

MANUAL SOBRE USO RACIONAL DO GÁS NATURAL EM EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO¹

Renato Vergnhanini Filho²
José Roberto Nunes Moreira³

Resumo

A equipe do Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões (LETMCE) do IPT, com recursos da Comgás, dentro do "Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e de Conservação e Racionalização do Uso do Gás em São Paulo", elaborou um manual sobre o uso racional do gás natural (GN) em indústrias - entendendo-se como "racional" a queima em condições otimizadas de aproveitamento energético e de emissão de poluentes atmosféricos. Nas duzentas páginas do manual são abordados temas como: teoria da combustão de gás e a formação de poluentes atmosféricos, tipos e características dos equipamentos de combustão, metodologias para cálculo do rendimento térmico, substituição do óleo combustível por gás natural e instalação/operação/segurança de sistemas de combustão de gás. O projeto incluiu o treinamento do corpo técnico da Comgás para uso do manual como material de apoio no atendimento aos clientes, e também a sua apresentação às indústrias através de seminários. A expectativa com a realização do projeto foi contribuir para o conhecimento sobre o uso eficiente do gás natural e a formação de mão-de-obra preparada para a adoção de medidas de conservação de energia e de redução da poluição ambiental.

Palavras-chave: Equipamento de combustão; Eficiência energética; Gás natural; Poluição atmosférica.

MANUAL ON THE RATIONAL USE OF NATURAL GAS IN COMBUSTION EQUIPMENT

Abstract

The team of the Laboratory of Thermal Energy, Engines, Fuel and Emissions (LETMCE) of IPT, with resources of Comgás within the "Annual Program for Research and Technological Development and Conservation and Rational Use of Gas in Sao Paulo," produced a manual on the rational use of natural gas (NG) in industries - understood to be "rational" the burning under conditions optimized of energy use and emission of air pollutants. In two hundred pages of the book are addressed topics such as: theory of combustion gas and the formation of air pollutants, types and characteristics of combustion equipment, methodologies to calculate the thermal efficiency, substitution of fuel oil by natural gas and installation, operation and safety of combustion systems gas. The project included training of team Comgás to use the manual as supporting material on customer service, and also their presentation to industry through seminars. The expectation with the completion of the project was to contribute to knowledge about the efficient use of natural gas and the formation of skilled workforce prepared to adopt measures to conserve energy and reduce environmental pollution.

Keywords: Combustion equipment; Energy efficiency; Natural gas; Air pollution.

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

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

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

1 INTRODUÇÃO

O uso racional do gás natural em caldeiras compreende, sobretudo, sua queima em condições máximas de aproveitamento energético e mínimas de emissão de poluentes atmosféricos.

O gás natural, por ser um combustível bastante versátil em termos de aplicação, vem sendo utilizado na substituição de uma variedade ampla de combustíveis, como: madeira, carvão, óleo combustível, diesel, GLP, nafta e energia elétrica, tanto na indústria, como no comércio.

No caso específico da substituição de óleo combustível por gás natural em caldeiras, destacam-se duas preocupações: rendimento térmico e emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x).

A combustão do gás natural, ao contrário do que acontece com o óleo, produz uma chama pouco luminosa, de menor emissividade, o que reduz a transferência de calor na fornalha. Numa caldeira fogotubular, por exemplo, a conversão de óleo para gás reduz a quase pela metade a potência trocada por radiação no tubulão. Essa redução, mesmo sendo em parte atenuada pelo aumento das trocas de calor na zona de convecção, tende a diminuir o rendimento térmico da caldeira. Em virtude disso, é muito importante que a substituição de um combustível qualquer por gás natural seja acompanhada de medidas de otimização energética. Isso, por sua vez, é coerente com a conjuntura nacional e também mundial, que incentiva o uso racional da energia, seja por questões financeiras, ambientais ou estratégicas. O uso eficiente da energia é um dos paradigmas do crescimento sustentável da sociedade moderna.

A operação da caldeira com baixo excesso de ar, retorno de condensado e aproveitamento da entalpia dos gases, através da instalação de preaquecedores de ar e água, está entre as práticas que levam, em geral, a uma substancial redução do consumo de combustível.

No aspecto ambiental, o uso do gás natural está, na maioria das vezes, associado a uma combustão mais limpa, com menor emissão de poluentes. Na queima do gás natural em caldeiras, os gases de combustão estão praticamente isentos de óxidos de enxofre, material particulado inorgânico e, em geral, dos chamados produtos da combustão incompleta (monóxido de carbono, hidrocarbonetos voláteis e material particulado orgânico). Não obstante, os gases de combustão contém ainda, como no caso da queima de todos os combustíveis, óxidos de nitrogênio (NO_x), que têm significativo impacto ambiental.

Legislações promulgadas pelo Conama^(1,2) estabelecem limites de emissão para NO_x para a queima de gás natural em caldeiras. Para equipamentos que entraram em operação após 26/12/2006, foram fixados os seguintes padrões (NO_x , como NO_2 , em $\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$, referido a 3,0 % de O_2):

320, para equipamentos de potência inferior a 70 MW e

200, para equipamentos de potência igual ou superior a 70 MW.

Para equipamentos que entraram em operação antes de 26/12/2006, foram estabelecidos os seguintes padrões (NO_x , como NO_2 , em $\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$, referido a 3,0 % de O_2):

400, para equipamentos de potência entre 10 e 70 MW e

320, para equipamentos de potência superior a 70 MW.

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

A emissão de NO_x na queima de gás natural é função das características do sistema de queima e dos parâmetros operacionais da caldeira. Trabalhos que vêm sendo realizados pelo IPT têm mostrado que pequenos ajustes no equipamento e em suas condições de operação podem levar a significativas reduções nas emissões de NO_x, muitas vezes suficientes para o atendimento ao padrão fixado pelo Conama.

A atuação do IPT na área de Energia teve início em 1970 com a criação do Agrupamento de Engenharia Térmica (AET) na então Divisão de Engenharia Mecânica. Em 1980, iniciou-se a implantação da área de Combustão Industrial, cuja atuação esteve sempre voltada para o uso eficiente do combustível, seja do ponto de vista energético, seja no aspecto de emissão de poluentes.

