

O GÁS NATURAL E SUA UTILIZAÇÃO EM EQUIPAMENTOS TÉRMICOS ¹

Paulo César da Costa PINHEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG
pinheiro@demec.ufmg.br

RESUMO

O gás natural tem aumentado significativamente a sua participação no balanço energético nacional, graças à distribuição do gás da bacia de campos e em breve do gás da Bolívia. Muitas indústrias servidas por gasodutos estão convertendo seus processos para a utilização do gás natural em substituição ao GLP e óleo combustível. Entretanto a conversão para o gás natural, apesar de simples, traz à luz novos problemas operacionais: problemas de transmissão de calor, controle de combustão, segurança, estocagem de gás etc. Este trabalho apresenta uma análise do uso do gás natural em sistemas de aquecimento, mostrando resultados de simulação do uso de gás natural em caldeiras e fornos, análise das estratégias de controle da combustão do gás natural puro e em mistura com outros combustíveis, e recomendações para a otimização do seu uso.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do gás natural (GN) no Brasil iniciou-se com a descoberta de petróleo e gás natural nos campos de Aratu e Itaparica no Recôncavo Baiano (1942), sendo o gás produzido utilizado na termoelétrica de Cotegipe, na fábrica de cimento de Aratu, e em algumas indústrias têxtil e cerâmica localizadas na região. Fora raros exemplos, o GN foi até bem pouco tempo, relegado a um papel secundário, reinjetado nos poços para a recuperação secundária de petróleo, ou mesmo queimado nas próprias plataformas.

Em 1962 a Petrobrás instalou uma planta de processamento de gás natural, em Catu BA, para a obtenção do líquido de gás natural (gasolina natural C_5^+), e em 1970 uma unidade para a produção de GLP na refinaria de Mataripe. Em 1971, o gás natural foi utilizado como matéria prima para a produção de amônia e uréia em uma indústria de nitrogenados localizada em Camaçari. Com a implantação do Pólo Petroquímico de Camaçari (1978), aumentou-se o uso do gás natural no setor industrial. A descoberta de gás na plataforma continental de Sergipe, a construção do gasoduto Sergipe-Bahia, a instalação da planta de processamento de gás natural e da fábrica de fertilizantes em Sergipe, e a apropriação de reservas de gás não associado, asseguraram a utilização das reservas de gás da região.

A partir da década de 80, a crescente oferta de gás associado na plataforma continental do Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e Ceará, as descobertas de gás não associado no Espírito Santo e Alagoas, Rio Grande do Norte, e Amazonas (Rio Juruá), e a instalação dos gasodutos ligando a bacia de Campos a São Paulo e Minas Gerais, possibilitaram ampliar o mercado consumidor, e diversificar a sua utilização, criando uma participação efetiva do gás natural no balanço energético nacional.

¹ PINHEIRO Paulo César da Costa. O Gás Natural e sua Utilização em Equipamentos Térmicos. In: II SEMINÁRIO DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, 12-13 Junho 1996, Guarulhos, SP, Anais... São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, Palestra 9, 11p. (Anais em disquete).

2. GÁS NATURAL

O gás natural (GN) é uma mistura de hidrocarbonetos e outros compostos químicos, encontrada em fase gasosa ou em solução com o petróleo em reservatórios naturais subterrâneos. Os hidrocarbonetos presentes no GN são os mais leves da série parafinas (hidrocarbonetos saturados, C_nH_{2n+2}). O principal composto presente é o metano (CH_4), além do etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), hexano (C_6H_{14}) e pequenas quantidades de compostos parafínicos mais pesados. Dependendo da jazida, pode ser encontrado pequenas quantidades de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), água (H_2O), gás carbônico (CO_2), monóxido de carbono (CO), gás sulfídrico (H_2S), hélio (H), argônio (Ar) e mercaptanas (R-SH). O vapor de água presente encontra-se saturado, e seu teor definido pela temperatura de distribuição do gás. O CO_2 , apesar de ser considerado inerte por não queimar, forma ácido na presença de água livre.

Quanto a origem o Gás Natural é classificado em:

- Gás associado.** Encontrado dissolvido no petróleo cru e/ou formando uma camada protetora gasosa sobre ele (gás livre). Quanto mais fundo o poço, encontra-se mais gás do que petróleo. No Brasil cerca de 65% das reservas de GN e 85% de sua produção é de gás associado, e em todo mundo cerca de 40%.
- Gás não associado.** Encontrado em depósitos subterrâneos, não acompanhado de hidrocarbonetos em fase líquida.

Existem várias teorias que explicam a origem do petróleo e do gás natural: a degradação termoquímica da matéria orgânica (restos de animais e vegetais, depositados no fundo dos mares e lagos do passado), a maturação dos leitos de carvão e rochas ígneas (formadas por resfriamento e solidificação de magmas) e metamórficas (originadas de rochas pré-existentes, por transformações mineralógicas, químicas e estruturais, essencialmente no estado sólido, em resposta a marcantes mudanças na temperatura, pressão, e a movimentos da crosta terrestre.

O GN e o petróleo são originários principalmente da maturação térmica da matéria orgânica contida nas rochas. As características do combustível formado vão depender do tipo de matéria orgânica predominante, e a história térmica da bacia. As rochas geradoras são continuamente soterradas pela deposição de novos sedimentos, o que as submete a uma elevação constante da temperatura e pressão, formando os hidrocarbonetos.

