissões em aplicações industriais podem ser encontradas no white paper com o mesmo nome.

Absorção Infravermelha (Método IR)

A radiação infravermelha é absorvida por gases como CO, CO₂, SO₂ ou hidrocarbonetos (CH₄ ou C₃H₈) em um comprimento de onda característico de cada componente (faixa de comprimento de onda na faixa de μm). A atenuação de uma faixa específica de radiação infravermelha à medida que passa por um volume de gás é, portanto, uma medida da concentração do componente gasoso no gás medido. Existem dois métodos para selecionar apenas um componente:

No método dispersivo, a radiação é dispersa espectralmente por prismas ou redes de difração antes de passar pelo volume de gás, e, em seguida, apenas a radiação com o comprimento de onda típico do componente a ser analisado é conduzida pelo volume de gás (câmara de medição). Este princípio é principalmente utilizado em equipamentos laboratoriais.

Nos métodos não dispersivos (método NDIR), a dispersão espectral anterior é dispensada. Após modulação, como por meio de um disco de diafragma rotativo, a radiação de banda larga passa pela câmara de medição. Existem então dois métodos para detectar o nível de absorção:

3. Tecnologia de análise de gás

- Um detector preenchido com o componente a ser analisado mede a radiação residual restante após passar pela câmara de medição, quando necessário, em comparação com a radiação não atenuada. As flutuações de pressão resultantes (causadas pelo aquecimento variável do volume de gás devido à absorção) são detectadas por meio de um capacitor de membrana ou um sensor de microfluxo e convertidas em um sinal elétrico.
- Alternativamente, a radiação passa pelo caminho de absorção e é subsequentemente filtrada por um filtro de interferência para restringi-la à faixa de comprimento de onda necessária para o CO_2 , por exemplo, e depois detectada por um detector de radiação IR. À medida que a concentração de gás aumenta, mais radiação é absorvida e o sinal do detector é reduzido de acordo.

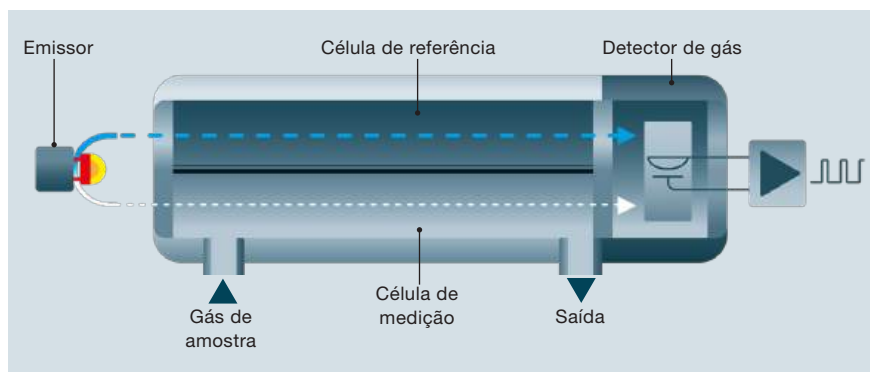


Figura 18 Sensor NDIR (design compacto)

Absorção Ultravioleta (Método UV)

A radiação ultravioleta também é especificamente absorvida por certos componentes gasosos, como SO_2 ou NO . O método UV, portanto, compete com o método NDIR e tem a vantagem de não haver sensibilidade cruzada com o vapor d'água. No entanto, as fontes de luz são mais caras do que no método NDIR. O método UV é, portanto, utilizado apenas para aplicações específicas.

Método de Quimiluminescência (Método CLD)

Quimiluminescência é a emissão de luz resultante de uma reação química. Este método, desenvolvido especificamente para a detecção sensível de NO , explora a propriedade do NO de emitir radiação característica (quimiluminescência) ao reagir com ozônio (O_3). A intensidade dessa radiação é proporcional à concentração de massa de NO . Os instrumentos CLD são tipicamente usados para a detecção seletiva de baixas concentrações de NO , por exemplo, em gases de escape de motores. Eles incluem componentes como um gerador de ozônio, uma câmara de enriquecimento e reação e um fotomultiplicador como detector.

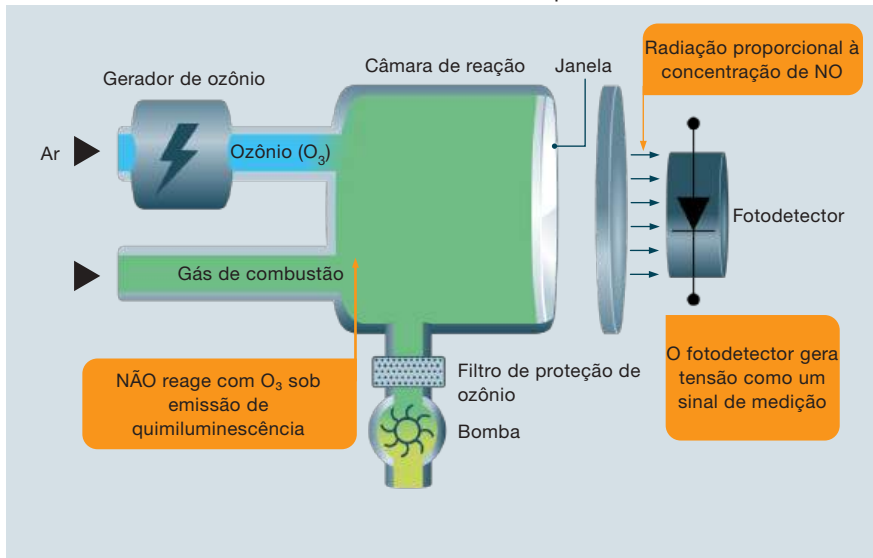


Figura 19 Método CLD

3. Tecnologia de análise de gás

Método Paramagnético

O oxigênio é o único gás fortemente paramagnético, ou seja, as moléculas de oxigênio são altamente atraídas por um campo magnético. Este efeito é utilizado para determinar a concentração de oxigênio. Existem instrumentos modernos disponíveis principalmente em dois designs diferentes:

Nos analisadores tipo haltere (veja a Figura 20), um haltere com duas esferas de vidro preenchidas com nitrogênio é montado em uma suspensão rotativa na câmara de medição, que está disposta em um campo magnético não homogêneo. Quando o oxigênio está presente no gás de medição, as moléculas de O_2 são atraídas para o campo magnético, o que faz com que uma força atue sobre o haltere.

Essa força é compensada por uma mola que age contra ela, resultando em um parâmetro de medição utilizável.

Os analisadores de pressão diferencial utilizam o efeito de gerar uma diferença de pressão entre dois gases com características magnéticas diferentes quando a interface de ambos os gases é exposta a um campo magnético.

Esse recurso é usado para determinar o oxigênio em um gás de medição em interação com um gás de referência sem oxigênio, como o nitrogênio. A diferença de pressão resultante gera um fluxo de gás, que é detectado por um sensor de fluxo e convertido em um sinal de medição.

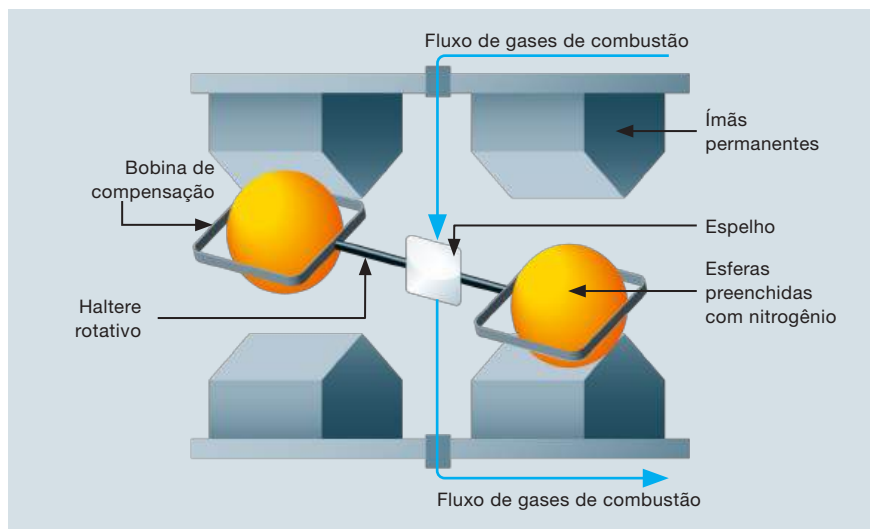


Figura 20 Sensor paramagnético

Condutividade Térmica

Os analisadores de condutividade térmica (detectores de condutividade térmica padrão) utilizam os diferentes valores de condutividade térmica dos gases de medição e referência. Uma ponte de medição com fio aquecido é irrigada em seções tanto pelo gás de medição quanto pelo gás de referência com uma condutividade térmica adequada à tarefa de medição. O resfriamento diferente dos fios aquecidos resulta em um desajuste da ponte, que é usado como o efeito medido.

Efeito Térmico

Este princípio de medição baseia-se no calor de combustão dos materiais combustíveis no gás de medição. Estes são convertidos cataliticamente em um corpo eletricamente pré-aquecido (fio ou esfera) e, à medida que queimam, aumentam a temperatura do corpo, alterando sua resistência elétrica. Este princípio de medição só funciona se houver oxigênio suficiente disponível no gás de medição para a combustão. A mudança de resistência

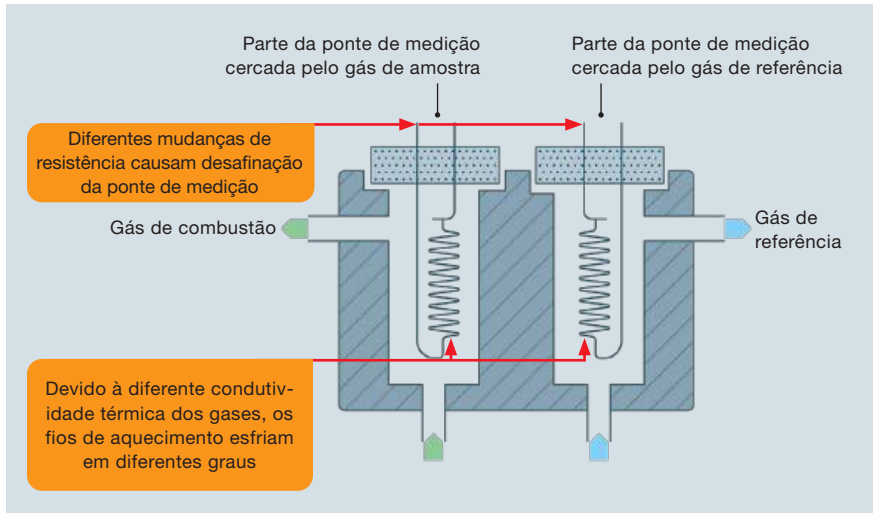


Figura 21 Detector de condutividade térmica

3. Tecnologia de análise de gás

é uma medida do conteúdo de componentes (todos!) combustíveis no gás de medição. Estes incluem principalmente hidrocarbonetos (abreviados como HC e também conhecidos como CxHy), bem como CO e H₂. Portanto, existem sensibilidades cruzadas entre esses componentes, e isso deve ser levado em consideração ao medir ou avaliar as leituras. Exemplo: A leitura do hidrocarboneto metano é aumentada por CO, que está presente simultaneamente no gás de medição, em 0,27 vol.% por 1 vol.% de CO. Para o hidrogênio, isso corresponde a um aumento de 1,5 vol.% para cada 1 vol.% de H₂. Além disso, há uma sensibilidade cruzada com o vapor d'água.

O módulo utilizado pela Testo em alguns de seus instrumentos para medir hidrocarbonetos baseia-se neste princípio. A Figura 22 oferece uma visão esquemática de sua estrutura. Uma corrente flui através do fio de platina, aquecendo o fio e o material catalítico a uma temperatura de aproximadamente 500 °C.

Os materiais combustíveis no gás de medição são queimados na superfície (desde que haja oxigênio suficiente disponível), o que aumenta a temperatura do catalisador e do fio de platina, e isso, por sua vez, altera a resistência elétrica do fio e gera um

signal de medição em um "circuito de ponte de Wheatstone".

O uso do módulo Testo HC requer cuidados especiais devido à sua sensibilidade cruzada e ao potencial comprometimento de sua função por substâncias contidas no gás de medição, como H₂S, silicones ou hidrocarbonetos contendo enxofre. Consulte o manual de instruções do instrumento para obter as informações relevantes.

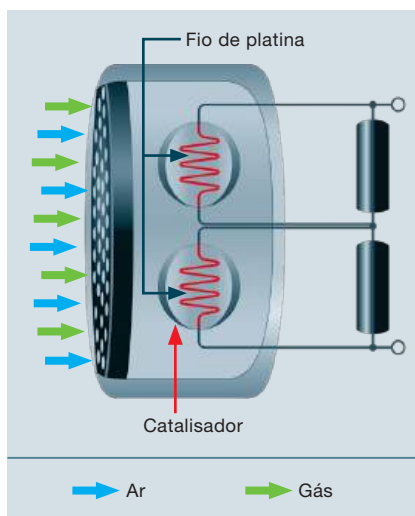


Figura 22 Sensor baseado no princípio do efeito de calor

Sensor de ionização de chama (FID)

Os compostos orgânicos de carbono contidos no gás de medição são introduzidos em uma chama (geralmente hidrogênio/hélio), onde são queimados e ionizados. Os íons gerados são medidos como um fluxo de íons, que, em uma primeira aproximação, é proporcional aos átomos de carbono orgânico envolvidos no processo. Os diferentes graus de sensibilidade do processo a diferentes compostos orgânicos são levados em consideração pela aplicação de fatores de resposta.

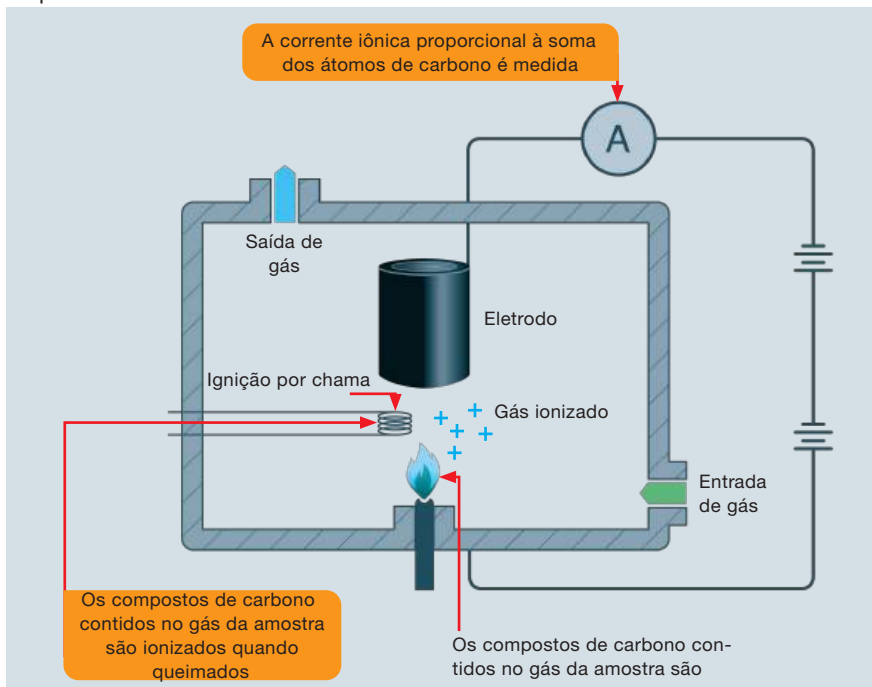


Figura 23 Detector de ionização de chama

Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

FTIR é uma técnica usada para obter um espectro infravermelho da absorção ou emissão de um sólido, líquido ou gás. Um espectrômetro FTIR captura simultaneamente dados espectrais de alta resolução em uma ampla faixa espectral. Isso oferece uma vantagem significativa em relação a um espectrômetro dispersivo, que mede simultaneamente a intensidade em uma faixa estreita de comprimento de onda.

O termo Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier origina-se do fato de que uma transformação de Fourier (um processo matemático) é necessária para converter os dados brutos no espectro real.

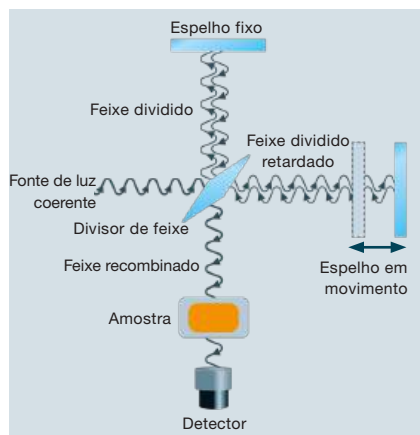


Figura 24 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Sensor de eletrólito sólido

Um princípio de medição especializado, porém amplamente utilizado, para detecção de oxigênio em condições operacionais severas emprega um eletrólito sólido feito de cerâmica de dióxido de zircônio dopada. Camadas condutoras de elétrons são aplicadas como eletrodos nas superfícies opostas do eletrólito. Este eletrólito sólido possui uma propriedade específica: lacunas de oxigênio em sua estrutura cristalina que facilitam a condutividade para os íons de oxigênio em altas temperaturas. As moléculas de oxigênio (O_2) no gás do processo a ser medido são convertidas em íons de oxigênio ao entrarem em contato com o material do eletrodo; a uma temperatura suficientemente alta do eletrólito ($>500\text{ }^\circ\text{C}$), esses íons geram uma corrente através do eletrólito.

Se a concentração de oxigênio for a mesma em ambos os lados, os efeitos são eliminados, e, em concentrações diferentes, um sinal elétrico utilizável é gerado. Se houver um gás de referência com uma concentração conhecida de O_2 de um lado, o conteúdo de O_2 no gás de medição pode ser determinado a partir desse sinal.

Os instrumentos que operam de acordo com este princípio são conhecidos como "sondas de óxido de zircônio" ou "sondas de oxigênio". Geralmente, são instalados diretamente nos gases quentes de escape (princípio in-situ) e, portanto, medem o gás em seu estado original, ou seja, incluindo sua umidade! No entanto, como a umidade

tem um efeito de diluição sobre os outros componentes do gás, as leituras de O_2 dessas sondas geralmente são mais baixas do que as leituras de O_2 medidas, de qualquer método que seja, no mesmo gás de escape, mas a temperaturas mais baixas, ou seja, gases de escape mais secos.