Dentro desse contexto, o AET, atual LETMCE (Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões), pertencente ao CETAE (Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas), tendo acumulado larga experiência na resolução de problemas ligados à operação de sistemas de combustão e possuindo um extenso acervo bibliográfico no assunto, além de uma considerável infraestrutura laboratorial (equipamentos para queima de combustíveis em escala semi-industrial), elaborou manual, para que os técnicos da Comgás possam utilizá-lo como material de apoio no atendimento que eles venham a oferecer a seus clientes, orientando-os para que façam uso racional do gás natural quando este é utilizado em caldeiras.

O manual está particularmente voltado para os clientes típicos da Comgás nos segmentos industrial/comercial, ou seja, possuidores de geradores de vapor de pequeno porte - produção média de vapor de 1400 kg/h, do tipo fogotubular, de dois ou três passes, com um único queimador instalado, e que não foram originalmente concebidos para a queima de gás natural, mas convertidos de GLP ou óleo combustível para gás natural.

Os assuntos tratados no manual estão dispostos em oito capítulos: gás natural; combustão de gases; caldeira fogotubular; instalação, operação e segurança de sistemas de combustão; rendimento térmico de caldeira; emissão de poluentes atmosféricos; substituição de combustíveis e redução de consumo de gás natural em caldeira fogotubular; dois apêndices: avaliação contínua do rendimento da caldeira - método simplificado e trocas de calor na fornalha de caldeiras fogotubulares; além dos itens "introdução" e "referências bibliográficas", onde são relacionadas as noventa referências consultadas na elaboração do manual. São apresentados, a seguir, o conteúdo e alguns aspectos relevantes de cada capítulo abordado.

2 GÁS NATURAL

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em oito itens: definição; origem; composição; exploração; processamento; transporte; distribuição e utilização.

Destaque para a composição típica e especificação do gás natural (Tabelas 1 e 2) e para informações sobre seu consumo no Brasil (Figura 1).

Tabela 1. Composição típica do gás natural, GLP e óleo combustível)

	GN (% em volume)	GLP (% em volume)		Óleo (% em massa)
metano	89,0	-	carbono	89,0
etano	6,0	-	hidrogênio	9,4
propano	1,8	50,0	nitrogênio	0,8
butano	1,0	50,0	enxofre	0,8
dióxido de carbono	1,5	-		
nitrogênio	0,7	-		

Tabela 2. Especificação do gás natural (regiões sul, sudeste e centro-oeste)⁽³⁾

Poder Calorífico Superior	9,72 a 11,67 kWh/m ³ (1 atm, 20 °C)
Índice de Wobbe	46.500 a 52.500 kJ/m ³ (1 atm, 20 °C)
Metano, mínimo	86,0 % vol.
Etano, máximo	10,0 % vol.
Propano, máximo	3,0 % vol.
Butano e mais pesados, máximo	1,5 % vol.
Oxigênio, máximo	0,5 % vol.
Inertes (N ₂ + CO ₂), máximo	4,0 % vol.
Nitrogênio	2,0 % vol.
Enxofre total, máximo	70 mg/m ³
Gás sulfídrico (H ₂ S), máximo	10 mg/m ³
Ponto de orvalho de água a 1 atm, máximo	- 45 °C
Partículas sólidas e líquidas	isento