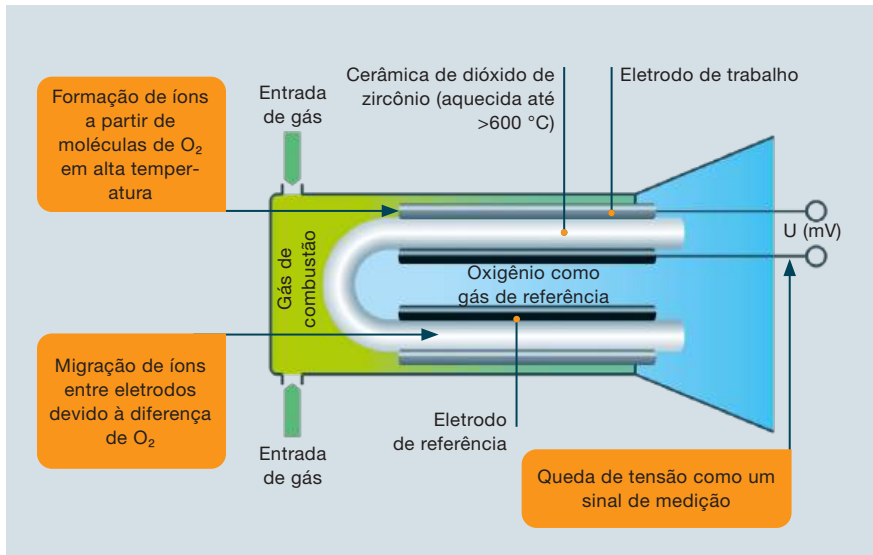


Figura 25 Sensor de óxido de zircônio

3. Tecnologia de análise de gás

As medições de oxigênio feitas com sondas de óxido de zircônio geralmente são mais baixas do que aquelas obtidas por outros métodos no mesmo gás, mas ambos os valores estão corretos! A diferença se deve aos diferentes graus de diluição do gás (temperaturas) durante a medição; quando se referem às mesmas temperaturas do gás (ou seja, a mesma diluição), os valores serão os mesmos!

Esse efeito pode ser utilizado para medir a umidade no gás de combustão (gás de chaminé) utilizando o seguinte procedimento:

- Medir o oxigênio no gás de combustão úmido usando um sensor de ZrO_2
- Resfriar e secar o gás de combustão em um resfriador de gás
- Medir o oxigênio no gás de combustão seco usando um sensor eletroquímico

O conteúdo original de umidade do gás de combustão pode ser calculado a partir da diferença entre as duas medições e a temperatura do resfriador.

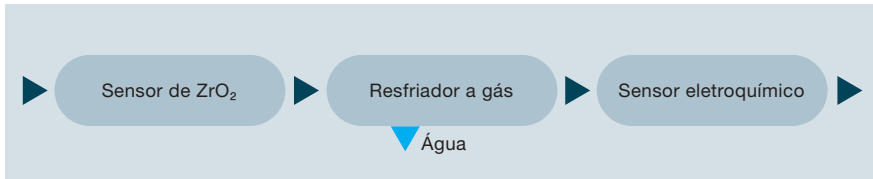


Figure 26 Configuration for measuring moisture in the flue gas

Exemplos de aplicativos

Comentário preliminar

As aplicações de análise de gás descritas abaixo devem ser consideradas como exemplos. O objetivo é demonstrar de forma concisa os diversos processos e métodos e as opções de aplicação de análise de gás associadas (motivos, benefícios). Os respectivos sistemas e métodos podem ser representados apenas esquematicamente e, em alguns casos, de forma abreviada. Na realidade, podem-se assumir desvios dessas representações em todos os casos, devido à variedade de processos, aos construtores de plantas, às condições locais e aos conceitos específicos da empresa operadora. O mesmo se aplica às posições dos pontos de medição indicados.

Além disso, componentes sendo analisados com faixas típicas de concentração são listados. Estes exemplos também são apenas um guia; são baseados na experiência prática do uso de analisadores de gás Testo, embora, muitas vezes, nem todos os componentes possíveis tenham sido medidos. Como resultado, as informações sobre leitura e faixa de medição estão incompletas em algumas ilustrações e, em alguns casos, foram completamente dispensadas.

Em aplicações práticas, a situação real deve sempre ser levada em consideração.

4. Exemplos de aplicação

4.1 Geração de energia

4.1.1 Sistemas alimentados por combustível sólido

Sistemas alimentados por combustível sólido são instalações para gerar calor pela queima de combustíveis sólidos como carvão, lignito, madeira, etc. Normalmente, os combustíveis são substancialmente triturados, o carvão é até moído em carvão pulverizado e alimentado na câmara de combustão, onde é queimado, seja em uma cama fixa, cama fluidizada ou nuvem de poeira suspensa. O ar de combustão

é fornecido por ventiladores potentes, às vezes já misturado com carvão pulverizado. Em termos de concentração de poluentes, os gases de combustão devem cumprir as regulamentações do TI Air, e plantas com uma potência térmica superior a 50 MW devem cumprir as regulamentações da 13ª BImSchV.

Uso da análise de gás, por exemplo, para:

- Ajuste ótimo da planta
- Elaboração do balanço energético
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões nos gases de combustão

Fluxograma de processo e pontos de medição

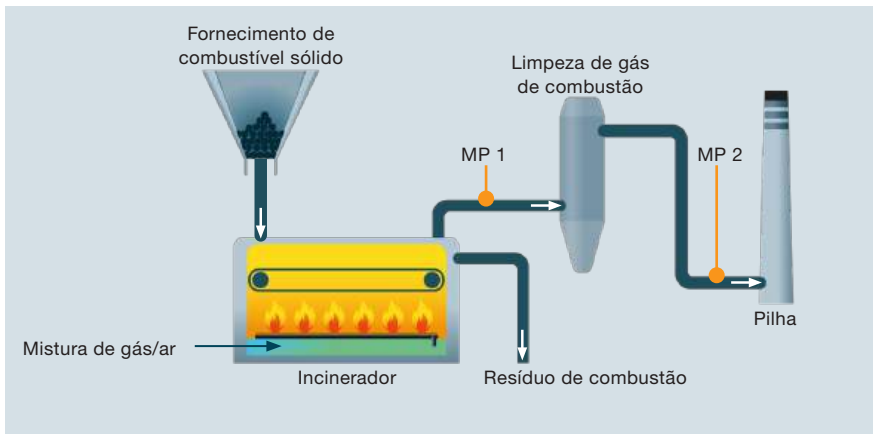


Figura 27 Fluxograma do processo de um sistema alimentado por combustível sólido com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na saída da caldeira para ajuste ótimo do queimador (economia de combustível, eficiência econômica), identificação de bolsões de CO, confiabilidade operacional
- MP 2 no gás limpo na chaminé para monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1	MP 2
CO	150 to 170 mg/m ³	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
NO		
NO ₂		
NO _x (como NO ₂)	650 to 750 mg/m ³	
SO ₂	25 to 35 mg/m ³	
O ₂	7%	
Temperatura do gás	250 °C	

Tabela 29 Valores típicos para um sistema alimentado por combustível sólido

Informações sobre essa aplicação:

1. Podem existir concentrações elevadas de fuligem nos gases de combustão
2. No caso de combustão completa, há consideráveis flutuações nas concentrações de CO
3. Dependendo do combustível, o conteúdo de SO₂ pode variar consideravelmente, e também podem estar presentes HCl e HF

4. Exemplos de aplicação

4.1.2 Instalações alimentadas a gás

Instalações alimentadas a gás são instalações para gerar calor pela queima de combustíveis gasosos como gás natural, gás industrial, gás de alto-forno, etc. Elas facilitam uma combustão praticamente sem poluentes e resíduos. Em plantas de pequeno porte, o combustível e o ar são fornecidos por sopradores de gás, e em plantas maiores por queimadores de alta

pressão. Em termos de concentração de poluentes, os gases de combustão devem cumprir as regulamentações do TI Air, e, quando aplicável, aquelas da 44ª ou 13ª BImSchV.

Uso da análise de gás, por exemplo, para:

- Ajuste ótimo da planta
- Elaboração do balanço energético
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões nos gases de combustão

Fluxograma de processo e pontos de medição

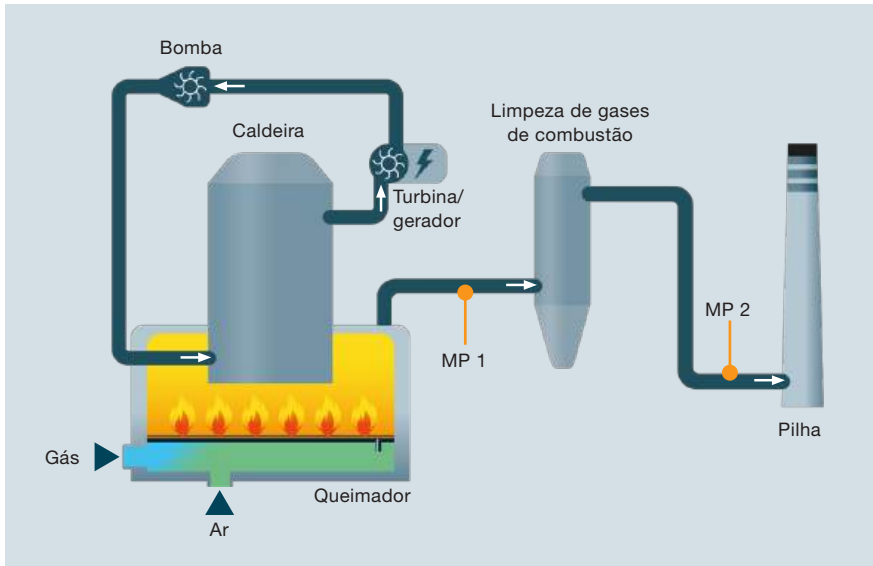


Figura 28 Fluxograma de processo para uma instalação a gás com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na saída da caldeira para ajuste ótimo do queimador
- MP 2 na chaminé para monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1	MP 2
CO	0 to 5 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	9 a 11% (parâmetro guia)	
NO	30 to 50 ppm	
NO ₂	1 to 2 ppm	
NO _x (como NO ₂)		
SO ₂	<5 mg/m ³ (LPG)	
O ₂	2 to 3%	
Temperatura do gás	180 °C	

Tabela 30 Valores típicos para uma instalação a gás

Mais informações podem ser encontradas na descrição da aplicação para sistemas de queimadores e caldeiras no [LINK](#) a seguir ou no white paper “Fatores influentes e parâmetros de medição para sistemas de queimadores e caldeiras” no [LINK](#) a seguir.

4. Exemplos de aplicação

4.1.3 Usinas de turbinas a gás

As usinas de turbinas a gás estacionárias têm sua origem no desenvolvimento de motores de aeronaves e são usadas principalmente para acionar geradores ou máquinas. Elas são usadas principalmente para gerar energia em carga de pico, frequentemente em conjunto com uma caldeira de recuperação de calor para gerar calor térmico. Os gases de combustão são semelhantes aos de instalações a gás ou óleo e, em termos de valores limite de poluentes, devem cumprir as regulamentações do TI Air e, se aplicável, aquelas da 44ª ou 13ª BIm-SchV.

As emissões de NOx estão sujeitas à cláusula de dinamização, que propõe uma combustão de baixo NOx para turbinas a gás e a injeção de água na câmara de combustão. Além do gás natural, o gás de aterro, gás mineiro ou biogás também são usados como combustível. O óleo é frequentemente usado como combustível secundário ou de reserva.

Uso da análise de gás, por exemplo, para:

- Monitoramento das emissões da turbina
- Otimização da combustão
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões nos gases de combustão

Fluxograma de processo e pontos de medição

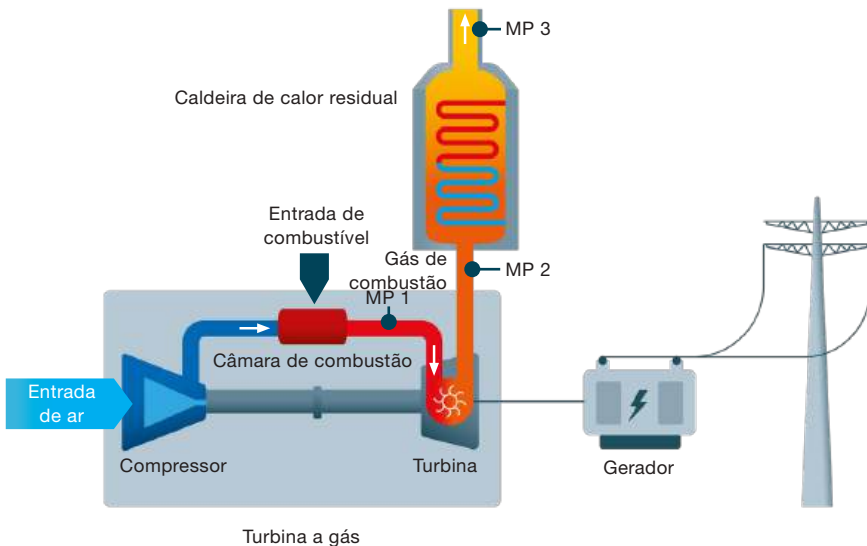


Figura 29 Fluxograma de processo para uma usina de turbina a gás com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 após a câmara de combustão para ajuste ótimo do queimador
- MP 2 após a turbina para determinar as emissões da turbina
- MP 3 após a caldeira de recuperação de calor para monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Parâmetro de medição	Valores típicos		Valores limite
	MP 1	MP 2	MP 3
CO	5 a 330 ppm	0 a 30 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	1 a 5%	1 a 5%	
NO	20 a 220 ppm	20 a 220 ppm	
NO ₂	2 a 20 ppm	2 a 20 ppm	
NO _x (Como NO ₂)	22 a 240 ppm	25 a 80 ppm	
O ₂	12 a 18%	12 a 18%	
Temperatura do gás	1300 a 1400	300 a 400 °C	

Tabela 31 Valores típicos para uma usina de turbina a gás

Informações sobre essa aplicação:
Há um vácuo dinâmico no ponto de amostragem MP 2. Portanto, é crucial que o ponto de amostragem esteja vedado, caso contrário, o ar ambiente será sugado e afetará as medições.

parâmetros de medição para turbinas a gás no [LINK](#) a seguir.

Mais informações podem ser encontradas na descrição da aplicação para turbinas a gás no [LINK](#) a seguir ou no white paper sobre fatores influentes e

4. Exemplos de aplicação

4.1.4 Instalações alimentadas a óleo

Usinas alimentadas a óleo são instalações para gerar calor pela queima de óleos de qualidade variável. Aqui, o combustível e o ar de combustão são levados para a câmara de combustão sob a forma de uma fina névoa através do queimador. Os óleos queimam com quase nenhum resíduo, e a quantidade de poeira de chaminé também é pequena. Em termos de concentração de poluentes, os gases de combustão devem estar em conformidade com

os regulamentos do TI Air — plantas com uma potência térmica de 1 MW a 50 MW devem atender aos regulamentos da 44ª BImSchV, enquanto plantas com potência superior a 50 MW devem seguir os regulamentos da 13ª BImSchV.

Uso da análise de gases, por exemplo, para

- Ajuste ótimo da usina
- Elaboração do balanço energético
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões nos gases de combustão

Fluxograma de processo e pontos de medição

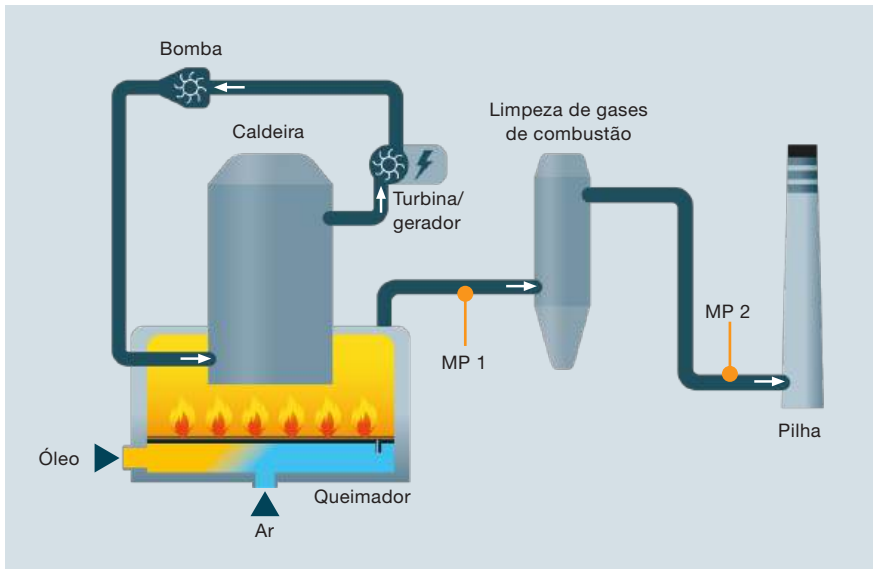


Figura 30 Fluxograma de processo para uma instalação a óleo com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na saída da caldeira para ajuste ótimo do queimador (economia de combustível, eficiência econômica), balanço da planta
- MP 2 nos gases limpos na chaminé para monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1	MP 2
CO	0 a 5 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	13 a 15%	
NO	50 a 150 ppm	
NO ₂	0 a 5 ppm	
NO _x (como NO ₂)		
SO ₂	50 a 100 ppm	
O ₂	2.5 a 3.5%	
Temperatura do gás	200 °C	

Tabela 32 Valores típicos para uma instalação a óleo

4. Exemplos de aplicação

4.1.5 Usina termoeétrica a carvão

Usinas termoeétrica a carvão são usinas térmicas nas quais o carvão (a energia primária) é utilizado para gerar eletricidade (a energia secundária). São usados tanto carvão lignítico quanto carvão mineral como combustível. O carvão é grosseiramente triturado, seco e finamente moído em um moinho de carvão. Juntamente com o ar pré-aquecido no pré-aquecedor de ar, ele é então soprado para a câmara de combustão da caldeira na forma de uma mistura de pó/ar e queimado a uma temperatura de aproximadamente 1000 °C. O gerador de vapor envolve a câmara de combustão e inclui um sistema de tubulação por onde circula a água de alimentação da caldeira. A água é aquecida até se transformar em vapor saturado a uma pressão de aproximadamente 200 bar, e, nesse estado, aciona a turbina. Os gases de combustão escapam para cima, passam pelos vários purificadores de gases e são liberados pela chaminé. O vapor, que se expandiu e resfriou após passar pela turbina, é novamente liquefeito no condensador por meio de resfriamento adicional e retorna ao

circuito sob a forma de água.

Na Alemanha, em termos de sua concentração permitida de poluentes, os gases de combustão das usinas a carvão devem cumprir os regulamentos do TI Air, dependendo da potência térmica, ou, como na maioria dos casos, usinas com potência térmica superior a 50 MW devem atender aos regulamentos da 13^a BImSchV.

Uso da análise de gases, por exemplo, para

- Ajuste ótimo do sistema de combustão (limitação de combustível e emissões)
- Monitoramento do funcionamento de sistemas de limpeza de gases de combustão
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões
- Segurança de pessoal e plantas (risco de incêndio e explosão)

Fluxograma de processo e pontos de medição

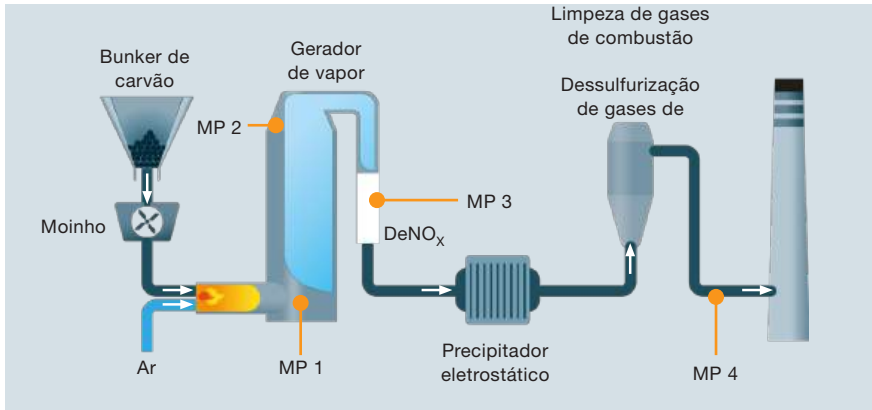


Figura 31 Fluxograma de processo para uma usina elétrica a carvão com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na caldeira para monitoramento da combustão consistente e da relação ar/combustível, identificação de bolsões de CO e verificação da confiabilidade operacional
- MP 2 na saída da caldeira para monitoramento do processo de combustão (eficiência econômica)

- MP 3 para verificação do funcionamento do sistema de desnitração
- MP 4 na chaminé para verificação do cumprimento dos limites de emissões

Informações relacionadas a esta aplicação:

Para medições a jusante do precipitador eletrostático, a sonda deve ser aterrada.

Parâmetro de medição	Valores típicos			Valores limite
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4
CO	10 a 5000 ppm	10 a 5000 ppm		Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂		15 to 18%		
NO				
NO ₂				
NO _x (como NO ₂)		500 a 600 ppm		
SO ₂		500 a 2000 ppm		
O ₂	5 a 9%	5 a 9%		
Temperatura do gás	approx. 1000 °C	approx. 1000 °C		
Umidade		10 a 15%		

Tabela 33 Valores típicos e valores-limite em uma usina elétrica a carvão

4. Exemplos de aplicação

4.1.6 Centrais de cogeração (CHP)

As Centrais de cogeração (centrais de cogeração) são usinas de energia relativamente pequenas e modulares que podem ser usadas nas imediações de um consumidor para gerar eletricidade e calor simultaneamente. Geradores acionados por motores de combustão ou turbinas a gás são usados para gerar eletricidade, enquanto o calor é gerado utilizando o calor residual dos motores primários (calor do fluido de arrefecimento e/ou dos gases de combustão). Isso também é chamado de geração de energia por meio de calor e eletricidade combinados (CHP). Além do óleo diesel, o gás (gás natural, biogás ou gás de aterro) é o combus-

tível preferido.

A potência das usinas de cogeração (CHP) varia de 15 kW a cerca de 30 MW. Os gases de combustão dos motores primários (motores a diesel, motores de ignição por faísca a gás, turbinas a gás) devem cumprir as disposições do TI Air ou da 44ª BImSchV, que exige o uso de sistemas de purificação de gases de combustão (veja a Seção 2.3.5).

Uso da análise de gases, por exemplo, para

- Ajuste ótimo do motor primário
- Verificação do funcionamento do catalisador
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Fluxograma de processo e pontos de medição

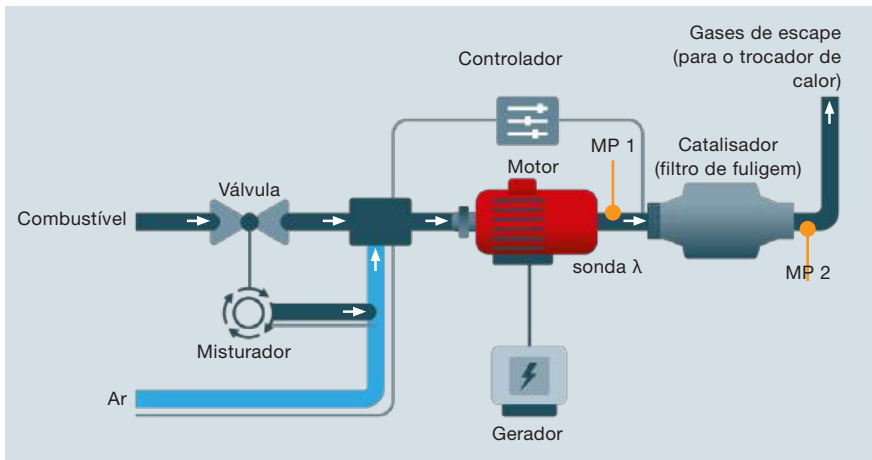


Figura 32 Fluxograma de processo para o motor de uma usina de cogeração (CHP)

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 a montante do catalisador para verificação da eficiência e ajuste do motor
- MP 2 a jusante do catalisador para verificação da eficiência, ajuste do motor e cumprimento dos requisitos legais

Parâmetro de medição	Valores típicos			Limit values MP 2
	MP 1 (Gás natural)	MP 1 (Gás de aterro sanitário)	MP 1 (Oil)	
CO	20 a 40 ppm	350 a 450 ppm	450 a 550 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	10%	13%	7 a 8%	
NO	100 a 300 ppm	100 a 500 ppm	800 a 1000 ppm	
NO ₂	30 a 60 ppm	90 a 110 ppm	10 a 20 ppm	
NO _x (como NO ₂)				
SO ₂		30 ppm	30 a 50 ppm	
O ₂	8%	5 a 6%	8 a 10%	
Temperatura do gás				

Tabela 34 Leituras típicas em uma usina de cogeração / usina de cogeração (ponto de medição 1)

Informações relacionadas a esta aplicação:

O uso de motores controlados por λ pode resultar em valores extremos de H₂, com risco de danificar a célula de medição de CO.

Mais informações podem ser encontradas na descrição da aplicação para usinas de cogeração (CHP) no seguinte [LINK](#).

4. Exemplos de aplicação

4.1.7 Usina de elétricidade de ciclo combinado (Usina a gás e vapor)

Em usinas de eletricidade de ciclo combinado, combustíveis fósseis são queimados para gerar eletricidade por meio da combinação ideal de uma turbina a gás e um processo de turbina a vapor, com alta eficiência e emissões relativamente baixas. Existem várias combinações possíveis; geralmente, uma turbina a gás é operada principalmente com gás natural ou óleo de aquecimento. Os gases quentes de combustão geram vapor d'água de alta

pressão para acionar uma turbina a vapor. Em outros cenários, gases quentes de combustão de um sistema de combustão de carvão pressurizado acionam uma turbina a jusante. Os gases de combustão das usinas de ciclo combinado devem cumprir as disposições respectivas do TI Air.

Uso da análise de gases, por exemplo, para

- Ajuste ótimo da turbina a gás
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

Fluxograma de processo e pontos de medição

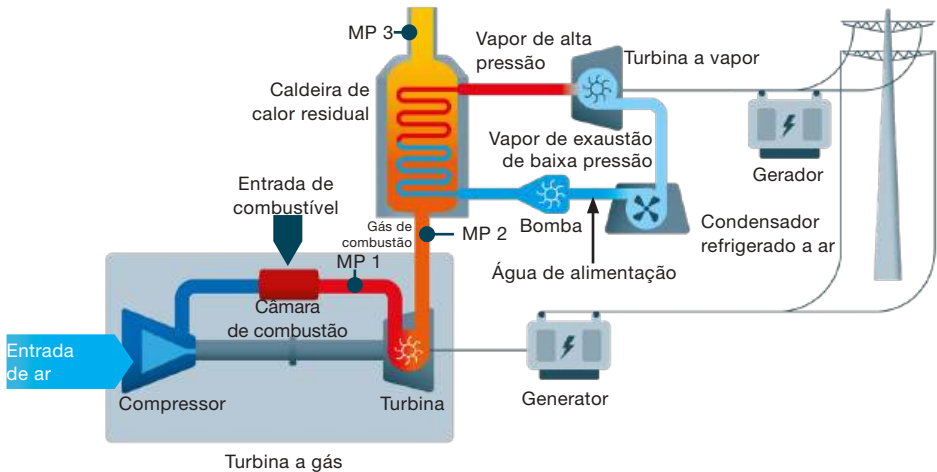


Figura 33 Fluxograma de processo para uma usina de ciclo combinado com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 a jusante da câmara de combustão para ajuste ótimo do queimador
- MP 2 a jusante da turbina para determinação das emissões da turbina
- MP 3 a jusante da caldeira de recuperação de calor para monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

4.1.8 Estações de compressão

Uma estação de compressão é uma instalação em um gasoduto de transporte onde um compressor comprime o gás para compensar as perdas de pressão do pipeline e regular a taxa de fluxo. Os gases tipicamente transportados a longas distâncias dessa forma incluem gás natural, metano, etileno, hidrogênio, amônia e dióxido de carbono. Durante o transporte através de um gasoduto, a pressão do gás diminui gradualmente devido aos efeitos de atrito e precisa ser regularmente elevada ao nível necessário a intervalos de aproximadamente 40 a 100 milhas (64 a 161 km). A colocação de estações de compressão depende do terreno, da acessibilidade e se há outras conexões próximas, como fontes de gás. Mudanças frequentes de elevação e um maior número de fontes de gás exigem mais estações de compressão.

As empresas instalam estações de compressão ao longo de uma rota de pipeline. O tamanho da estação e o número de compressores (bombas) variam dependendo do diâmetro do pipeline e da quantidade de gás a ser transportada. No entanto, os componentes básicos de uma estação são semelhantes.

Quando o pipeline entra na estação de compressão, o gás passa por purificadores de gás, peneiras ou separadores de filtro para remover líquidos ou partículas sólidas do gás antes de entrar no compressor. Embora o pipeline transporte "gás seco", alguma água e líquidos de hidrocarbonetos podem se condensar do fluxo de gás à medida que o gás esfria e passa pelo pipeline. Motores a pistão a gás, turbinas a gás ou motores elétricos são usados para acionar o compressor. O gás natural do pipeline ou combustível líquido, como diesel, é tipicamente usado como fonte de energia. Quase sempre, dois ou mais motores primários com compressores associados são instalados em uma estação de compressão.

Um compressor retira gás natural do pipeline e o comprime antes de reinseri-lo no pipeline. Um resfriador resfria o gás natural que foi aquecido durante a compressão, pois o gás quente tem uma densidade menor, resultando em maiores perdas de pressão, e a alta temperatura pode danificar o isolamento contra umidade do pipeline.

Sistemas pequenos podem ser instalados em edifícios do tamanho de

4. Exemplos de aplicação

uma garagem pré-fabricada, enquanto sistemas maiores exigem instalações do tamanho de um edifício fabril. Dependente da pressão e do diâmetro do pipeline, o gás natural normalmente se move através de um sistema de pipeline a velocidades de até 11 m/s. Em um sistema de pipeline operando com uma pressão nominal de 1000 psi (69 bar) (como o Sistema de Transmissão Nacional do Reino Unido), as estações de compressão comprimem o gás de cerca de 40 a 48 bar (580 a

700 psi) para 65 a 70 bar (950 a 1015 psi). As estações de compressão geralmente operam com uma razão de pressão de 1:1,4.

Uso da análise de gases, por exemplo, para

- Ajuste ótimo da turbina a gás/motor
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissões

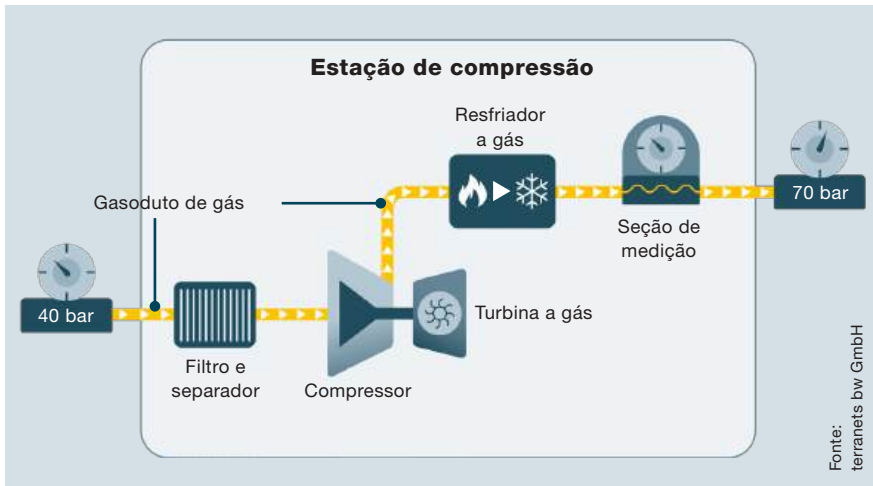


Figura 34 Fluxograma de processo para uma estação de compressão

Vazamento de metano

O metano não queimado entra nos gases de escape por duas vias e pode ser liberado para o ambiente a partir daí. Existem duas razões para isso:

1. Vazamento de metano devido à sobreposição das válvulas

Entre o 4º tempo (exaustão) e o 1º tempo (admissão) do processo de combustão em um motor a gás, há um breve período conhecido como sobreposição das válvulas, quando tanto a válvula de admissão quanto a de exaustão estão abertas. A mistura ar-combustível fornecida pelo turboalimentador empurra os gases de escape para fora do cilindro, mas uma pequena porção da mistura não queimada também entra no trajeto de escape. Por exemplo, em motores a biogás, isso não pode ser evitado, pois a mistura não é formada no cilindro – como em motores a injeção direta de gasolina – mas sim no coletor de admissão antes do turboalimentador. Do ponto de vista do design, é possível buscar uma sobreposição mínima das válvulas, mas é impossível eliminá-la completamente, mesmo em motores turboalimentados

2. Combustão incompleta

Motores a gás de ignição por faísca são altamente comprimidos para alcançar boa eficiência, mas, por outro lado, são necessárias energias de ignição muito altas para acender a mistura ar-combustível. Quando a ignição ocorre perto da vela de ignição, a frente da chama precisa de um certo tempo para percorrer a câmara de combustão e atingir as últimas partes da mistura. Isso pode fazer com que a frente da chama se apague prematuramente, deixando partes da mistura ar-combustível não queimadas. A combustão incompleta faz com que metano não queimado entre nos gases de escape e seja emitido. A combustão incompleta é favorecida pela carga parcial, baixas temperaturas na câmara de combustão e concentrações de gás parcialmente baixas.

Se o metano entrar no escape, um (complexo) processo térmico de pós-combustão pode ajudar a oxidá-lo, produzindo CO_2 e vapor d'água. Um catalisador de oxidação, por outro lado, é eficaz apenas na oxidação de CO e formaldeído.

4. Exemplos de aplicação

4.2 Eliminação de resíduos

4.2.1 Incineração de resíduos

Atualmente, materiais de resíduos sólidos, líquidos e pastosos, como resíduos domésticos, perigosos e industriais, lodo, pneus usados, etc., são principalmente descartados por meio de tratamento térmico (pirólise, incineração), ao invés de serem depositados em aterros, aproveitando a energia liberada durante o processo. Nas plantas de pirólise (veja 4.2.2), os resíduos são largamente decompostos sem oxigênio, gerando gás de pirólise para uso posterior. Mais comuns são as plantas de incineração de resíduos, onde o lixo é incinerado em fornos rotativos, fornos de mufla ou fornos de leito fluidizado a temperaturas de até 1200°C.

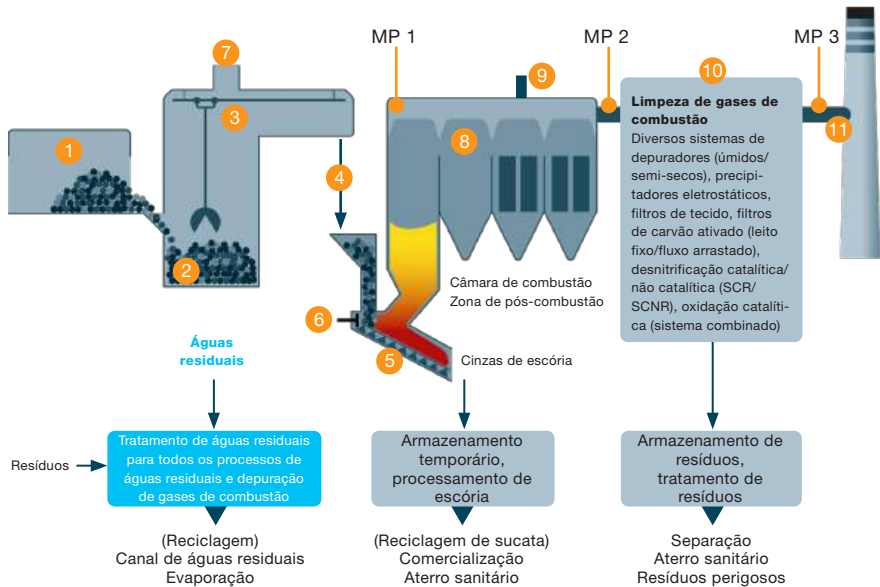
Os gases de exaustão resultantes são limpos em várias etapas antes de serem descarregados na atmosfera.

Na Alemanha, o nível permitido de poluentes é regulado pela específica 17ª BImSchV para plantas de incineração de resíduos.

Uso de análise de gás, por exemplo, para:

- Controle do fornecimento de resíduos (redução da carga nos filtros e níveis de emissão)
- Manutenção constante do valor calorífico bruto
- Monitoramento da função das etapas de limpeza
- Cumprimento dos limites de emissão

Fluxograma de processo e pontos de medição



Legenda:

1. Área de entrega/recebimento
2. Depósito de lixo
3. Guindaste com garra
4. Calha de alimentação
5. Grelha de combustão
6. Pistão de medição

7. Saída de bunker (utilização de ar de combustão)
8. Caldeira a vapor
9. Recuperação de energia (eletricidade, aquecimento)
10. Limpeza de gases de combustão
11. Monitoramento de emissões

Figura 35 Fluxograma de processo para uma planta de incineração de resíduos com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 e MP 2 no forno ou caldeira para otimizar o fornecimento de resíduos (menor carga nos filtros e menores níveis de emissão) e para controlar o valor calorífico bruto constante.