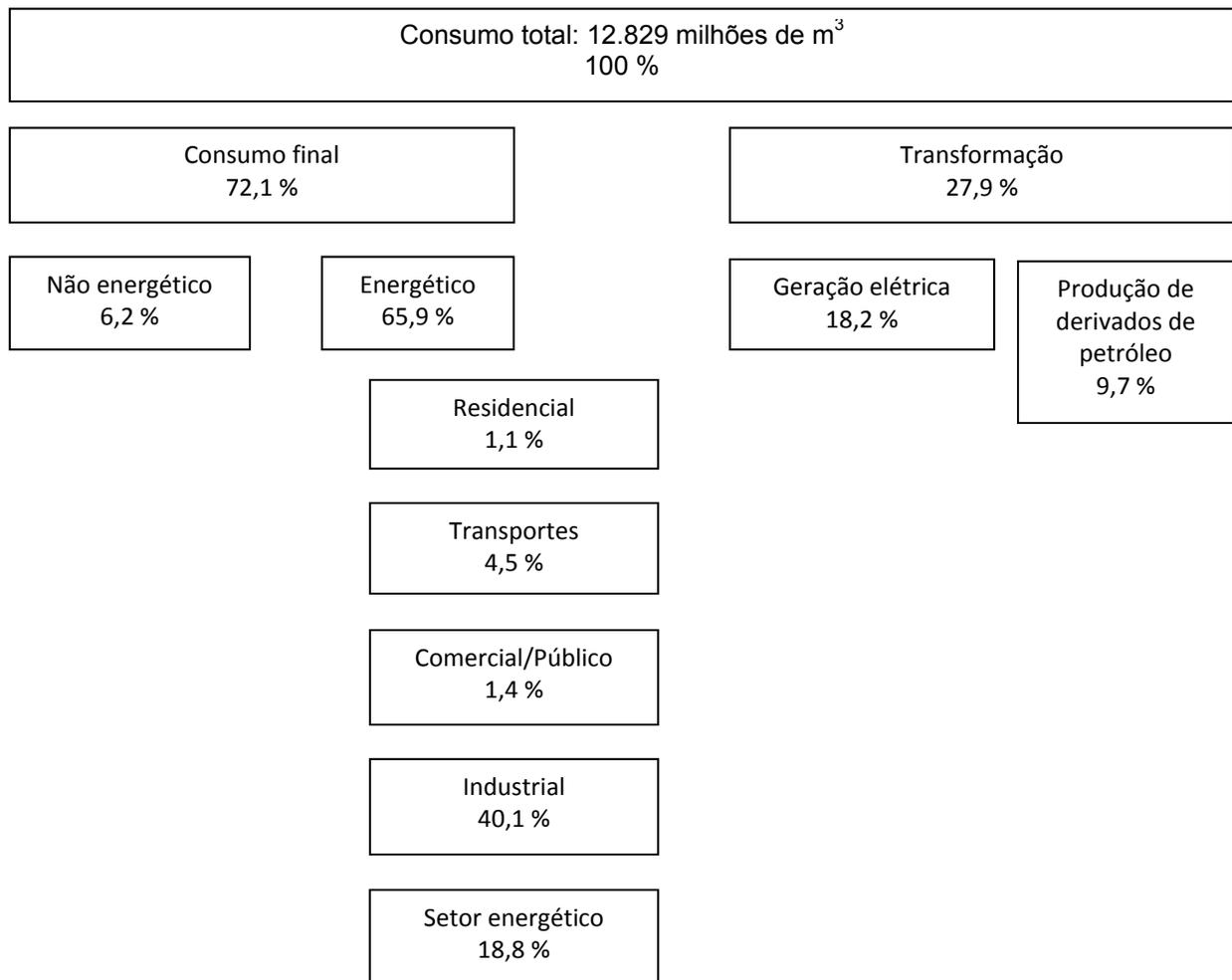


Figura 1. Consumo de gás natural no Brasil em 2010.⁽⁴⁾

3 COMBUSTÃO DE GASES

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em onze itens: introdução; estequiometria; poder calorífico; calor específico; densidade; índice (número) de Wobbe; temperatura de chama adiabática; ignição; velocidade de chama; limites de flamabilidade e chamas de gás.

Destaque para as relações entre o teor de O₂ dos gases gerados na queima do combustível e o teor de CO₂ e a vazão desses gases, e a vazão e o excesso de ar de combustão (Figuras 2 e 3).

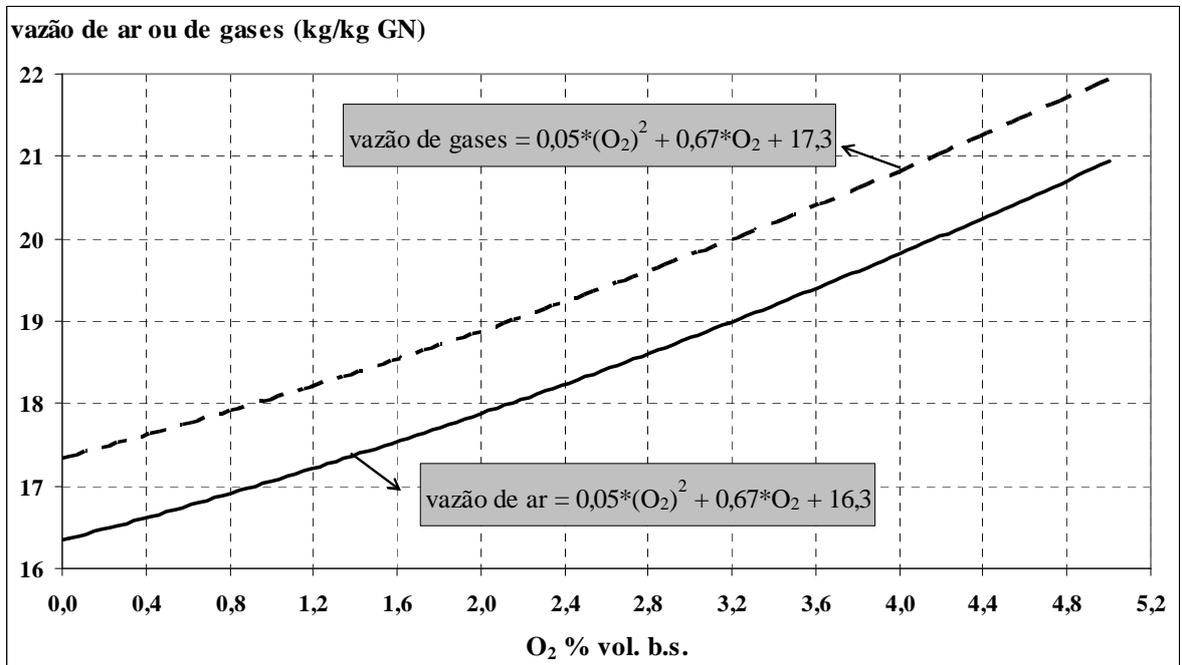
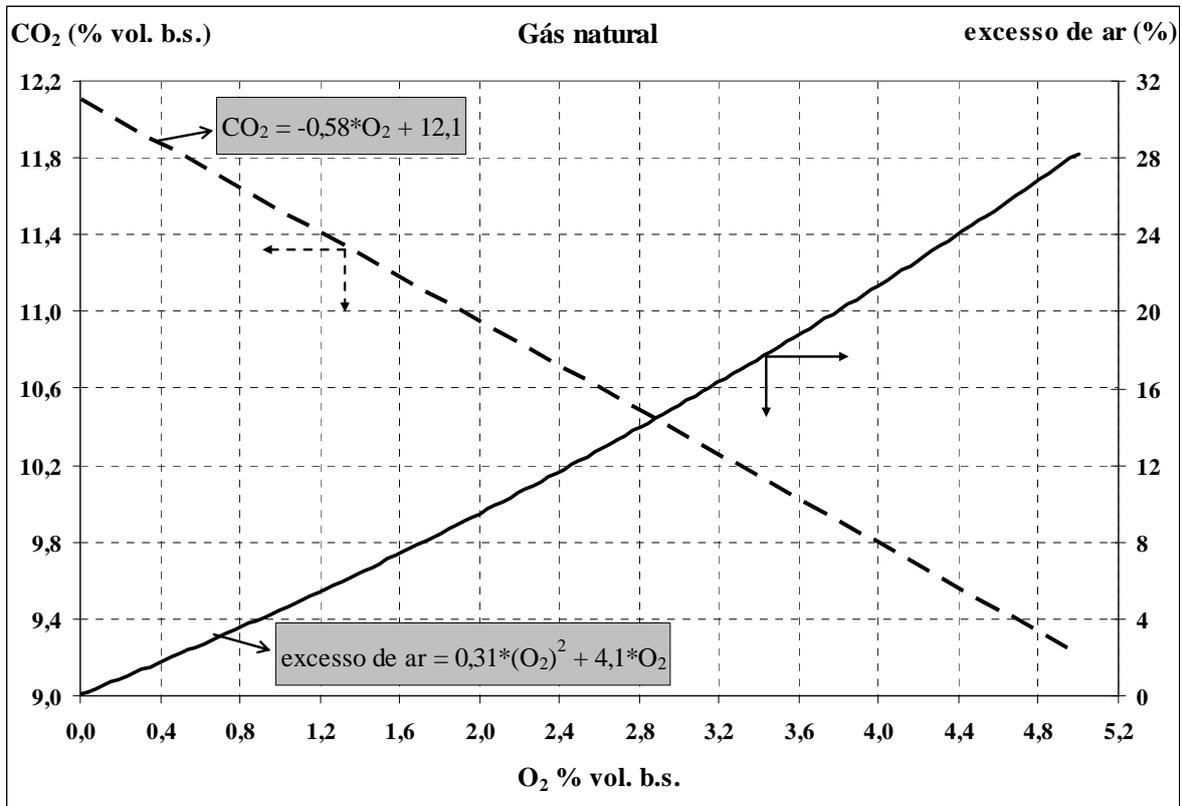