- MP 3 após as etapas de limpeza de gases de exaustão para monitorar a eficácia ou na chaminé para verificar o cumprimento dos limites de emissão e como backup em caso de falha dos equipamentos de medição estacionários.

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1 / MP 2	MP 3
CO	15 a 25 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	10 a 12%	
NO	150 a 200 ppm	
NO ₂	10 a 40 ppm	
NO _x (como NO ₂)		
SO ₂	40 a 60 ppm	
HCl	Até 500 ppm	
HF	Até 30 ppm	
Poeira	2000 a 3000 mg/m ³	
O ₂	8 a 11%	
Temperatura do gás	300 °C	

Tabela 35 Valores típicos para uma usina de incineração de resíduos

Informações relacionadas a esta aplicação:

1. O gás bruto (a montante dos processos de limpeza) frequentemente contém componentes agressivos como HCl, HF e HCN. Um sistema de amostragem aquecido deve ser utilizado para isso. Além disso, a cross-sensibilidade do sensor de SO₂ ao Cl₂ (80%) e HCl (15%) deve ser levada em conta.
2. A composição do combustível (resíduo) frequentemente varia dependendo da entrega. Isso pode resultar em grandes flutuações nas

leituras.

3. Para medições a jusante do precipitador eletrostático, a sonda deve ser aterrada.
4. Para plantas nas quais os resíduos são apenas uma parte do combustível fornecido, os valores limites da 17^a BImSchV devem ser aplicados apenas à porção correspondente do total de combustível! Em relação à quantidade total de gases de exaustão, isso resulta em limites significativamente menores, que devem ser cumpridos e verificados por meio de medição.

4.2.2 Pirólise de resíduos

O termo pirólise (também conhecida como carbonização, desgasificação ou destilação a seco) refere-se ao processo de decomposição de substâncias orgânicas exclusivamente por meio da aplicação de calor na ausência de oxigênio ou outros agentes oxidantes ou reativos. As substâncias mais adequadas são plásticos, pneus usados, borracha, mas também resíduos domésticos. Gás de pirólise e coque de pirólise são gerados como produtos da reação, ambos podendo ser reutilizados para gerar energia. A classificação com base nos níveis de temperatura estabelecidos é a seguinte:

- Pirólise de baixa temperatura (LTP):
 $T < 500^{\circ}\text{C}$
- Pirólise de temperatura média (MTP):
 $T = 500^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$
- Pirólise de alta temperatura (HTP): $T > 800^{\circ}\text{C}$

A pirólise é uma alternativa importante à incineração para a reciclagem de resíduos como pneus usados, madeira de desperdício ou plástico. Muitas dessas plantas estão operando na Ásia, especialmente no Japão, e também foram testadas na Alemanha. Na Alemanha, a Agência Federal do

Meio Ambiente tem uma visão crítica sobre a pirólise de resíduos e considerava razoável o pré-tratamento pirolítico de resíduos apenas sob certas circunstâncias.

As vantagens desse processo em comparação com a incineração de resíduos são:

- O óleo e gás de pirólise podem ser utilizados de forma mais eficiente para geração de energia em motores primários diretos (turbinas a gás, motores de combustão interna).
- Metais podem ser recuperados do coque de pirólise de maneira mais fácil e eficaz; a recuperação e uso de negro de fumo também é considerada benéfica.
- Menores emissões
- Volumes de exaustão significativamente menores (sem ar de combustão!) e as dimensões menores da planta associadas.

No entanto, surgiram problemas e desvantagens na implementação da pirólise de resíduos na prática:

- Reatores e gerenciamento de processo geralmente exigem um alto nível de preparação, com custos de pré-tratamento correspondentes.
- Os gases de pirólise produzidos contêm altas concentrações de alcatrão, o que dificulta a utilização

4. Exemplos de aplicação

de energia.

- A comercialização do coque produzido é difícil devido à baixa qualidade do coque.
- A tecnologia complexa da planta exige altos custos de manutenção.
- Alguns processos utilizam combustíveis fósseis para aquecimento.

As plantas de pirólise de resíduos estão sujeitas aos limites de emissão estabelecidos no TI Air, que são comparáveis aos da 17ª BImSchV; no entanto, o valor de referência de oxigênio é definido mais baixo, em 3%.

Fluxograma de processo e pontos de medição

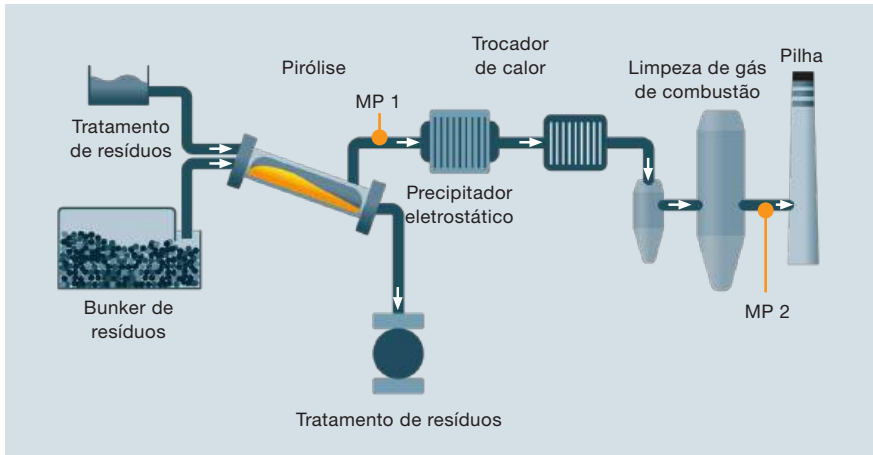


Figura 36 Fluxograma de processo para uma instalação de pirólise de resíduos com pontos de medição

Uso de análise de gás, por exemplo, para:

- Monitoramento da função das etapas de limpeza
- Cumprimento dos limites de emissão

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 nos gases de exaustão do forno de pirólise para monitorar o fornecimento ideal de resíduos e o processo de pirólise
- MP 2 na chaminé para monitorar o cumprimento dos limites de emissão de acordo com as regulamentações nacionais

4.2.3 Pós-combustão térmica

Durante o pós-combustão térmica, também conhecida como limpeza térmica de gases de exaustão, os poluentes atmosféricos inflamáveis presentes nos gases de exaustão são queimados com oxigênio atmosférico a temperaturas entre 700 e 900°C. Isso gera CO₂ e água, mas dependendo dos poluentes, também pode gerar SO₂, HCl e outros. A queima térmica posterior não deve ser confundida com a combustão em chama, que opera a 1300°C, e a combustão catalítica, que ocorre a temperaturas entre 250 e 500°C. Fornos de queima

térmica posterior geralmente exigem uma grande quantidade de energia (fornos suplementares) e, portanto, são usados apenas onde outros processos não oferecem eficiência suficiente ou onde certos constituintes precisam ser destruídos. Na maioria das plantas, as emissões são restritas pelas regulamentações do TI Air.

Uso de análise de gás, por exemplo, para:

- Monitoramento do gás bruto
- Otimização da combustão
- Cumprimento dos limites de emissão

Fluxograma de processo e pontos de medição

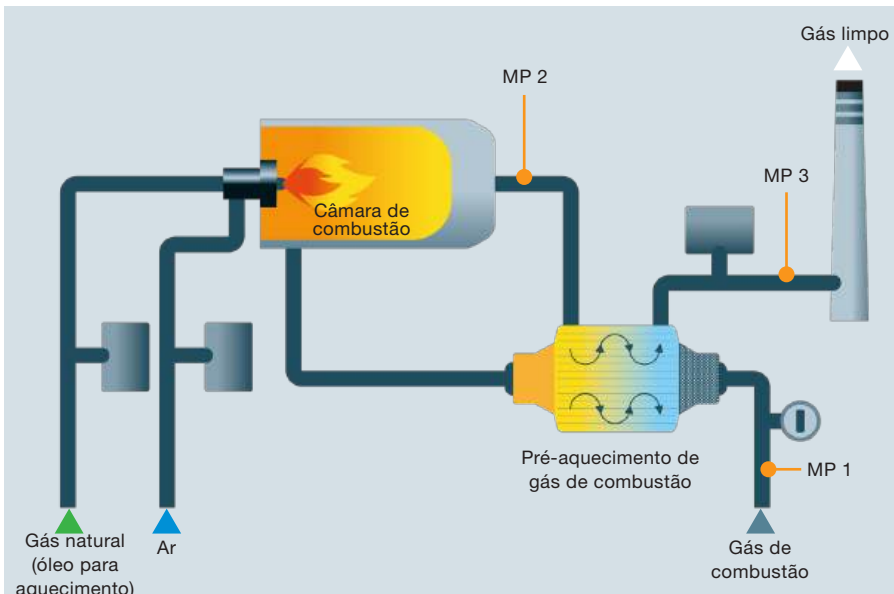


Figura 37 Fluxograma do processo para uma instalação de pós-combustão térmica com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 para monitorar o gás bruto que entra
- MP 2 para otimizar a combustão
- MP 3 para monitorar o cumprimento dos limites de emissão

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 2	MP 3
CO	10 a 100 mg/m ³	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	10 a 12%	
NO		
NO ₂		
NO _x (como NO ₂)	10 a 100 mg/m ³	
SO ₂		
C _{total} I	5 a 20 mg/m ³	
O ₂		

Tabela 36 Valores típicos para uma instalação de pós-combustão térmica

4.3 Indústria de minerais não metálicos

4.3.1 Produção de Cimento

O material conhecido como cimento consiste em clínquer de cimento moído misturado com gesso. É o produto final de um processo de queima em um forno de cimento. As matérias-primas utilizadas são calcário (CaCO_3) e aditivos como argila, cinza ou areia. Os combustíveis utilizados incluem pó de carvão, óleo e materiais residuais como óleo usado, pneus descartados, resíduos domésticos e farelo animal. Os passos essenciais do processo e componentes da planta são: moagem das matérias-primas, secagem do material moído (gerando o que é conhecido como "mistura crua"), aquecimento da mistura crua e

remoção de CO_2 (calcinação), queima em um forno rotativo (a cerca de 1450°C), resfriamento, mistura com gesso e moagem. Os gases de combustão passam por um resfriador evaporativo e as etapas de limpeza necessárias, principalmente um precipitador eletrostático, antes de serem liberados na atmosfera.

Uso de análise de gases, por exemplo, para:

- Otimizar a operação do resfriador evaporativo
- Determinar a eficiência do precipitador eletrostático
- Monitorar na posição da sonda do analisador estacionário
- Garantir conformidade com os limites de emissão

Fluxograma de processo e pontos de medição

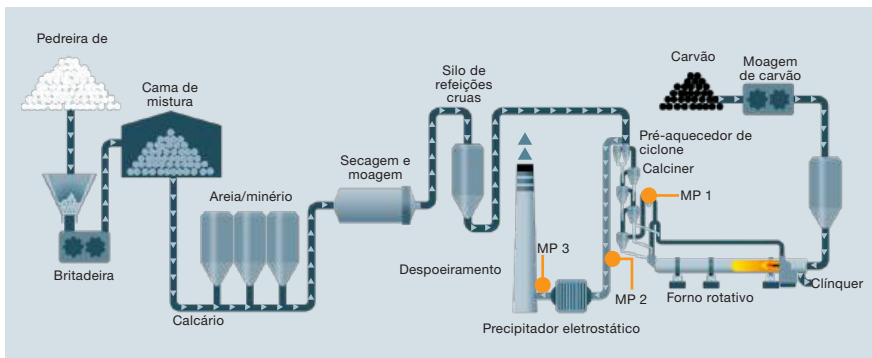


Figura 38 Fluxograma do processo de produção de cimento com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 antes do calcineiro para testar a atmosfera dos gases
- MP 2 a montante do precipitador eletrostático para elaborar um bal-

anço da planta e registrar a eficiência

- MP 3 nos gases limpos na chaminé para monitorar a conformidade com os limites de emissão

Parâmetro de medição	valores típicos		Valores limite
	MP 1	MP 2	MP 3
CO	100 a 500 mg/m ³	100 a 5000 mg/m ³	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	Approx. 20 a 40%	7 a 8%	
NO			
NO ₂			
NO _x (como NO ₂)	200 a 800 mg/m ³	500 a 2000 mg/m ³	
SO ₂	50 a 500 mg/m ³	10 a 1500 mg/m ³	
Poeira	10 a 30 g/m ³	10 a 50 g/m ³	
O ₂	Até 10%		
Temperatura do gás	300 a 400 °C	100 a 150 °C	

Tabela 37 Valores típicos e valores-limite para a produção de cimento

Informações relacionadas à aplicação:

1. Alta carga de poeira no gás bruto e, às vezes, no ar ambiente
2. Concentrações muito altas de CO₂, às vezes fora da faixa de medição (a calcinação leva a uma liberação significativa de CO₂, com até 60-65% das emissões totais de CO₂ na produção de cimento originadas do processo de desacidificação). No entanto, as concentrações dependem fortemente das matérias-primas e combustíveis utilizados.
3. Em altas concentrações de O₂, o sensor de O₂ é cruzado com alta concentração de CO₂!

4. A medição de fluxo não é possível com altas cargas de poeira e altas velocidades de gás
5. A sonda deve ser aterrada quando montada em uma chaminé de tijolos!
6. Dependendo do combustível utilizado, os valores limites para chumbo (em forma de poeira), bem como para tálio e cádmio, também precisavam ser cumpridos.

Mais informações podem ser encontradas na descrição da aplicação para monitoramento e otimização da produção de cimento através do seguinte [LINK](#).

4.3.2 Produção de Cerâmica/ Porcelana

O termo cerâmica descreve produtos feitos de argila e aditivos, solidificados por queima (não por secagem ao ar). As matérias-primas são caulim (um tipo específico de argila), quartzo (SiO_2) e feldspato (rocha composta por vários silicatos). Esses materiais são processados por moinhos, plantas de lama e filtros, bem como peneiras e misturadores, passando pelo processo de conformação e sendo posteriormente queimados em várias etapas. A queima inicial é a cerca de $900\text{ }^\circ\text{C}$ para solidificação e a queima subsequente a cerca de $1400\text{ }^\circ\text{C}$ para

sinterização completa (vidragem). As cores são aplicadas durante a fase de sinterização ou em uma terceira etapa de queima. A temperatura de queima e a composição da atmosfera do gás durante o processo de queima são cruciais para a qualidade (solidez e aparência) do produto final.

Antes de ser liberado na atmosfera, os gases de combustão do forno passam por vários processos de limpeza, e às vezes, inclui o reaproveitamento do material em pó para o processo. A composição dos gases de combustão deve estar em conformidade com as regulamentações do TI Air.

Fluxograma de processo e pontos de medição

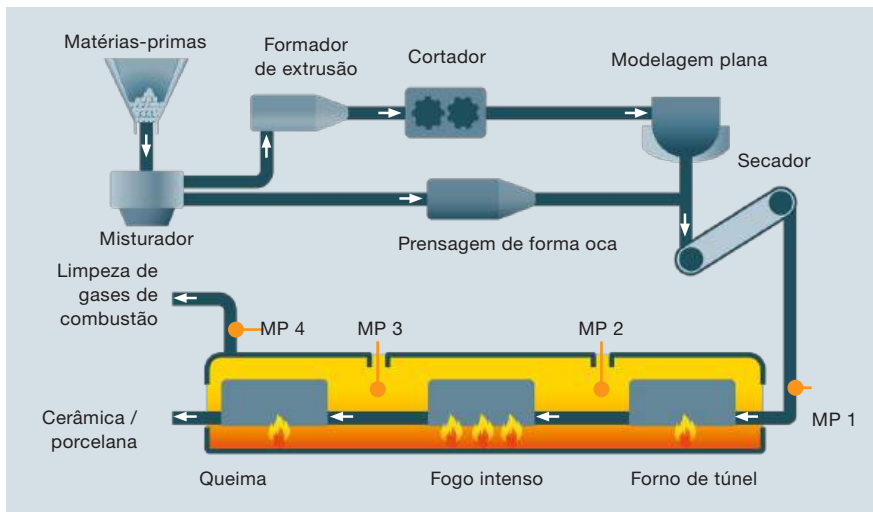


Figura 39 Fluxograma de processo para produção de cerâmica/porcelana com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Uso de análise de gases na produção cerâmica, por exemplo, para:

- Ajuste ótimo dos queimadores
- Garantir a qualidade do produto (composição do gás)
- Monitorar o grau de secagem
- Monitorar a conformidade com os limites de emissão

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1-3 no gás bruto nas estações de combustão para ajuste ideal dos queimadores, alta e constante qualidade do produto (aparência) e para determinar o grau de secagem
- MP 4 nos gases limpos para monitorar o funcionamento das etapas de limpeza e para garantir a conformidade com os valores limite.

Parâmetro de medição	valores típicos		Valores limite
	MP 1 – 3	MP 4	MP 4
CO	40 a 60 ppm	40 a 60 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂			
NO			
NO ₂			
NO _x (Como NO ₂)	30 a 40 ppm	30 a 40 ppm	
SO ₂	700 a 1300 ppm	450 a 900 ppm	
O ₂	13 a 16%	13 a 16%	
Umidade	10 a 14%	10 a 14%	

Tabela 38 Valores típicos e valores limite para produção de cerâmica

Informações relacionadas a esta aplicação:

Componentes agressivos (HF, HCl) podem estar presentes nos gases de combustão! Recomendamos, portanto, o uso de um sistema de amostragem de gás aquecido.

4.3.3 Olaria

O tijolo é um termo genérico para materiais de construção feitos de argila queimada, geralmente fabricados em fábricas de tijolos, diretamente no local de depósito da matéria-prima. As matérias-primas são preparadas por mistura, trituração e ajuste do conteúdo de umidade, passando pelo processo de moldagem e secagem antes de serem finalmente colocadas em vagões e queimadas, geralmente em fornos contínuos de túnel a 900

°C a 1300 °C (sinterização). Os gases de combustão contêm principalmente poeira, mas também óxidos de enxofre e nitrogênio, e possivelmente fluoreto de hidrogênio (HF).

Uso de análise de gases na produção de tijolos, por exemplo, para:

- Ajuste ótimo dos queimadores (economia de energia)
- Garantir a qualidade do produto
- Determinar o grau de secagem
- Monitorar a conformidade com os valores limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

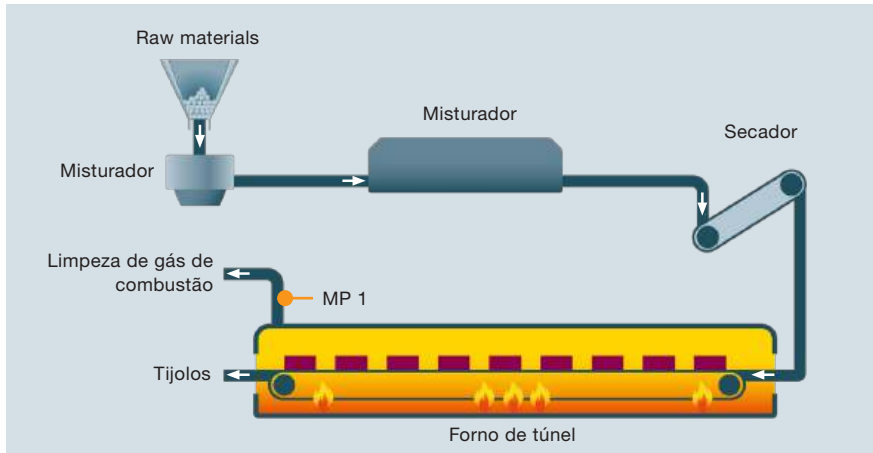


Figura 40 Fluxograma do processo de produção de tijolos com ponto de medição

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 no forno de túnel para ajuste ótimo dos queimadores, alta e constante qualidade do produto (aparência) e para determinar o grau de secagem
- MP 2 nos gases limpos (não mostrado na imagem!) para monitorar a função das etapas de limpeza e para garantir a conformidade com os valores limite.

4. Exemplos de aplicação

4.3.4 Produção de Vidro

A produção de vidro inclui uma ampla variedade de produtos diferentes, com ênfase principalmente em vidro soprado (para recipientes e diversos produtos de consumo) e vidro plano, que é refinado em produtos de maior qualidade.

As matérias-primas variam consideravelmente dependendo do produto; geralmente, areia de quartzo, soda (Na_2CO_3) e cal (ou calcário) são importantes, com substâncias específicas (como óxidos metálicos) sendo adicionadas. A areia serve como componente principal, o calcário fornece estabilidade e o pó de soda reduz o ponto de fusão. O vidro reci-

clado também é amplamente utilizado. As matérias-primas são trituradas, misturadas e alimentadas no forno de fusão como um conglomerado. Faz-se a distinção entre fornos tipo pote para operação descontínua e fornos de tanque ou túnel para operação contínua, com temperaturas de fusão geralmente acima de $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Os detalhes do forno e da queima variam dependendo da aplicação. Fontes de energia incluem gás natural, óleo de aquecimento e eletricidade. Aditivos como o ácido nítrico (HNO_3) são usados para homogeneizar o derretimento.

Os gases de combustão contêm principalmente poeira, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio (resultantes das altas temperaturas), bem como

Fluxograma de processo e pontos de medição

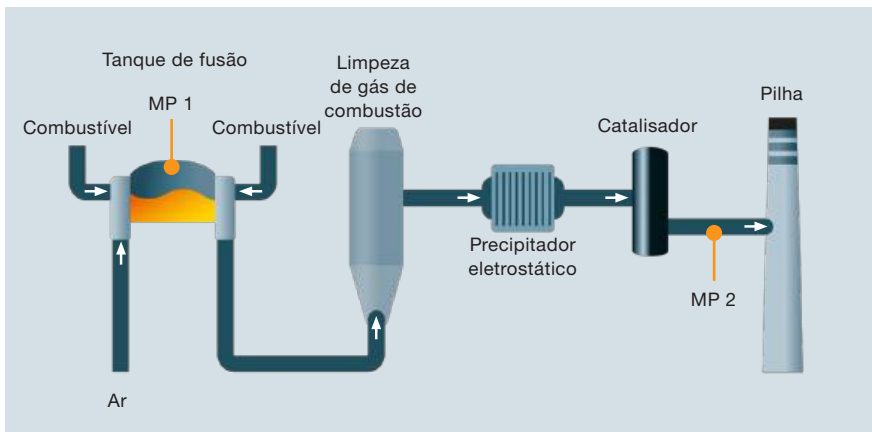


Figura 28: Fluxograma do processo para planta de produção de vidro com pontos de medição

compostos de flúor e enxofre das matérias-primas ou vidro reciclado. Eles devem passar por várias etapas de limpeza antes de serem liberados na atmosfera, e sua composição deve estar em conformidade com as regulamentações do TI Air.

Uso de análise de gases na produção de vidro, por exemplo, para:

- Ajuste ótimo dos queimadores (economia de energia)
- Garantir a qualidade do produto
- Aumentar a vida útil da planta
- Monitorar a conformidade com os valores limite

Pontos de medição e tarefas de medição:

- MP 1 no forno de fusão para aumentar a vida útil, garantir alta e consistente qualidade do produto e reduzir o consumo de energia.
- MP 2 no gás limpo a montante dos filtros para monitorar o funcionamento das etapas de limpeza e para monitorar o cumprimento dos limites estabelecidos.

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1 no forno de túnel	MP 2 a montante dos filtros
CO	0 a 1000 ppm	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	35 a 45%	
NO	800 a 3000 ppm	
NO ₂	0 a 100 ppm	
NO _x (Como NO ₂)		
SO ₂	0 a 5000 ppm	
Poeira		
Compostos de cloro		
Compostos de flúor		
O ₂	0 a 9%	
Temperatura do gás	1400 a 1600 °C	

Tabela 39 Valores típicos e valores-limite para a produção de vidro

4. Exemplos de aplicação

Informações práticas relacionadas a esta aplicação:

1. O gás de combustão pode ser muito úmido, resultando em condensação abrupta na sonda de amostragem. Portanto, é essencial utilizar um sistema de amostragem de gás aquecido!
2. As concentrações de CO_2 são muito altas e, portanto, estão fora da faixa de medição.
3. O conteúdo de oxigênio nas proximidades da planta pode cair abaixo de 21%. A mangueira de ar fresco deve, portanto, ser direcionada para o exterior.

4. A temperatura nas proximidades da planta pode subir até 70°C .

5. O conteúdo de pó no gás bruto é tipicamente muito fino e pode atingir 400 mg/m^3 .

Mais informações podem ser encontradas em nosso exemplo de aplicação para análise de gases de combustão em fornos de fusão de vidro através do seguinte [LINK](#).

4.3.5 Produção de cal

O termo "cal" em si não é específico, sendo utilizado para descrever diversas substâncias. Aqui, o que se refere é a cal viva ou cal queimado (CaO), que é produzida pela calcinação da calcita (CaCO₃) a temperaturas de 700-900°C. São utilizados diferentes tipos de fornos de operação contínua (fornos verticais, fornos de eixo anular, fornos rotativos) para a queima da cal. Estes diferem em relação à forma como a calcita e o combustível (coca e gás) são alimentados, além do design das câmaras de combustão. A cal viva ou cal queimado é utilizada, por exemplo, como aditivo na indústria de ferro e aço, na indústria química, na indústria de papel e materiais de construção, e especialmente no campo da

proteção ambiental para limpeza de gases de escape (dessulfurização). Antes de ser liberado na atmosfera, os gases de escape do forno passam por diversos processos de limpeza, incluindo um scrubber. Sua composição deve cumprir com as regulamentações do TI Air.

Uso da análise de gases na produção de cal, por exemplo, para:

- Otimização de processos por meio da análise dos gases de escape (economia de coca no caso de fornos verticais, economia de gás natural no caso de fornos anulares)
- Monitoramento de valores elevados de CO relacionados ao processo
- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissão

Fluxograma de processo e pontos de medição

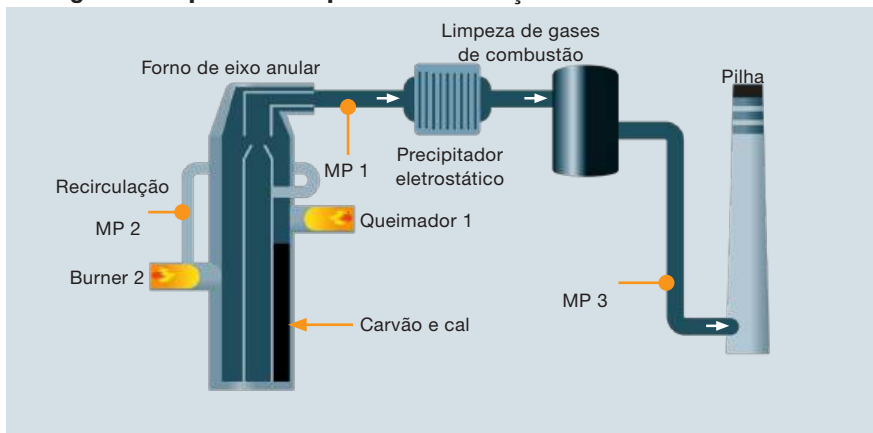


Figura 42 Fluxograma do processo de produção de cal com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 no gás bruto para verificação de eficiência (redução de custos, custos de coca) e proteção ambiental (altas concentrações de CO)
- MP 2 no gás bruto na recirculação para determinar o balanço da planta
- MP 3 no gás limpo para monitorar as etapas de limpeza e o cumprimento dos valores limites

Parâmetro de medição	Valores típicos		Valores limite MP 3
	MP 1 e 2	MP 1 e 2	
Tipo de forno	Forno de eixo	Forno de eixo anular	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
Combustível	Vários coques	Gás natural	
CO	6 a 7%	1.5 a 2%	
CO ₂	28 a 32%	24 a 26%	
NO			
NO ₂			
NO _x	200 ppm	200 ppm	
SO ₂	300 ppm	100 ppm	
HF			
Poeira			
O ₂ seco	5 a 6%	5.5 a 6%	
O ₂ úmido	2 a 3%	5 a 5.5%	
Umidade	5 a 8%	5 a 8%	

Tabela 40 Faixas de medição para produção de cal

Informações práticas relacionadas a essa aplicação:

1. Cuidado com a alta carga de poeira no ar ambiente
2. Podem existir altas temperaturas radiantes, o que pode exigir que o equipamento seja blindado.

4.4 Indústria de metais/minérios

4.4.1 Processamento de minérios (sinterização)

Os metais são extraídos de seus respectivos minérios metálicos por meio de processos de redução. Antes disso, esses minérios precisam ser processados, e um método frequentemente utilizado para isso é a sinterização ou a produção de pelotas (aglomerados de minério sinterizado). As matérias-primas (minérios) são primeiramente moídas e misturadas com aditivos, sendo então transformadas em pelotas. Estas passam então por um forno de grelha com temperaturas acima de 1000 °C, onde se aglomeram para formar peças sólidas por meio de fusão

superficial. Nessa forma, o minério é então adequado para processamento posterior, por exemplo, em um alto-forno para produzir ferro. Durante o processo de sinterização, são geradas emissões de partículas e gases.

O pó também pode conter substâncias como zinco, chumbo ou cádmio. As emissões gasosas podem incluir SO₂ e NOx em particular, mas também compostos de flúor e cloro. Em termos de valores-limite para poluentes, as plantas de sinterização devem cumprir as normas da TI Air.

Utilização de analisadores de gases, por exemplo, para

- Gestão operacional otimizada (custos de energia)
- Monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

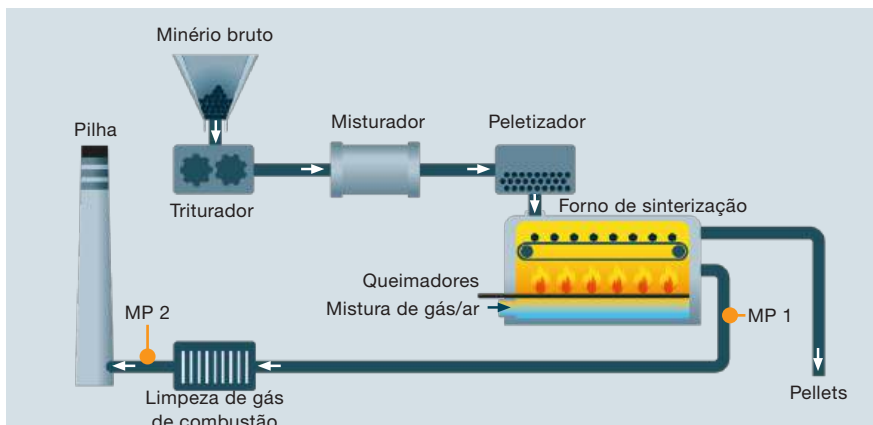


Figura 43 Fluxograma do processo de produção de pelotas (sinterização) com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 no gás bruto a jusante do forno para otimização do forno
- MP 2 no gás limpo na chaminé para monitorar a função de limpeza dos gases de combustão e para monitorar os valores-limite

Parâmetro de medição	Valores típicos	Valores limite
	MP 1	MP 2
Poeira	Até 3000 mg/m ³	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
Compostos de cloro	20 a 60 mg/m ³	
Compostos de flúor	2 a 10 mg/m ³	
NO _x	150 a 350 mg/m ³	
SO ₂	500 a 3000 mg/m ³	
Temperatura	1000 a 1200 °C	

Tabela 41 Valores típicos e valores limite em uma planta de sinterização

4.4.2 Produção de ferro-gusa (alto-forno)

O ferro-gusa é obtido pela redução (desoxigenação) do minério de ferro em um alto-forno ou por redução direta, utilizando coque, gás natural ou carvão como agentes redutores. O processo de redução direta é um método em que minérios contendo ferro são reduzidos a ferro-esponja sólido utilizando gases redutores (principalmente H_2 e CO) a baixas temperaturas (800–1200 °C), sem fusão. No processo de alto-forno, o minério processado (pelotas, sinter) e os aditivos (cal, ferroligas como alumínio, cromo, manganês), juntamente com o coque, são alimentados no alto-forno por cima (através do topo do forno). Por baixo,

um jato de ar quente entra como um transportador de energia adicional. A mistura de gases quentes de sopro e de redução sobe (a temperaturas de até 2000 °C), em contracorrente às matérias-primas que afundam, e é extraída no topo do forno como gás de alto-forno. Juntamente com a escória, o ferro-gusa fundido acumula-se no fundo do forno, sendo então removido em intervalos regulares e geralmente enviado a uma siderúrgica para processamento posterior. O gás de combustão (aqui denominado gás de alto-forno) ainda contém grandes quantidades de CO_2 e está carregado de poeira e, após a despoeiramento, é utilizado para gerar ar quente e aquecer fornos de laminação, por exemplo, ou é queimado em usinas de energia. Somente após esse uso

Fluxograma de processo e pontos de medição

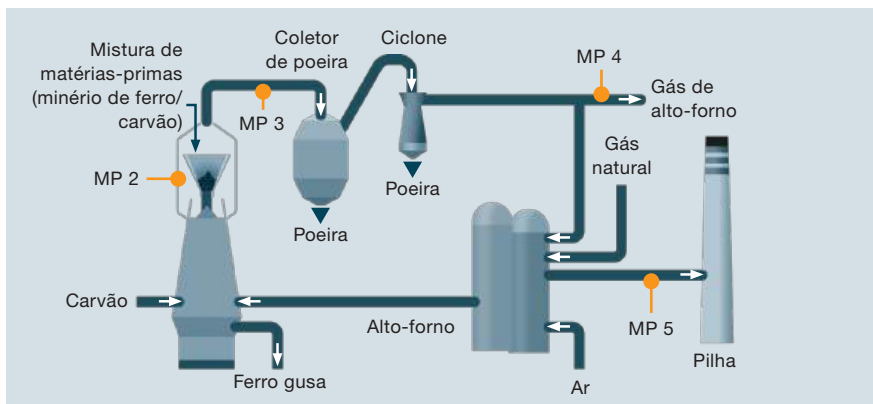


Figura 44 Fluxograma do processo de produção de ferro gusa (w) com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

posterior, ele atinge a atmosfera, desde que esteja em conformidade com as normas da TI Air.

Utilização da análise de gases na produção de ferro-gusa, por exemplo, para

- Gestão operacional otimizada (uso de energia e matéria-prima)

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 (não mostrado na ilustração!) está localizado dentro do silo de matéria-prima para monitorar a concentração de CO
- MP 2 na tubulação ascendente do alto-forno como parâmetro de referência para a operação do forno
- MP 3 no tubo de descida, a montante do coletor de pó, para determinar o equilíbrio da planta e para a prevenção de riscos de incêndio

- Monitoramento da composição do gás de alto-forno para seu uso posterior
- Monitoramento da planta quanto a vazamentos de CO
- Monitoramento do cumprimento dos valores-limite

devido ao CO no coletor de pó

- MP 4 na descarga de gás do alto-forno a jusante do coletor de pó para monitorar a composição do gás do alto-forno (equilíbrio da planta; uso posterior do gás do alto-forno)
- MP 5 na chaminé para monitorar o cumprimento dos valores-limite
Observação: No ponto de medição 2, existem requisitos rigorosos relacionados à temperatura e ao pó para a extração de gás (fabricante especializado).

Parâmetro de medição	Valores típicos				Valores limite
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5
CO	0 a 50 ppm	0 a 50%	0 a 50%	0 a 50%	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂		0 a 30%	0 a 30%	0 a 30%	
CH ₄		0 a 4%	0 a 1%	0 a 1%	
H ₂		0 a 15%	0 a 10%		
Poeira			50 a 100 g/m ³	1 a 10 g/m ³	
Temperatura		Até 1300 °C	100 a 500 °C	100 a 500 °C	

Tabela 42 Valores típicos e valores-limite para produção de ferro gusa (alto-forno)

Nota: No ponto de medição 2, há requisitos rigorosos relacionados à temperatura e poeira para extração de gás (fabricante especializado).

4.4.3 Produção de aço bruto

O aço bruto é produzido durante a primeira etapa de processamento do ferro-gusa por meio da oxidação com oxigênio em conversores. Os aproximadamente 4% de carbono ainda contidos no ferro-gusa são reduzidos a menos de 1% por meio da reação com oxigênio. O aço é refinado pela adição de níquel ou cromo para influenciar suas propriedades e, assim, formar diversas ligas de aço. O processo de refino (fase de sopra) gera gás do conversor, um gás de combustão com alto teor de CO, que é

posteriormente utilizado na siderúrgica após a remoção do teor de poeira. Somente após esse uso adicional é que ele atinge a atmosfera, desde que esteja em conformidade com as normas da TI Air.