Figura 2. Parâmetros da combustão do gás natural.

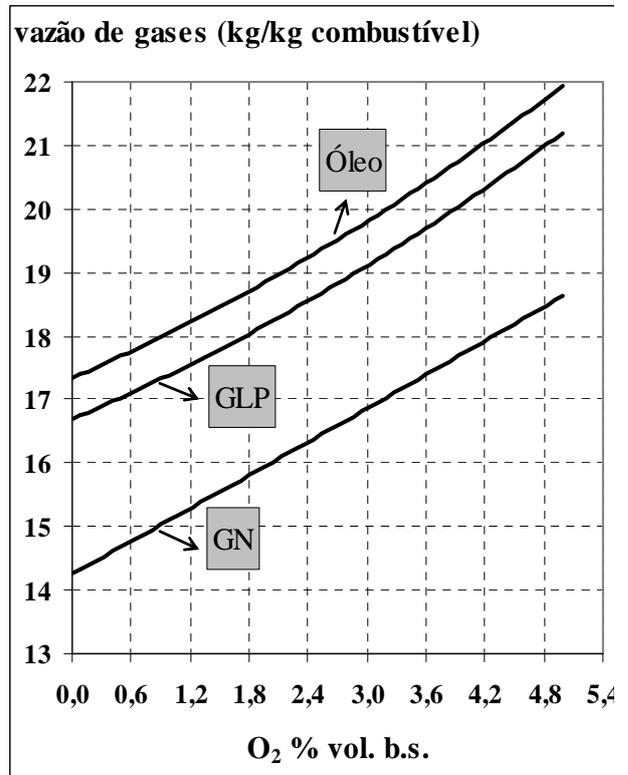
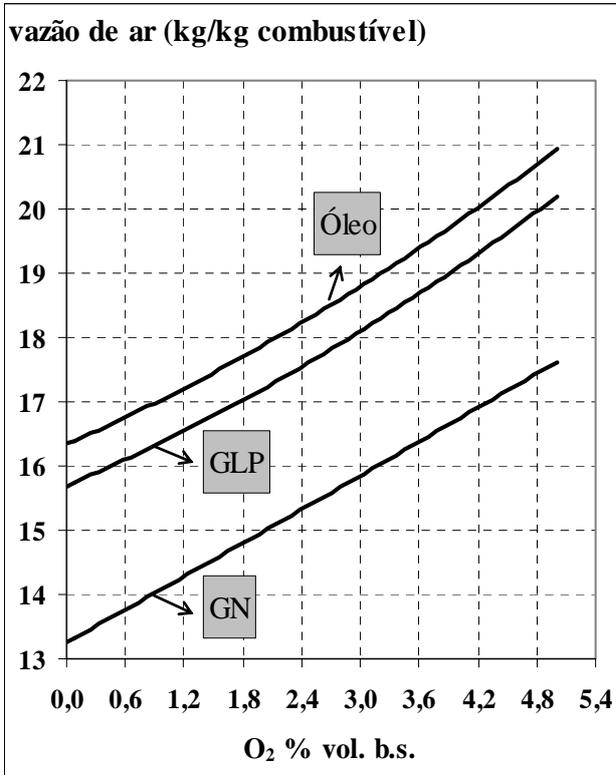
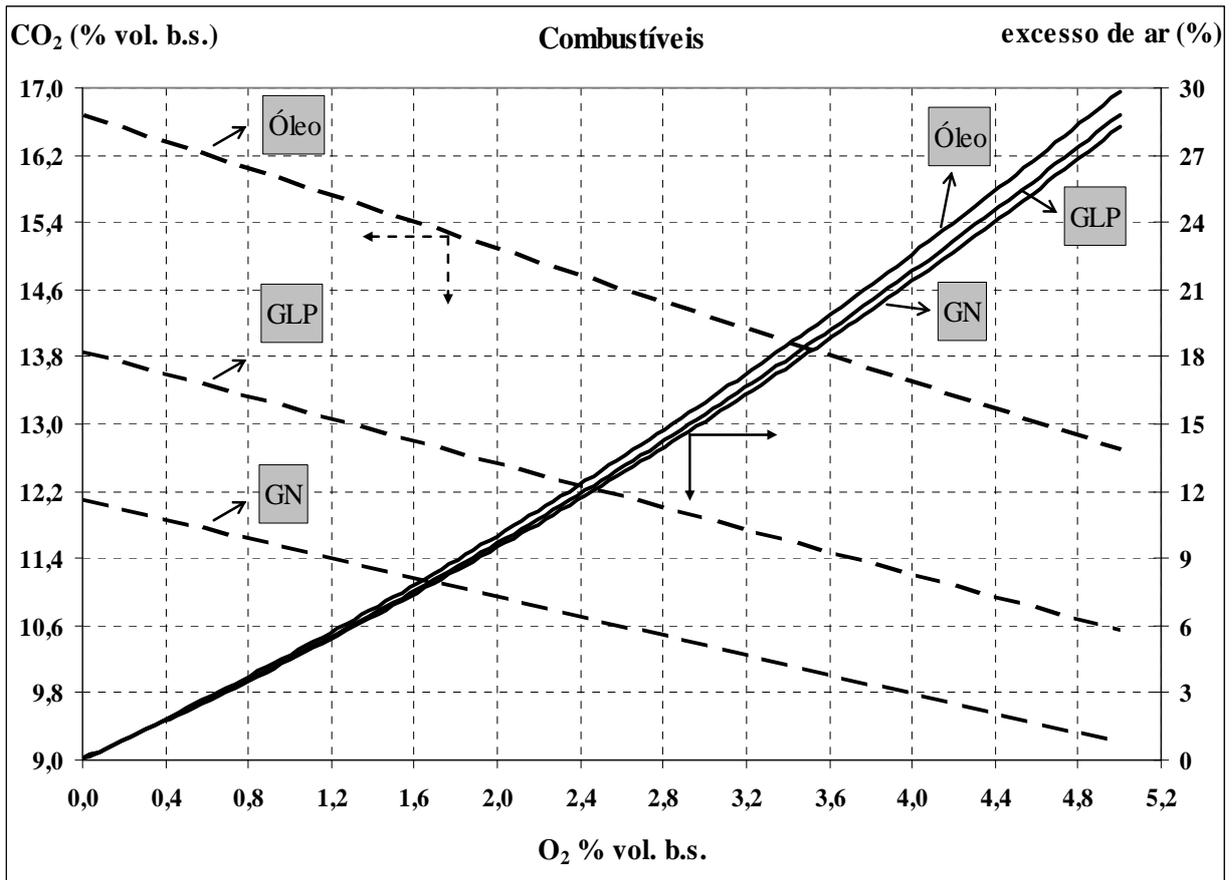