Uso da análise de gases na produção de aço bruto, por exemplo, para

- Gerenciamento operacional ideal do conversor
- Monitoramento da composição do gás do conversor para uso posterior
- Monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

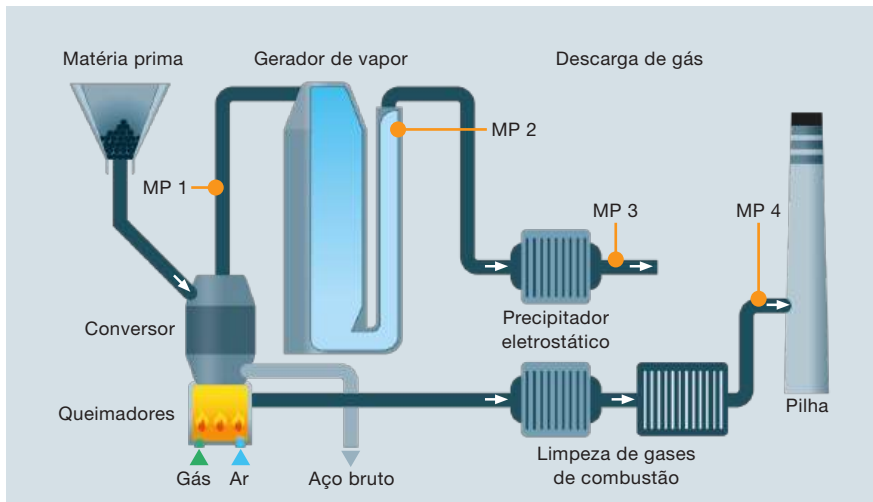


Figura 45 Fluxograma do processo de produção de aço bruto com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 a jusante do conversor para otimização do processo
- MP 2 a jusante do trocador de calor para otimização do processo
- MP 3 a montante da descarga de gás para monitoramento da composição do gás
- MP 4 na chaminé para monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Parâmetro de medição	Valores típicos			Valores limite
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4
CO	0 a 80%	0 a 80%	0 a 80%	Valores limite de acordo com as regulamentações nacionais
CO ₂	0 a 40%	0 a 20%	0 a 20%	
H ₂	0 a 10%	0 a 10%	0 a 10%	
NO _x (Como NO ₂)			10 a 100 mg/m ³	
SO ₂				
O ₂	0 a 1%	0 a 1%	0 a 1%	
Poeira	10 a 50 g/m ³	10 a 50 g/m ³	20 a 50 g/m ³	
Temperatura	aprox. 1600 °C	aprox. 150 °C		

Tabela 43 Valores típicos e valores-limite para a produção de aço bruto

Mais informações podem ser encontradas no exemplo de aplicação para monitoramento e otimização na produção de metal e aço através do seguinte [LINK](#).

4.4.4 Usinas de coque

As usinas de coque são plantas de refino térmico de carvão mineral, onde o carvão mineral é aquecido a temperaturas de 800 °C ou mais em um processo de destilação a seco, na ausência de ar (pirólise). O objetivo desse processo de coqueificação é produzir coque para uso industrial, principalmente na metalurgia. O coque apresenta um teor de carbono muito alto (> 97%) e um nível muito baixo de substâncias voláteis. O processo gera gás de coqueria, que é posteriormente utilizado.

O carvão de uma qualidade especial é destilado ("cozido") na coqueria em atmosfera seca por cerca de 15 horas e, em seguida, descarregado em um processo de resfriamento. O método de têmpera úmida usado no passa-

do foi amplamente substituído pelo resfriamento a seco em um resfriador de poço. Isso permite a recuperação de calor por meio de uma caldeira de recuperação de calor, com redução nas emissões de poluentes. Além da poeira, os poluentes relevantes são principalmente SO₂, NO_x, CO e componentes orgânicos. Em termos dos valores-limite permitidos, os gases de combustão devem estar em conformidade com as normas da TI Air.

Uso de analisadores de gás, por exemplo, para:

- Otimização do processo de coqueificação
- Análise do gás de coque antes de seu uso posterior
- Monitoramento da função de limpeza dos gases de combustão e monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

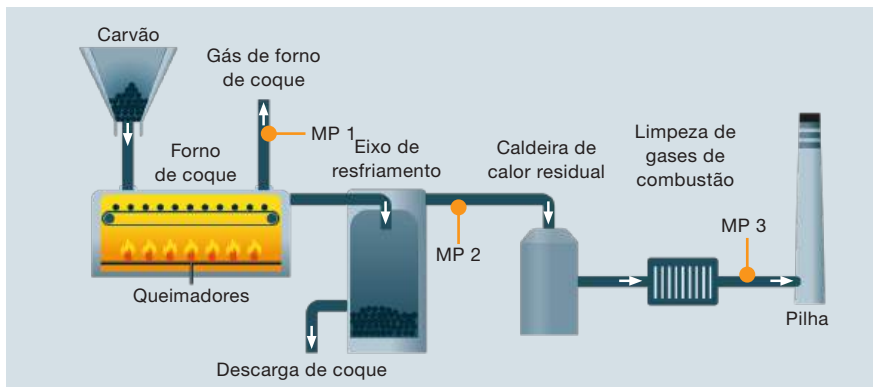


Figura 46 Fluxograma de processo para uma coqueria com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na descarga de gás para avaliação do gás de coque
- MP 2a jusante do poço de resfriamento para otimizar o processo de secagem do coque
- MP 3 na chaminé para monitoramento do cumprimento dos valores-limite

4.4.5 Produção de alumínio

A matéria-prima do alumínio é a bauxita, um minério que contém aproximadamente 30-54% de óxido de alumínio. O alumínio é produzido pela eletrólise do óxido de alumínio. Para isso, a temperaturas de aproximadamente 950 °C, a alumina é dissolvida em criolita fundida, na qual são mergulhados ânodos de carbono. Quando uma tensão CC é aplicada, o óxido de alumínio é decomposto em alumínio e oxigênio. O alumínio acumula-se no fundo do tanque, é descarregado e posteriormente refinado em fornos de fusão e, finalmente, fundido em barras, por exemplo. Existem diferentes

tipos de fornos eletrolíticos, a maioria dos quais hoje em dia são fornos totalmente fechados. A eletrólise gera principalmente poeira e compostos de flúor, bem como SO₂ e CO₂, resultantes da combustão dos eletrodos de carbono. As poeiras dos filtros são geralmente recicladas. As emissões permitidas devem estar em conformidade com os regulamentos da TI Air.

Utilização da análise de gases na produção de alumínio, por exemplo. para

- Gerenciamento otimizado do forno
- Monitoramento do reator de adsorção (limpeza de gás quente)
- Monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

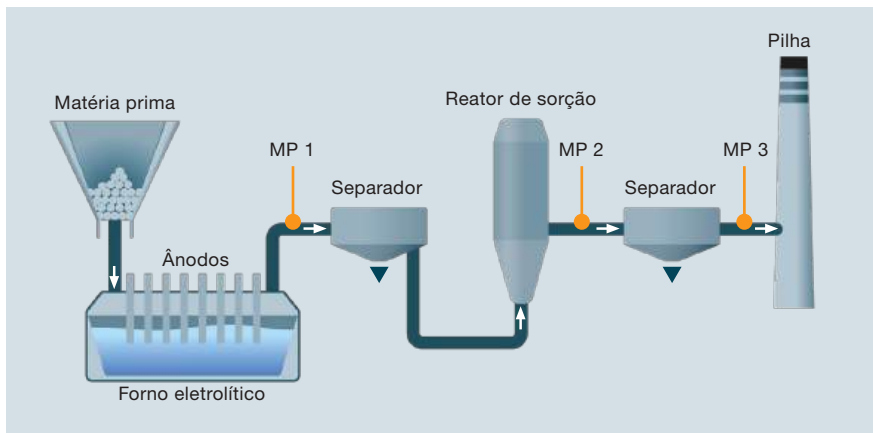


Figura 47 Fluxograma do processo de produção de alumínio com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 a jusante do tanque de fusão para otimização da planta
- MP 2 a jusante do reator de sorção
- MP 3 na chaminé para monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Mais informações podem ser encontradas em nosso exemplo de aplicação para monitoramento e otimização da produção de alumínio através do seguinte [LINK](#).

4.4.6 Tratamento térmico de superfície

Tratamento térmico ou tratamento térmico é um termo coletivo para todos os processos nos quais peças predominantemente metálicas são submetidas a uma mudança de temperatura para atingir propriedades específicas da peça, particularmente sua estrutura cristalina.

A composição da atmosfera circundante é de vital importância aqui:

- Em alguns processos, como revenimento ou têmpera, a oxidação da superfície por O_2 , CO_2 ou H_2O deve ser evitada durante o tratamento térmico. Isso é obtido pela manutenção de uma atmosfera de gás neutra e controlada, que não apresenta efeitos oxidantes ou redutores.
- Em outros processos, além do tratamento térmico, o objetivo é influenciar especificamente as propriedades da superfície por meio de uma composição atmosférica específica. Durante a cementação, por exemplo,

o carbono é implantado na superfície e, durante o processo de carbonitreção, o nitrogênio também é.

- Para certas aplicações, a remoção de carbono da superfície por meio da descarbonetação também é necessária.

O tratamento térmico é realizado em fornos, em operação descontínua ou contínua (correia contínua) a 800-1200 °C, com as peças processadas descarregadas em um banho de têmpera. A vedação do forno (retorta) em relação à correia transportadora, a inserção do gás de tratamento definido e o monitoramento da planta quanto a vazamentos são procedimentos essenciais para o funcionamento correto da planta.

Utilização da análise de gases, por exemplo, para:

- Monitoramento da atmosfera do forno
- Análise do gás de tratamento e do gás de aquecimento

4. Exemplos de aplicação

Fluxograma de processo e pontos de medição

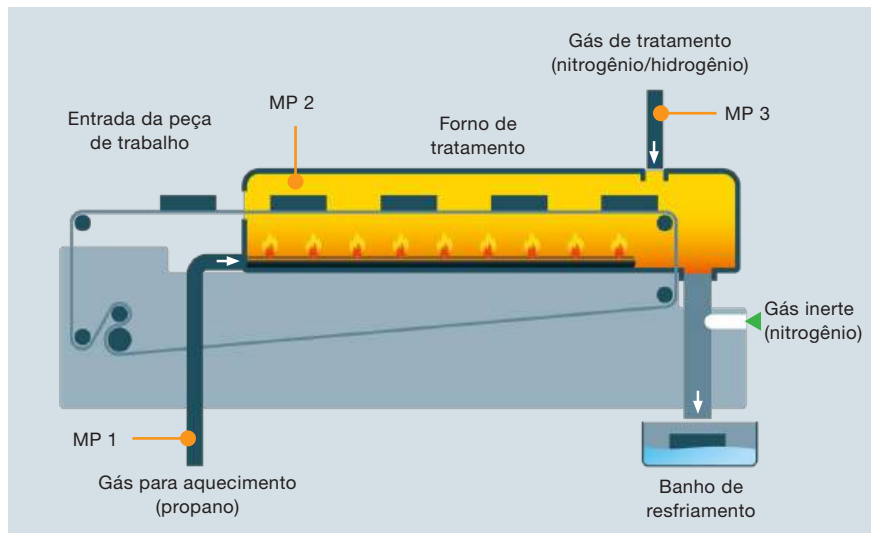


Figura 48 Diagrama de um forno para tratamento de superfície com pontos de medição

Pontos de medição e tarefas de medição

- MP 1 na entrada do gás de aquecimento para monitoramento do gás de aquecimento
- MP 2 no forno para monitoramento da atmosfera do forno
- MP 3 na entrada do gás de tratamento para ajuste e monitoramento

Os componentes mais comuns para análise são O_2 , CO , CO_2 e CH_4

4.5 Indústria Química

4.5.1 Aquecedores de Processo

Quase todas as plantas químicas e petroquímicas exigem altas temperaturas para produzir produtos finais ou intermediários, na maioria dos casos utilizando vapor superaquecido. Os sistemas de queima necessários para isso são chamados de aquecedores de processo. A figura abaixo descreve esse tipo de sistema, no qual o vapor superaquecido é gerado em um aquecedor de processo e utilizado no reator de parede dupla para estabelecer a temperatura de reação. Esses

tipos de aquecedores devem estar em conformidade com as normas da TI Air ou do 13º BImSchV.

Utilização de análise de gases, por exemplo:

- Para o ajuste ideal do queimador (economia de combustível e redução de emissões)
- Para otimizar a combustão
- Para monitorar o cumprimento dos limites de emissão

Fluxograma de processo e pontos de medição

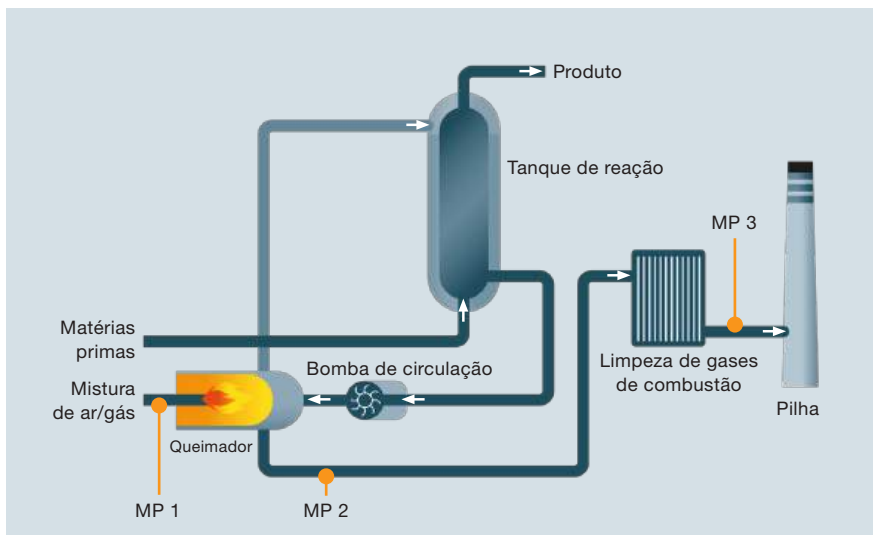


Figura 49 Fluxograma de processo para um aquecedor de processo com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

4.5.2 Refinarias

As refinarias (ou, para ser mais exato, as refinarias de petróleo) compreendem uma série de plantas de processamento nas quais produtos petrolíferos comercializáveis, como gasolina, óleo diesel, plásticos, fibras, detergentes, solventes, entre muitos outros, são produzidos a partir do petróleo bruto em diversas etapas de processamento. Todas essas etapas de processamento operam em altas temperaturas, o que requer o uso de inúmeras usinas de combustão (ver 4.5.1). O processamento do petróleo bruto inicia-se com a destilação à pressão atmosférica e a aproximadamente 350 °C, gerando, por exemplo, gasolina, petróleo e gasóleo (óleo diesel); o resíduo é composto por componentes que podem ser utilizados como óleo combustível pesado ou posteriormente processados em uma destilação a vácuo a aproximadamente 400 °C, por exemplo, para produzir óleo lubrificante ou betume.

No entanto, a grande variedade de produtos demandada pelo mercado não pode ser obtida apenas por meio da destilação. Para isso, são utilizados processos especiais; Estas decompõem os destilados pesados de petróleo obtidos durante o processa-

mento posterior em hidrocarbonetos mais leves (unidades de craqueamento) e, posteriormente, os refinam (unidades de reforma). Ambos os processos são realizados utilizando catalisadores a temperaturas em torno de 500 °C ou superiores, frequentemente utilizando processos de leito fluidizado.

A figura abaixo descreve as colunas de destilação, a descarga de produtos acabados e brutos, bem como o tratamento de gases de combustão (gás residual) por meio de incineração e limpeza.

As refinarias são fontes de emissão de poluentes como SO₂, NO_x, H₂S, material particulado e diversos tipos de hidrocarbonetos. As emissões provêm tanto de fontes fugitivas quanto de chaminés (principalmente processos de combustão). A redução de emissões é alcançada pelo uso de combustíveis de baixa emissão, medidas de combustão e plantas de limpeza de gases de combustão. Na Alemanha, por exemplo, as refinarias e suas unidades individuais estão sujeitas às regulamentações da TI Air. Dependendo de sua potência térmica, esses sistemas de queima, em particular, também podem se enquadrar no escopo do 13° BImSchV.

Utilização da análise de gases em refinarias, por exemplo, para

- Ajuste otimizado dos sistemas de combustão (economia de combustível e redução de emissões)
- Monitoramento do funcionamento

das estações de tratamento de gases de combustão

- Monitoramento do cumprimento dos limites de emissão
- Segurança do pessoal e das instalações (risco de incêndio e explosão)

Fluxograma de processo e pontos de medição

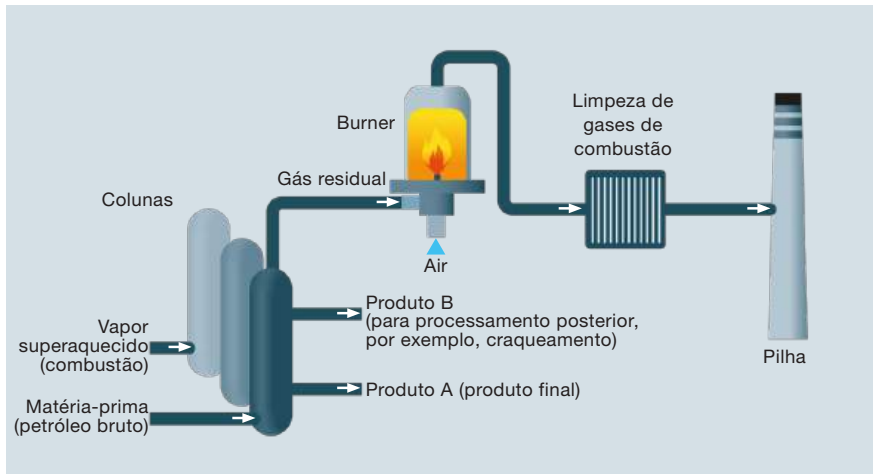


Figura 50 Fluxograma de processo para uma refinaria (sem pontos de medição)

Tarefas de medição

Devido à grande variedade de plantas individuais em uma única refinaria, não são mencionados aqui locais ou tarefas específicas de pontos de medição.

No entanto, faríamos referência novamente às inúmeras plantas de combustão para geração de vapor e

incineração de resíduos, que operam em uma refinaria e que oferecem uma ampla gama de tarefas para análise de gases.

4. Exemplos de aplicação

4.5.3 Chaminés de queima

Chaminés de queima são utilizadas para a queima segura e controlada (flaring) de gases provenientes de poços de petróleo, refinarias e outras plantas petroquímicas e químicas, bem como de aterros sanitários. É feita uma distinção entre chaminés de queima com operação regular e aquelas utilizadas como instalações de segurança em caso de emergência, quando gases inflamáveis precisam ser rapidamente descarregados em caso de mau funcionamento do processo (prevenção de explosão). As chaminés de queima são frequentemente equipadas com acessórios como injetores de vapor para supressão de fumaça ou aquecedores adicionais para queima de gases pobres.