Figura 3. Parâmetros da combustão do gás natural, GLP e óleo combustível

4 CALDEIRA FOGOTUBULAR

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em cinco itens: introdução; caldeiras; caldeira fogotubular; gerador de água quente e aquecedor de fluido térmico.

Destaque para os tipos existentes de queimadores de gás natural de caldeira (Figura 4).

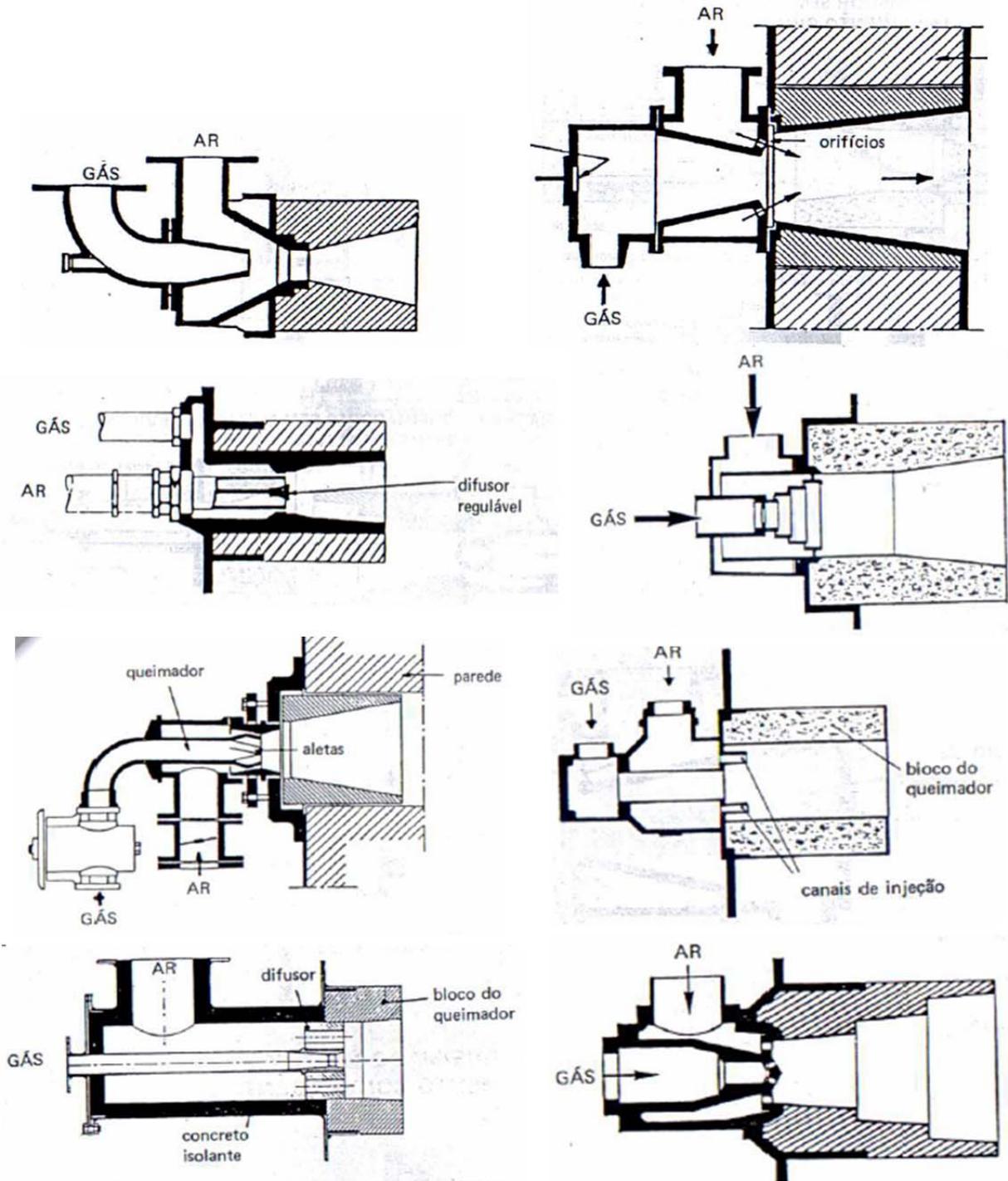


Figura 4. Queimadores de gás natural de caldeira.⁽⁵⁾

5 INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E SEGURANÇA DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em quatro itens: introdução; sistemas de combustão de gás; sistemas comerciais de combustão de gás e detectores de gás natural.

Destaque para um “cavalete” típico de gás natural (Figura 5) e para tipos de detectores portáteis comerciais de gás natural no ar ambiente (Figura 6).

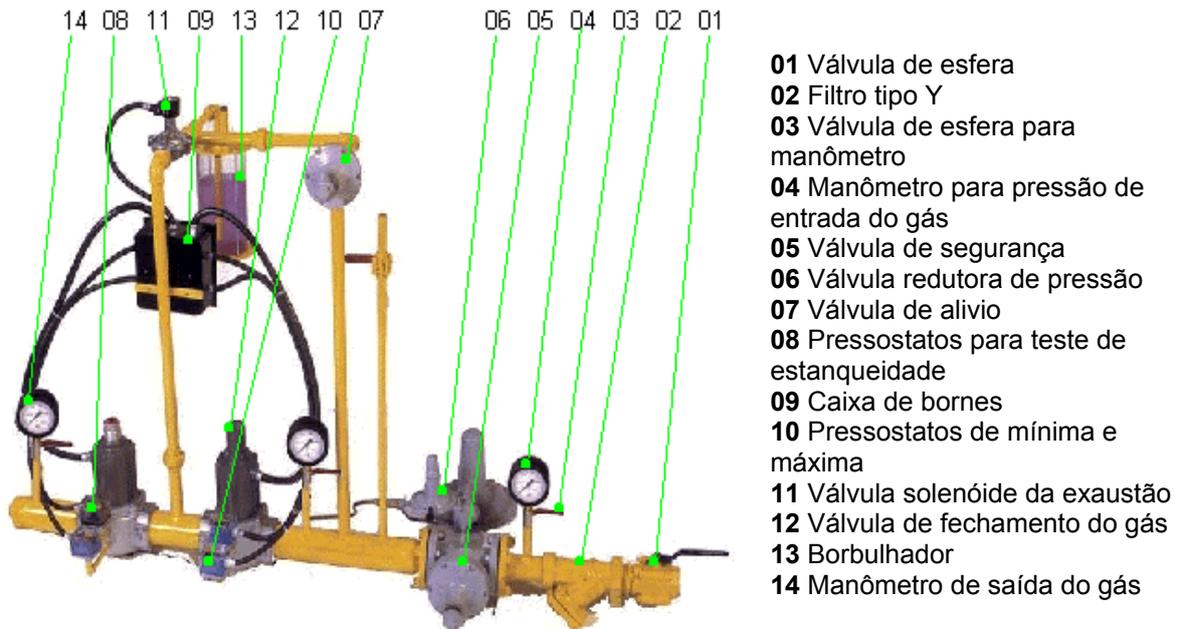


Figura 5. Queimadores de gás de caldeira.⁽⁶⁾



Figura 6. Detectores portáteis comerciais de gás natural no ar ambiente.^(7,8)

6 RENDIMENTO TÉRMICO DE CALDEIRA

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em dois itens: introdução e cálculo do rendimento de caldeira.

Destaque para o “volume de controle” usualmente considerado para a determinação do rendimento térmico de caldeiras (Figura 7) e para a influência da temperatura e do teor de O₂ dos gases de combustão no rendimento (Figura 8).

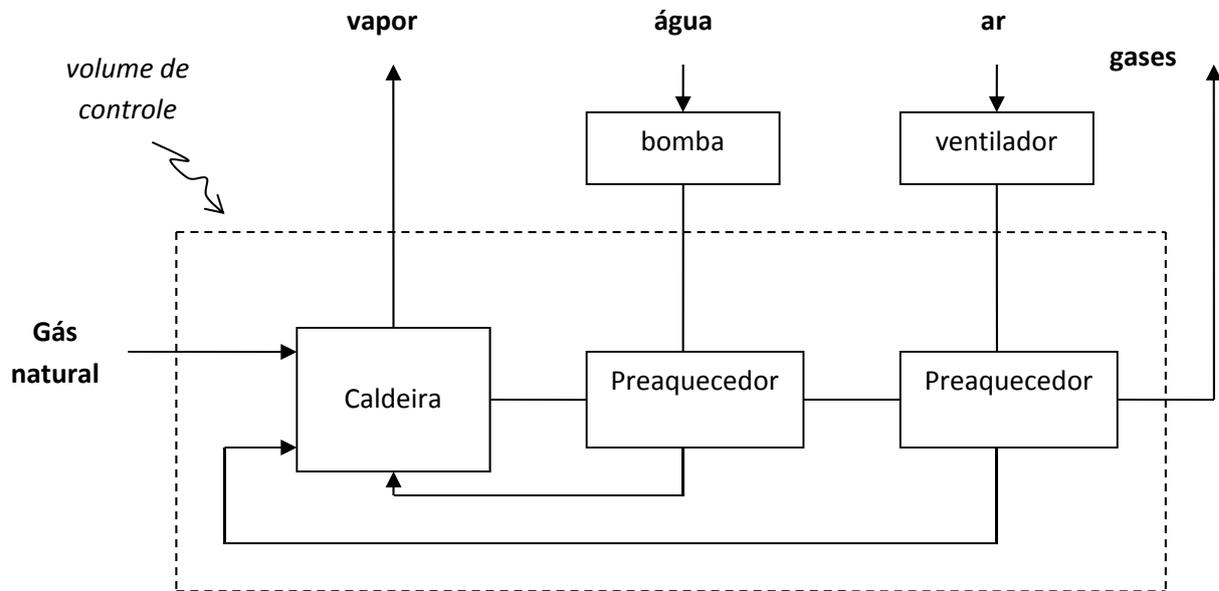


Figura 7. Fluxograma simplificado da caldeira.