Além do queimador propriamente dito, os principais componentes de um flare de gás são tubulações e uma estrutura de suporte. As chaminés de queima também podem ser equipadas com uma ponta de queima. Por razões de segurança, a operação de queima inclui dispositivos de proteção contra retorno de chama e deficiência de gás, bem como uma válvula de fechamento rápido. Muitas chaminés de flare são equipadas com um sistema de ignição automática, permitindo a operação automatizada do flare por meio de eletrodos de ignição e controle por sensor. Caso a operação com tiragem natural da chaminé de que-

ima não seja possível, um sistema de fornecimento de gás também é necessário. A operação de chaminés de queima de gás geralmente não permite a recuperação de material ou energia dos gases queimados. A limpeza subsequente dos gases de exaustão também não é possível com chaminés de queima abertas. Além disso, chaminés de queima podem causar poluição sonora considerável.

A possível infiltração de ar através de vazamentos ou da ponta da chaminé é crítica, pois pode resultar em explosões dentro do sistema. Isso pode ser remediado por meio de descarga de gás ou de um defletor de ar na ponta da chaminé.

Uso de analisadores de gás, por exemplo, para:

- Monitoramento da composição dos gases de combustão
- Detecção de vazamentos

Fluxograma de processo e pontos de medição



Figura 51 Estrutura de um sistema de queima

4.5.4 Incineração de resíduos

Muitos processos industriais, por exemplo, na indústria química, produzem resíduos líquidos ou gasosos e materiais residuais cuja composição requer a incineração como único meio possível de descarte seguro. Para esse fim, são utilizadas usinas de incineração de resíduos. A temperaturas entre 900 e 1300 °C, essas usinas incineram os resíduos em fornos rotativos, convertendo-os em cinzas ou escórias ecologicamente corretas. Essas usinas são muito semelhantes às de incineração de resíduos. Consulte o exemplo de aplicação na Seção 4.2.1.

Os gases de combustão resultantes

devem passar por etapas de limpeza de gases adequadas e, na Alemanha, sua composição permitida quando liberados na atmosfera deve estar em conformidade com as normas do 17° BImSchV.

Utilização de analisadores de gases, por exemplo, para

- Otimização do processo de combustão
- Monitoramento do desempenho da limpeza dos gases de combustão
- Monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Fluxograma de processo e pontos de medição

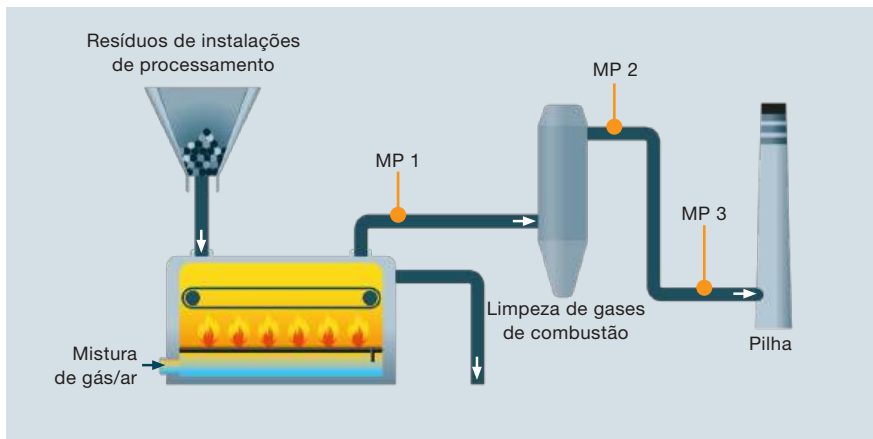


Figura 52 Fluxograma de processo para uma planta de incineração de resíduos com pontos de medição

4. Exemplos de aplicação

Tarefas de medição

- MP 1 na caldeira para otimizar o fornecimento de material e as condições de incineração
- MP 2 nas instalações de limpeza dos gases de combustão ou entre elas para monitoramento do desempenho
- MP 3 na chaminé para monitoramento do cumprimento dos valores-limite

Informações relacionadas a esta aplicação

- O gás bruto (antes das etapas de limpeza) frequentemente contém componentes agressivos associados, como HCl, HF e HCN (cianeto de hidrogênio/ácido prússico/ácido cianídrico). Um sistema de amostragem aquecido deve ser utilizado para isso.
- Além disso, a sensibilidade cruzada do sensor de SO₂ a Cl₂ (80%) e HCl (15%) deve ser levada em consideração.
- A composição do combustível (resíduo) frequentemente varia dependendo do fornecimento. Isso também pode resultar em grandes flutuações nas leituras.
- Para medições a jusante de um precipitador eletrostático, a sonda deve ser aterrada.

4.6 Outros sistemas de combustão

4.6.1 Instalações de cremação

Na Alemanha, desde 1997, a construção, o projeto e a operação de instalações de cremação estão sujeitos aos regulamentos do 27° BImSchV. Este estipula os valores-limite para a emissão de monóxido de carbono, poeira total e substâncias orgânicas (expressas como carbono total), bem como para as emissões de dioxinas e furanos.

4.6.2 Bancadas de teste

Bancadas de teste, para motores ou turbinas a gás, são utilizadas para o desenvolvimento de novos motores/turbinas a gás e seus testes, bem como para ensaios de desempenho e resistência. Quando se trata de bancadas de ensaio de motores, existe uma diferença entre bancadas de ensaio para motores de veículos e aquelas para motores estacionários. Os motores estacionários são utilizados principalmente em usinas de geração de energia, usinas de cogeração ou como motores primários em estações de compressão, por exemplo.

Os motores estacionários têm um espectro de emissão de gases de escape semelhante ao dos motores de veículos; os componentes relevantes são NOx, SO₂ CO e hidrocarbonetos; Os gases de escape de motores a diesel também contêm partículas de fuligem.

De acordo com o 4º BImSchV, esses tipos de motores exigem aprovação para potências acima de 1 MW (sem restrições para motores movidos a óleo usado ou gás de aterro!), com as regulamentações correspondentes incluídas no TI Air ou no 44º BImSchV.

Uso de analisadores de gases, por exemplo, para

- Medições no âmbito de trabalhos de desenvolvimento
- Medições como parte de testes de resistência
- Medições no âmbito de procedimentos de aprovação

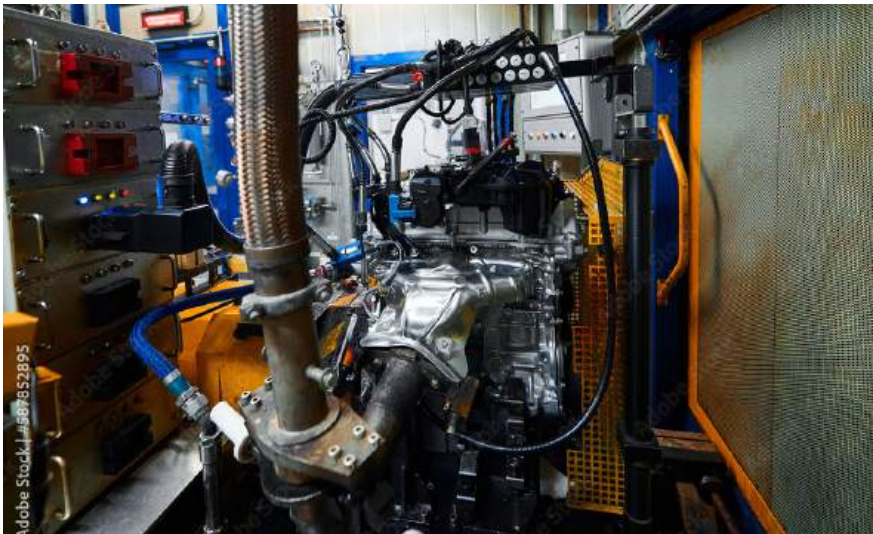


Figura 53 Bancada de testes para testar motores de automóveis

4. Tecnologia de análise de gás Testo

5.1 A empresa



Medição eletrônica de parâmetros físicos e químicos com instrumentos portáteis.

Este tem sido o foco da expertise do Grupo Testo em Titisee, na Floresta Negra, há mais de 60 anos. Desde sua fundação em 1957, a Testo SE & Co. KGaA, uma empresa de médio porte, atua no desenvolvimento, fabricação e distribuição mundial de sondas e instrumentos de medição portáteis para:

- Temperatura e umidade
- Fluxo e pressão
- Componentes em gases (análise de gases)
- Análise em líquidos (análise de líquidos)
- Luz, som e velocidade

- Parâmetros de medição elétrica

Com esta ampla gama de aplicações, a Testo atua em diversos setores, como ar condicionado e refrigeração, alimentos, aquecimento, geração de energia, minerais não metálicos, química e engenharia de processos, com comerciantes e autoridades, bem como na indústria. Em todo o mundo, a Testo tornou-se uma parceira altamente respeitada graças ao desempenho, qualidade e foco no usuário de seus produtos. Instrumentos de medição portáteis diferem consideravelmente de instrumentos estacionários, que são instalados permanentemente no local de medição. As principais diferenças são óbvias:

- Para instrumentos estacionários, o ambiente de operação do instrumento pode ser projetado de forma otimizada (invólucro com ar condicionado ou recipiente de análise, fonte de alimentação estabilizada, etc.), e os próprios instrumentos podem ser desenvolvidos para os mais altos níveis de precisão, confiabilidade operacional e facilidade de uso, sem restrições significativas em termos de peso ou dimensões.

5. Tecnologia de análise de gases Testo

- Dispositivos móveis, por outro lado, são operados em condições ambientais adversas e em constante mudança. Na maioria dos casos, eles precisam funcionar sem fonte de alimentação e atender às demandas de portabilidade em termos de peso e dimensões. Isso representa um desafio particular para o desenvolvimento e a produção.

Em vista dessas restrições conflitantes no desenvolvimento e na instalação dos instrumentos, vários campos de aplicação foram estabelecidos, particularmente na área de análise de gases para instrumentos portáteis e estacionários, que se complementam bem e, até o momento, raramente se sobrepõem. No entanto, por meio de um trabalho de desenvolvimento consistente, a Testo conseguiu recentemente tornar dispositivos portáteis tão potentes quanto os estacionários sem comprometer a "portabilidade", permitindo que sejam usados em algumas áreas normalmente reservadas para dispositivos estacionários. Dutos de gás aquecidos, resfriadores de gás de medição, sondas de amostragem de gás com purga de ar automática, aquecimento e resfriamento de instrumentos e o uso de notebooks e dispositivos inteligentes para operação, processamento de dados e comuni-

cação são exemplos desse progresso. A Testo oferece analisadores de gases portáteis, que também são adequados para medições de longo prazo e passaram com sucesso em rigorosos testes de qualificação, como os baseados na norma DIN 50379 na Alemanha ou em testes de certificação nos EUA.

Como resultado, os instrumentos agora têm uma gama significativamente ampliada de aplicações, que podem ser descritas com mais precisão como "medições de gases de exaustão de combustão na maioria dos setores industriais". A Seção 4 deste Guia fornece inúmeros exemplos disso.

As páginas a seguir oferecem uma visão geral da linha atual de analisadores de gases Testo. O objetivo é ilustrar a variedade de instrumentos e suas características, auxiliando o usuário a fazer a escolha certa para sua tarefa de análise.

No entanto, para obter informações detalhadas, consulte sempre a documentação específica do instrumento.

5.2 Características típicas

Informações gerais

Há mais de 30 anos, os analisadores de gases da Testo comprovam seu valor em todo o mundo na indústria, em órgãos públicos e no comércio. Mais de 200.000 instrumentos estão em uso, atestando diariamente o desempenho dessa moderna tecnologia de medição. Os analisadores de gases da Testo utilizam predominantemente sensores eletroquímicos (Figura 54)



Figura 54 Sensor eletroquímico

para detectar componentes gasosos.

Por meio de sua própria pesquisa e desenvolvimento, a Testo tornou essa tecnologia econômica e compacta — que é desafiadora em termos de condições operacionais — adequada para medições de rotina em ambientes operacionais severos. Isso se aplica tanto às células de medição quanto ao

seu entorno, como a otimização das linhas de amostragem, compensação adequada das sensibilidades cruzadas, processamento confiável do gás de medição e, por fim, a fácil substituição pelo usuário.

A Testo leva totalmente em conta o ritmo acelerado da inovação em tecnologia de medição! 70% das vendas vêm de produtos com menos de 3 anos. Essa capacidade de inovação está associada a um forte foco na qualidade. A Testo recebeu o certificado de qualidade ISO 9001 em 1992, sendo confirmado várias vezes desde então. Os analisadores de gases Testo podem ser caracterizados da seguinte forma:

- Os instrumentos são portáteis, sendo de mão ou do tamanho de uma pequena maleta.
- A linha de produtos é ampla e inclui instrumentos para os mais diversos fins, com equipamentos adequados e dados de desempenho apropriados. Há instrumentos para determinar componentes gasosos individuais e também para a determinação simultânea de múltiplos componentes gasosos.

5. Tecnologia de análise de gases Testo

- Os dispositivos passaram com sucesso por diversos testes de certificação e qualificação, incluindo os exigentes testes para o teste 350 MARITIME, conforme o Código Técnico de NOx.
- Os instrumentos são notavelmente econômicos em comparação com outros analisadores de gases.
- Os instrumentos são de fácil manutenção e, portanto, baratos de operar. Os próprios usuários podem realizar grande parte da manutenção.
- Os instrumentos vêm com documentação muito detalhada. Além disso, a Testo se esforça para apoiar os usuários com informações técnicas especializadas (como este guia).

Desempenho

O analisador de gases testo 350 passou com sucesso por vários testes de qualificação que demonstram o alto nível de desempenho da tecnologia de instrumentos da Testo:

- O teste de qualificação conforme a norma DIN EN 50379-1 e -2 para instrumentos portáteis utilizados em medições em instalações de ar TI. Este teste também foi superado sem restrições para os combustíveis carvão, gás natural, gás de aterro, óleo, madeira e resíduos domésti-

cos, em diversos tipos de plantas: caldeiras a vapor, motores a gás e diesel, turbinas a gás e usinas de incineração de resíduos.

- Nos EUA, o teste 350 atende às especificações de desempenho para medições de NOx, CO e O₂, bem como aos requisitos dos Métodos de Teste Condicional CTM-030 e CTM-034. Além disso, é aprovado como instrumento de backup no caso de falha de dispositivos de medição estacionários.
- Na China, os produtos da série teste 350 estão em conformidade com o método de medição da CE para fontes estacionárias de emissão de NOx, SO₂, CO e O₂. Eles atendem aos padrões nacionais de proteção ambiental da China, como HJ 693, HJ 57 e HJ 973. O teste 350, com sensor CO₂-IR, também cumpre o padrão HJ 870 para o método NDIR. É amplamente utilizado em monitoramento ambiental por órgãos de proteção ambiental, em tecnologias de purificação de gás, análise de combustão e processos tecnológicos. Devido à sua precisão e confiabilidade, o teste 350 também é usado como instrumento de referência para comparação de dados em sistemas de monitoramento online.

5.3 Visão geral dos analisadores de gases de combustão industriais da Testo

A linha de instrumentos para aplicações industriais atualmente consiste em três tipos:

1. testo 340 – Instrumento de medição portátil

O testo 340 é um instrumento de medição portátil para análise de gases de combustão industriais. Com um design compacto, oferece máxima mobilidade e, graças à tecnologia confiável, é ideal para serviços internacionais ou durante comissionamentos e medições de controle em plantas de combustão e geração de energia, por exemplo.

Além de um sensor de O_2 , até outros três sensores (CO , CO_{low} , NO , NO_{low} , NO_2 ou SO_2) podem ser instalados para atender às suas necessidades práticas. O testo 340 possui medição integrada de fluxo/pressão diferencial, diluição simples (fator x5) e diluição de todos os sensores (fator x2).

Saiba mais através do seguinte [LINK](#)



Figura 55 testo 340 – Analisador de gases de combustão para a indústria com acessórios

5. Tecnologia de análise de gases Testo

2. teste 350 – Sistema de analisador portátil

O teste 350 é um sistema de analisador portátil para análise de gases de combustão industriais. Ele consiste em até 16 unidades de análise e uma unidade de controle. As unidades de análise teste 350 podem ser controladas pela unidade de controle teste 350, por um PC (via USB, Bluetooth ou CANCase) ou por um aplicativo Android.

O teste 350 foi desenvolvido especificamente para atender às exigências práticas da medição de emissões industriais, como monitoramento de emissões de motores industriais, queimadores, turbinas a gás, processos

térmicos, etc.

Além de um sensor de O_2 , até cinco sensores adicionais de gás (CO , CO_{low} , CO_2 , NO , NO_{low} , NO_2 , SO_2 , SO_{2low} , H_2S ou $CxHy$) podem ser instalados conforme necessário.

O teste 350 também possui medição integrada de fluxo/pressão diferencial, entrada para sonda de temperatura do tipo K (NiCr-Ni) e tipo S (Pt10Rh-Pt), bateria recarregável, sonda de ar de combustão integrada (NTC), entrada de gatilho, diluição simples (fatores x2, x5, x10, x20, x40) e diluição de todos os sensores (fator x5).

Saiba mais através do seguinte [LINK](#)



Figura 56 teste 350 – Sistema analisador de gases de combustão para medição de emissões industriais

3. teste 350 MARITIME – Analisador de gases de combustão para motores diesel marítimos

O teste 350 MARITIME é um analisador de gases de combustão portátil, certificado e apto para uso marítimo, para medição de emissões de motores diesel marítimos. Ele pode ser utilizado para as seguintes inspeções de verificação a bordo, de acordo com o Código Técnico NOx 2008:

- Durante medições e monitoramentos diretos a bordo (por exemplo, inspeções periódicas e inter-mediárias) usando o método simplificado de teste e medição, como quando são feitas modificações no motor.
- Verificação dos limites de NOx especificados no Anexo VI da MARPOL. Esses limites são verificados, por exemplo, durante inspeções oficiais de NOx. A medição de NOx também pode ser usada como prova de redução de NOx, exigida em zonas especiais regionais com exigências específicas de impostos sobre NOx (como na Noruega).

O teste 350 MARITIME é equipado com seis sensores de gás (O₂, CO, CO₂ (IR), NO, NO₂, SO₂) e inclui também condicionamento de gás, ampliação da faixa de medição para o sensor SO₂ de slot único, válvula de ar fresco para medições de longa duração, sensor de pressão diferencial, entradas para sondas de temperatura tipo K (NiCr-Ni) e tipo S (Pt10Rh-Pt), conexão com o barramento de dados Testo, bateria recarregável, sonda de ar de combustão integrada (NTC), entrada de gatilho, armazenamento de dados e porta USB.