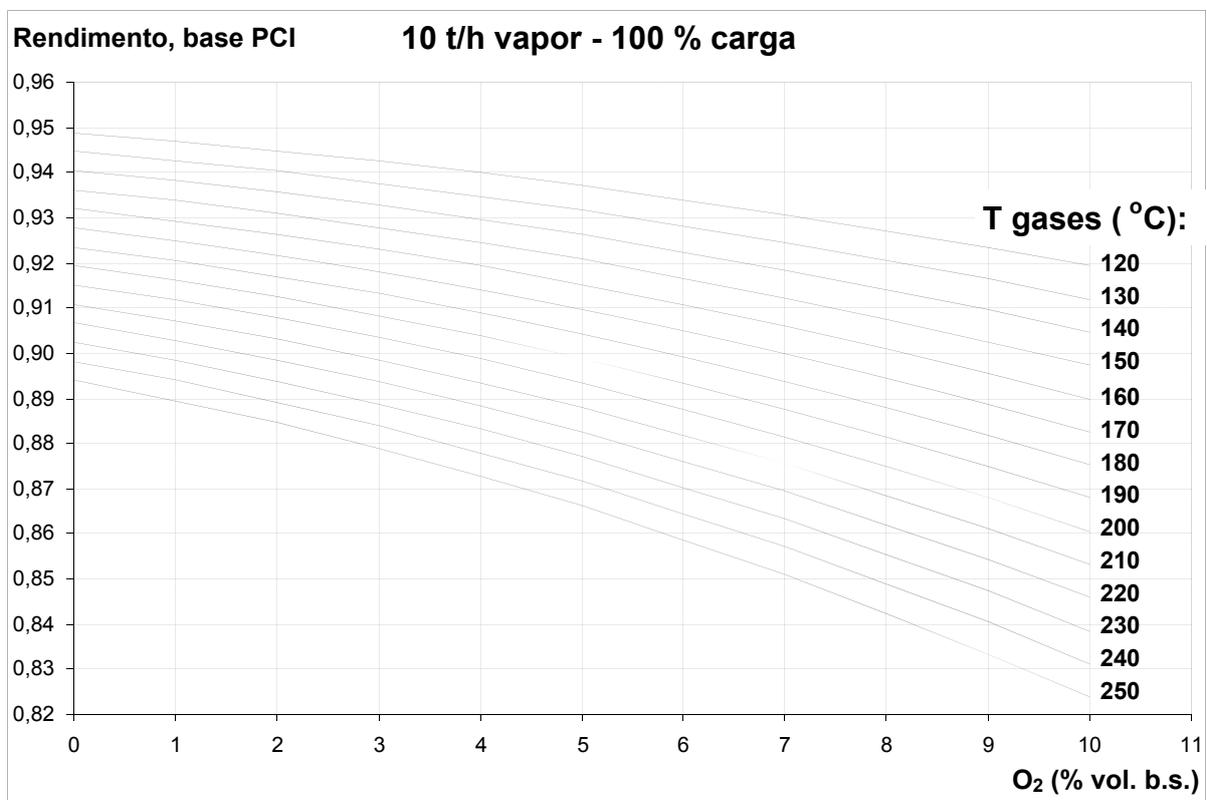


Figura 8. Efeito do excesso de ar e da temperatura dos gases de combustão no rendimento da caldeira.

7 EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em seis itens: emissão de poluentes na queima de combustíveis; poluição atmosférica; estratégia de controle da poluição atmosférica; emissão de poluentes na queima de gás natural; técnicas de controle da emissão de NO_x e instrumentação para medição das emissões atmosféricas resultantes da queima de gás natural.

Destaque para a influência da temperatura e do teor de oxigênio nas chamas de gás natural na formação de NO_x (Figura 9) e para um queimador típico de baixa emissão de NO_x - “Low NO_x burner” (Figura 10).

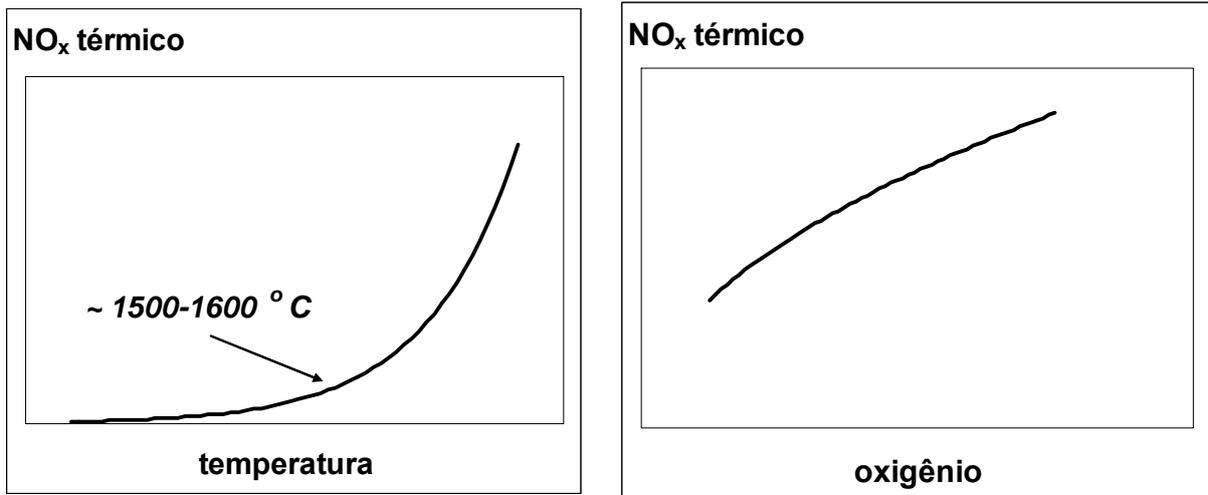


Figura 9. Influência da temperatura e do teor de oxigênio na formação de NO_x .

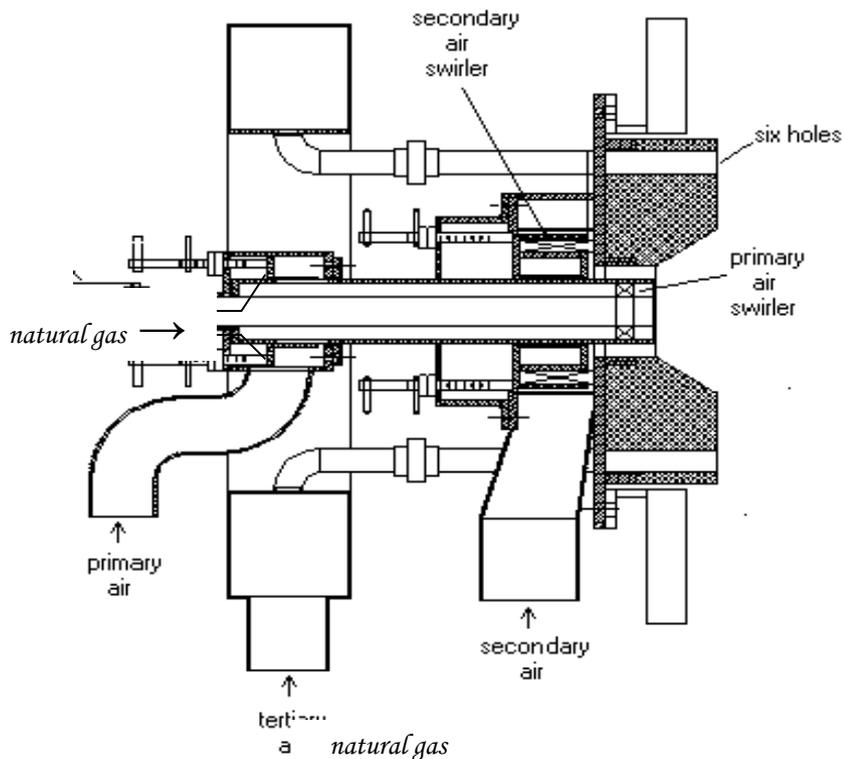


Figura 10. Queimador de baixa emissão de NO_x para gás natural.⁽⁹⁾

8 SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em três itens: introdução; substituição de GLP por gás natural e substituição de óleo combustível por gás natural.

Destaque para a análise comparativa entre óleo combustível e gás natural quanto às trocas de calor e a emissão de poluentes em uma caldeira (Tabelas 3 e 4).

Tabela 2. Trocas de calor em caldeira de 15 t/h de vapor na operação com óleo e com gás natural

Combustível	óleo 1B	GN
Potência de operação (% plena carga)	100	100
Coefficiente de ar (ar / ar esteq.)	1,200	1,200
Temperatura do ar (K)	298	298
Potência total fornecida à câmara de combustão (kW) ⁽ⁱ⁾	12384	12453
Vazão de combustível (kg/h)	1109,67	950,66
Teor de O ₂ dos gases (% b.s.)	3,65	3,82
Emissividade da mistura gasosa	0,920	0,182
Área global de troca de calor, GS _t) _{R,C} (m ²)	26,06	6,22
Temperatura de chama adiabática (K)	2108	2059
Carga reduzida de superfície, D'	0,486	2,258
Eficiência reduzida do tubulão, Q'	0,282	0,164
Eficiência da transferência de calor no tubulão, η_t	0,329	0,192
Potência fornecida à superfície do tubulão, Q _{q→1} (kW)	4073	2393
Fração da potência útil transferida no tubulão (%)	36,5	21,5
Fração da potência útil transferida na zona de convecção (%)	63,5	78,5
Entalpia do fluxo de gases na saída tubulão (kW)	8311	10060
Temperatura dos gases à saída do tubulão (K)	1505	1739
Temperatura dos gases à saída da convecção (K)	508	512
Vazão de gases (kg/h)	19499	19552
Eficiência global da caldeira referida ao PCI do combustível (%)	90,0	89,5

(i) Inclui a entalpia sensível do ar (se preaquecido).

Tabela 3. Emissões de poluentes atmosféricos na queima de óleo e gás natural⁽¹⁰⁾

	óleo	GN
NO _x (mg/m ³ n b.s. 3 % de O ₂)	1074 ⁽ⁱ⁾	157
CO ₂ (gCO ₂ /Mcal base PCS potência "input")	323	216
SO _x (mg/m ³ n b.s. 3 % de O ₂)	1374 ⁽ⁱⁱ⁾	~ 0
MP (mg/m ³ n b.s. 3 % de O ₂)	300-500	~ 0

(i) Para 0,8 %, em massa de nitrogênio no óleo; (ii) Para 0,8 %, em massa de enxofre no óleo.

9 REDUÇÃO DE CONSUMO DE GN EM CALDEIRA FOGOTUBULAR

Os assuntos tratados neste capítulo são dispostos em um único item: economia de gás natural.

Destaque para o efeito estimado das condições operacionais da caldeira no seu consumo de gás natural (Tabela 4).

Tabela 4. Efeito estimado das condições operacionais da caldeira no seu consumo de gás natural

Ação	Efeito estimado no consumo de gás natural
1. Redução do excesso de ar de combustão	Redução até 4,5 % → p/ O ₂ gases entre 1 e 7 %
2. Aumento da temperatura do ar de combustão	Redução 1 % para cada 20 °C
3. Aumento da temperatura da água de alimentação (economizador, retorno de condensado)	Redução 1 % para cada 6 °C
4. Redução da temperatura dos gases na chaminé	Redução até 8 % → p/ T gases entre 130 e 250 °C
5. Redução da potência de operação da caldeira	Aumento ⁽ⁱ⁾ até 4,2 % → p/ potência entre 100 e 50 % nom.
6. Aumento do teor de CO dos gases de combustão	Aumento até 0,3 % → p/ CO gases entre 0 e 1000 ppm

(i) Para caldeiras de até 18-20 t/h vapor; a partir daí o efeito se inverte.

REFERÊNCIAS

- 1 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02/01/2007. Resolução Nº 436 de 22/12/2011.
- 2 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação após 02/01/2007. Resolução Nº 382 de 26/12/2006.
- 3 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS Especificação do gás natural, de origem nacional ou importada, a ser comercializado em todo o território nacional. Portaria Nº 104 de 9/7/2002.
- 4 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) Balanço Energético Nacional (BEN) 2011 (ano base 2010).
- 5 POULALLION, P. Manual do gás natural. Coleção José Ermírio de Moraes, Editado pelo Conselho para Assuntos de Energia (COASE) da Confederação Nacional da Indústria (CNI), 1986.
- 6 QUEIMADORES PFF LTDA. (www.oertlipff.com.br)
- 7 CONFOR INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. (www.confor.com.br);
- 8 WHITE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE LTDA. (www.whitegas.com.br).
- 9 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) Alternative Control Techniques Document - NO_x emissions from industrial/commercial/institutional (ICI) boilers, EPA-453/R-94-022, 03/1994.
- 10 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, 5ª edição; Volume I: Stationary Point and Area Sources; Chapter 1 - External Combustion Sources, 15/01/2008.