Saiba mais através do seguinte [LINK](#)

³ O teste 350 MARITIME possui as seguintes certificações:

- Certificado DNV n° TAA00001K0 Rev. 4
- Certificado Nippon Kaiji Kyokai (Classe NK) n° TA23536M
- Além disso, o analisador de gases de combustão está em conformidade com as diretrizes para equipamentos marítimos, de acordo com o Certificado MED n° MEDB0000328 Rev. 3 (Módulo B) e MEDD00002FU (Módulo D).

5. Tecnologia de análise de gases Testo



Figura 57 testo 350 MARITIME – Analisador de gases de combustão para motores diesel marítimos

	testo 340	testo 350	testo 350 MARITIME
O ₂	0 a +25% em volume	0 a +25 vol. %	0 a +25 vol. %
CO (compensado por H ₂)	0 a 10.000 ppm	0 a 10,000 ppm	0 a 3,000 ppm
CO _{low} (compensado por H ₂)	0 a 500 ppm	0 a 500 ppm	
CO _{high}	Até 50.000 ppm ⁴	Até 400,000 ppm ⁵	
CO ₂ (IR)		0 a 40 vol. %	0 a 40 vol. %
SO ₂	0 a 5.000 ppm	0 a 5,000 ppm	0 a 3,000 ppm
SO _{2low}			
H ₂ S		0 a 300 ppm	
NO	0 a 4,000 ppm	0 a 4,000 ppm	0 a 3,000 ppm
NO _{low}	0 a 300 ppm	0 a 300 ppm	
NO ₂	0 a 500 ppm	0 a 500 ppm	0 a 500 ppm

Tabela 44 Faixas de medição

⁴ com fator de diluição máximo de 5x

⁵ com fator de diluição máximo de 40x

5.4 Visão geral dos acessórios

Com os acessórios apropriados, o analisador (instrumento de medição portátil ou unidade de análise) torna-se um sistema de medição funcional. A seção a seguir descreve as várias categorias de acessórios, que vão desde ferramentas essenciais de amostragem até opções adicionais de saída de dados e extensões ou aprimoramentos para operação em condições específicas. Alguns acessórios são específicos para determinados analisadores, enquanto outros são universalmente aplicáveis. Para mais detalhes, consulte a documentação do instrumento.

Soluções de sistema

Um sistema completo para extração e condicionamento de gás de amostra é composto por uma sonda de amostragem de gás, linhas de gás (tubos ou mangueiras), filtros grosseiros e finos e uma unidade de resfriamento. A Testo coordenou seus acessórios de amostragem para que soluções de sistema perfeitas possam ser criadas combinando os módulos. Alguns instrumentos já vêm equipados com unidades de condicionamento da amostra, como o testo 350, que possui um resfriador de gás de medição integrado.

Acessórios para extração e condicionamento de gás de amostra

A coleta e o preparo adequados da amostra são cruciais para alcançar precisão e consistência nos resultados das medições, além de prolongar a vida útil do equipamento de medição. O processo precisa eliminar duas fontes principais de erro:

- Danos ao equipamento de medição por componentes dos gases de combustão (componentes agressivos e sujeira) e
- Falsificação dos resultados da medição devido à eliminação não definida de componentes do gás através de reações com a umidade dos gases de combustão antes da medição

Consulte os comentários explicativos na Seção 3.1.2.

5. Tecnologia de análise de gases Testo

Sondas de gás de combustão

De acordo com suas áreas de aplicação, a Testo desenvolveu sondas inovadoras de gás de combustão que, em combinação com os analisadores testo 340 e testo 350, podem ser utilizadas em situações com temperaturas muito altas, condensado agressivo, altas concentrações de poeira ou cargas mecânicas intensas.

Sonda modular padrão para amostragem de gás



As sondas padrão para amostragem de gás estão disponíveis para diferentes faixas de temperatura (500 °C / 1000 °C), em diferentes comprimentos (335 mm / 700 mm) e até com pré-filtro para gás de combustão com poeira.

Sonda de gás de combustão para motores industriais



As sondas para motores industriais são ideais para medições em motores industriais estacionários (ex: motores a gás ou diesel). São totalmente

metálicas, para evitar o derretimento do cabo devido ao calor irradiado.

Sonda SO₂ low



O kit SO₂ low, com ou sem aquecimento, foi projetado especificamente para medições após o tratamento do gás de combustão (ex: lavadores), a fim de determinar a eficácia na redução das concentrações de SO₂.

Sonda industrial para amostragem de gás



A sonda industrial com ou sem aquecimento é usada para medições em condições com altas temperaturas, grande carga de poeira ou gás de combustão úmido. Pode ser personalizada para tarefas específicas de medição com acessórios adicionais.

Tubulações especiais para gás

A formação de condensado – e, portanto, a influência nas concentrações de SO₂ e NO₂ – também depende do tempo disponível para que ocorra a reação. Velocidades de fluxo elevadas têm efeito positivo nesse sentido.

Pensando nisso, a Testo oferece uma solução patenteada que elimina a necessidade de aquecimento da mangueira. A mangueira de condução de gás tem pequeno diâmetro, o que gera altas velocidades. O material utilizado é PTFE, conhecido por sua baixíssima absorção.

5. Tecnologia de análise de gases Testo

Condicionamento de gás

Sem medidas apropriadas, medições em gás de combustão úmido resultariam em leituras de SO_2 e NO_2 subestimadas. Isso se deve à reação desses componentes gasosos com a água, formada pela condensação da umidade do gás ao ser resfriado. O condensado contém quantidades significativas e indefinidas (!) de SO_2 e NO_2 , que deixam de ser medidos na fase gasosa.

Para evitar isso, o *testo 350* possui um resfriador integrado ou um resfriador de gás externo opcional (Figuras 58 e 59), que resfriam e secam o gás de forma controlada usando um elemento de resfriamento Peltier. Embora uma parte de SO_2 e NO_2 ainda seja perdida no condensado, essa perda passa a ser definida pela temperatura de resfriamento. Como resultado, as medições subsequentes do gás (seco) produzem valores precisos, referenciados à temperatura de resfriamento.

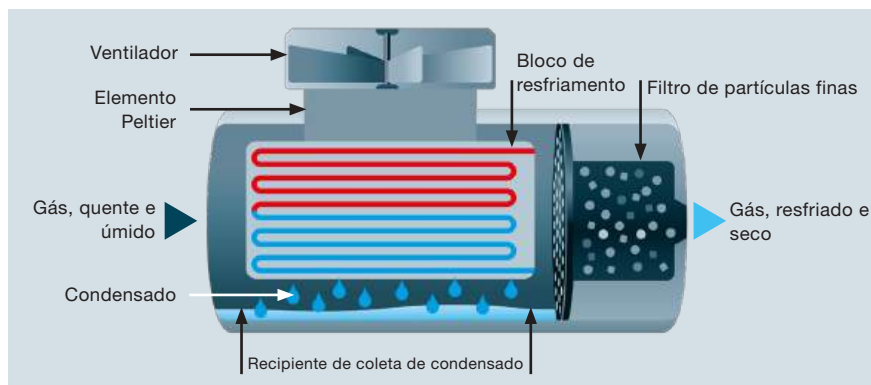


Figura 58 Esquema do condicionamento de gás da Testo



Figura 59 Resfriador de gás externo com testo 340

Adaptador Modbus

Em determinadas aplicações especializadas (como P\&D), o testo 350 também é utilizado em aplicações semi-estacionárias. Estas exigem aquisição remota de dados, controle do analisador e capacidade de leitura de mensagens de erro do analisador para diagnóstico.

Com o adaptador Modbus, a Testo oferece a opção de uma interface digital usando um protocolo de comunicação amplamente utilizado na automação industrial e no controle de processos.

O protocolo Modbus é simples, robusto e adequado para ambientes com ruído elétrico e outros desafios industriais. Existem várias variantes do protocolo Modbus, mas duas das mais comuns são:

- Modbus RTU (Remote Terminal Unit) é um protocolo binário que usa comunicação serial (RS-485) para transmissão de dados.
- O Modbus TCP é uma extensão do protocolo Modbus que utiliza Ethernet e Protocolo de Internet (IP) para comunicação. Ele permite que dispositivos se comuniquem por meio de redes Ethernet padrão, incluindo redes locais (LANs) e a internet.

Ao expandir o sistema com um gateway TCP, vários dispositivos podem ser conectados via Ethernet e controlados por meio de um computador central (veja Figura 61).



Figura 60 Adaptador Modbus para o testo 350

5. Tecnologia de análise de gases Testo

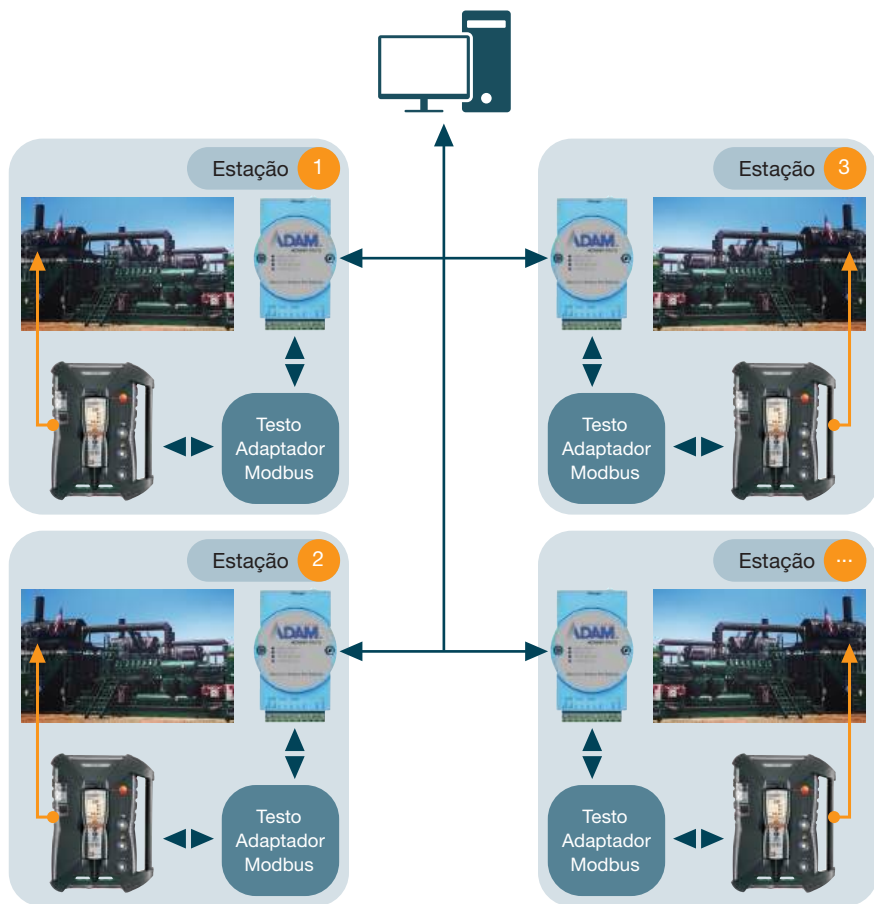


Figura 61 Exemplo de aplicação do adaptador Modbus

Sede da Testo

Testo SE & Co. KGaA
Celsiusstrasse 2
79822 Titisee-Neustadt
Telefone: +49 7653 681-0
E-mail: info@testo.de
www.testo.com

Você encontrará os dados de
contato de nossas subsidiárias e
agências em todo o mundo em
www.testo.com

Índice

A

proporção de ar 2, 12, 14, 16, 21, 35, 37, 64, 107
produção de alumínio 139, 140
amônia 24, 62, 111
aplicações 34, 41, 58, 60, 78, 87, 89, 97, 141, 151, 152, 155, 163

B

Alvenaria 125

C

Calibração 54, 55, 77, 78, 82, 87
Monóxido de carbono 9, 41, 45, 50, 60, 61, 86, 148
Produção de cimento 121, 122
Fabricação de cerâmica/porcelana 123
Método de quimioluminescência 89
Lei do Ar Limpo 42, 56
Usina elétrica a carvão 106
Usinas de cogeração 108
Usinas de coque 137
Central eléctrica de ciclo combinado 110
Combustão 5-18, 20-28, 30, 33-40, 42, 43, 45, 48-53, 60, 61, 63, 64, 78-80, 91, 98-100, 102-104, 106-108, 110, 113, 115, 117, 119, 120, 124, 129, 139, 143-145, 147, 148, 152-157
Ar de combustão 6, 9, 12, 13, 18, 21, 22, 27, 33, 35, 36, 39, 45, 64, 98, 104, 115, 117, 156, 157
Gráfico de combustão 16, 17, 35
Usinas de combustão 9, 10, 14, 20, 38, 40, 42, 43, 45, 50-52, 144, 145
Informações de concentração 67
Condensado 2, 21, 23, 26, 29, 30, 74, 75, 160-162

Medição contínua 48

Conversões 5, 71

Cremação 43, 148

Sensibilidade cruzada 54, 75, 76, 89, 92, 116, 148

D

Métodos de despoejamento 63

Métodos de desnitrificação 63

Métodos de dessulfuração 65

Ponto de orvalho 11, 20, 27, 29, 30, 31, 74

Poeira 9, 10, 14, 25, 31, 41, 45, 47, 50, 53, 54, 60, 63, 98, 104, 106, 121, 122, 125, 126, 128, 130, 131, 133-135, 137, 139, 148, 160

E

Eficiência econômica 14, 99, 105, 107

Eficiência 5, 14, 22, 26, 34, 37, 62, 99, 105, 107, 109, 110, 113, 119, 121, 122, 130

Sensores eletroquímicos 57, 87, 153

Emissão 1, 25, 33, 34, 43-45, 47, 48, 51, 53, 59, 60, 78, 79, 83, 87, 89, 94, 106-108, 110, 112, 114, 116, 118, 121, 122, 124, 129, 143-145, 148, 149, 154

Controle de emissões 79

Limite de emissão 25

Balanço energético 27, 98, 100, 104

Conteúdo energético 5

Bancadas de testes de motores 148

F

Chaminés de flare 146
Velocidade de fluxo 30
Gás de combustão 6, 9-12, 14, 16, 18-22, 24-27, 30, 34, 36-40, 42, 45, 54, 56, 60, 62-65, 69, 75, 79, 84, 85, 87, 95, 96, 98-100, 102, 104, 106, 108, 115, 116, 118, 119, 123, 124, 128, 129, 133, 135, 144-146, 148, 155-157, 159, 160, 162
Limpeza do gás de combustão 24, 34, 40, 79, 106, 116, 119, 129, 144, 145, 148
Gás de combustão, gás de exaustão 21, 23, 27, 60, 62, 77, 113, 149
Perda de gases de combustão 26, 27, 45
Combustão em leito fluidizado 64
Combustível, incluindo composição 6, 9, 11, 13-16, 18, 21-23, 25-28, 33, 35-38, 45, 50-52, 60, 61, 64, 71, 98-100, 102, 104-106, 108, 111, 116, 122, 129, 143-145, 148

G

Análise de gases, geral 31, 33-38, 40-42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 73, 75, 77, 78, 80, 97, 98, 100, 102, 104, 106, 108, 110, 112, 114, 118, 119, 121, 124, 125, 127-129, 134, 135, 139, 141, 143, 145, 151, 152, 154, 155, 156, 158, 160, 162, 164
Instalação a gás 100, 101
Sondas de amostragem de gás 152, 160
Gas turbine plants 20, 46, 50, 52
Volume de gás 18, 19, 20, 67, 87
Produção de vidro 39, 126, 127
Efeito estufa 7
Valor calorífico bruto, caldeira de condensação 26, 114, 116

H

Linhas aquecidas 30
Efeito de calor 41, 79, 92
Hidrocarbonetos 7, 9, 11, 50, 60, 61, 62,

76, 84, 87, 92, 144, 149
Sulfureto de hidrogênio 23

I

Combustão ideal 13, 18, 35
Imissão 10, 20, 25, 40, 42-46, 50, 52-54
Medição individual 48
Fornos industriais 40
Ar insuficiente 14, 35, 36
Produção de ferro 133, 134

L

Usinas de combustão em larga escala 50
Produção de cal 129, 130

M

Valor MAC 22, 23
Medição do refrigerador de gás 159
Princípios de medição 83
Teor de umidade 20, 29, 75, 125

N

Valor calorífico líquido 11, 26, 27
Nitrogênio, óxidos de nitrogênio 9, 11, 12, 21, 22, 24, 40, 47, 50, 60-64, 78, 90, 125, 126, 141, 142

O

Instalação de aquecimento a óleo 104, 105
Otimização da combustão 79, 102, 119
Oxidação 6, 7, 15, 23, 25, 36, 60, 113, 115, 135, 141

P

Método paramagnético 55, 84, 90
Refrigerador Peltier 31
Dispositivos portáteis 57, 82, 152
Ppm 22-24, 67, 69, 70-72, 76, 87, 101, 103, 105, 107, 109, 116, 124, 127, 130, 134, 158

Análise de processo 78
Controle de processo 38, 79, 163
Aquecedores de processo 38, 143

Q

Teste de qualificação 54, 55, 154

R

Atmosfera redutora 15
Valor de referência 16, 18, 20, 22, 55, 69, 118
Refinarias 23, 24, 40, 46, 51, 144-146
Incineração de resíduos 145, 147

S

Medidas de segurança 41
Amostragem 30, 37, 48, 50, 54, 73, 74, 78, 103, 116, 124, 128, 148, 152, 159, 160
Método SCR 22, 24, 25, 50, 52, 62, 63, 115
Sensor, sistema de sensores 58, 61, 76, 79, 80-82, 84-88, 90, 94-96, 116, 122, 146, 148, 154-157
Plantas de sinterização 131
Usinas de combustão de pequena escala 45
Sistemas alimentados por combustível sólido 98
Eletrólito de estado sólido 84
Fornecimento de ar em estágios 64
Condições normais 68
Produção de aço 135, 136
Condições estequiométricas 13, 18
Dióxido de enxofre 50, 65
Tratamento de superfície 9, 14, 34, 40, 141, 142

T

TI Air 42, 44, 47, 49
Gás de teste 78

Testo, instrumento 154
Testo, visão geral dos acessórios 159
Testo, visão geral dos instrumentos 155
Testo, a empresa 3, 97, 151
Pós-combustão térmica 113, 119, 120
Condutividade térmica 84, 91
Condutividade térmica adicional 83, 91
Tratamento térmico de superfície 9, 14
Carbono total 53

U

EUA, legislação 42, 56, 57, 152, 154
Método UV 89

W

Incineração de resíduos 24, 53, 59, 114-117, 147, 154
Pirólise de resíduos 117, 118

Z

Gás zero 78



www.jduarteg.com/testo
crm@jduarteg.com
15-981534326



Testo do Brasil
Rua Guapuruvu, 299
13098-322 - Campinas
São Paulo
+55 19 3731-5800
sac@testo.com.br