Tabela 1. Composição Típica (%vol) do Gás Natural da Bacia de Campos [11]

Componente	Gás Natural	UPGN*
Nitrogênio	0,63	1,22
Oxigênio	-	0,14
CO_2	0,64	0,54
Metano	77,94	85,73
Etano	11,93	9,10
Propano	6,11	2,18
i-Butano	0,84	0,29
n-Butano	1,32	0,52
i-Pentano	0,29	0,12
n-Pentano	0,23	0,12
n-Hexano	0,05	0,01
C_7^+	0,02	0,03

Tabela 2. Características Físico-Químicas médias do Gás Natural (20°C, 1atm)

Poder Calorífico Superior	9400 kcal/m ³
Poder Calorífico Inferior	8450 kcal/m ³
Densidade Relativa (ar)	0,601
Índice Wobbe (PCS)	11939
Peso Molecular	17,41g/mol
Número Weaver	16,6
Fator Compressibilidade	0,9980

*Unidade de Produção de Gás Natural da REDUC, Maio 1986.

A quantidade e composição dos hidrocarbonetos gerados, modificam-se gradativamente em função da elevação da temperatura. Em sedimentos recém depositados, que se encontram a baixas temperaturas, a atividade microbiana é o principal agente de degradação, gerando o biogás. Quando a matéria orgânica, principalmente a originária de algas, é submetida a condições térmicas adequadas (paleo-temperaturas entre 60 e 80°C), começa a fase de formação de hidrocarbonetos líquidos. Com o aumento progressivo da temperatura (até a faixa de 130-150°C), a matéria orgânica remanescente e os hidrocarbonetos já formados, convertem em metano termogênico.

Depois que o GN sai de suas jazidas ele sofre um processamento para retirar as frações pesadas (propano, butano etc), de maior valor econômico, e as impurezas (H₂S, CO₂). O H₂S deve ser retirado devido a sua elevada toxicidade e formação de ácido. O CO₂ para aumentar o poder calorífico e evitar a formação de gelo seco. Em seguida é enviado por gasodutos às empresas distribuidoras (CEG/Congás/Gasmig) ou diretamente às indústrias, onde é realizado o consumo.

As especificações do gás natural são dadas pelo Regulamento Técnico CNP-23/87:

Tabela 3. Regulamento Técnico CNP-23/87, resolução 17/87, DOU 21/12/87:

CARACTERÍSTICA	VALOR	MÉTODO
PCS 20°C, 1atm	8500-12500 kcal/m ³	ASTM D-3588
PCI 20°C, 1atm	7600-11500 kcal/m ³	ASTM D-3588
Densidade 20°C	0,60-0,81 relativo ar	ASTM D-3588
Enxofre total *	110 max mg/m ³	ASTM D-2385
H ₂ S	29 max mg/m ³	ASTM D-2385
N ₂ + CO ₂	6 max % vol	ASTM D-1945

* Enxofre total = H₂S + enxofre mercaptídico.

Nota: O produto deve ser isento de hidrocarbonetos condensados, óleos e partículas sólidas.

3. RESERVAS MUNDIAIS DE GÁS NATURAL

Suprindo cerca de 21% do consumo energético mundial, o gás natural é a terceira fonte de energia, após o petróleo e carvão. As reservas confirmadas (medidas e avaliadas) são de aproximadamente 141,1 trilhões de m³, 117,9.10⁹ tep (toneladas equivalente petróleo) (tabela 4), suficientes para 65,8 anos de atual consumo, e as reservas últimas (a serem descobertas e confirmadas) 240 trilhões de m³. As reservas de gás natural são da mesma ordem de grandeza das de petróleo 139,9.10⁹ tep, mas mantidas as atuais tendências de crescimento de consumo, ele se esgotará antes do petróleo. Os maiores consumidores mundiais são os Estados Unidos e Holanda.

Tabela 4. Reservas mundiais de Gás Natural (10¹²m³) [8]

Região	1980	1995
América do Norte	8,0	6,8
América Latina	4,3	7,5
Europa Ocidental	3,9	5,4
Europa Oriental/ex-URSS	26,3	56,8
África	6,1	9,6
Oriente Médio	18,1	45,1
Ásia e Oceania	4,9	9,9
TOTAL	72,2	141,1

O gás natural é produzido em mais de 70 países, e sua comercialização desvinculada do

cartel da OPEP, sendo a influência de monopólio menor que no petróleo. Os preços mundiais têm caído substancialmente, situando-se na faixa de 7-11 US\$/bep (barril equivalente petróleo). O custo de produção do gás natural (por quantidade de energia) é 6,6 vezes menor que do carvão e 2,6 vezes menor que do petróleo.

Devido à dificuldade de se transportar a grandes distâncias e a uma melhor distribuição geográfica das reservas, cerca de 90% do gás consumido no mundo foi produzido localmente ou países próximos, quando sua transmissão é feita por gasodutos. Tradicionalmente as reservas locais, de mais fácil acesso, são as mais exploradas.

As principais reservas Brasileiras estão na bacia de Campos (RJ). As reservas totais, medidas e inventariadas são de $146,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ($141,8 \cdot 10^6 \text{ tep}$, 25% das reservas de petróleo), e as inferidas e estimadas $86,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ [7]. As reservas Brasileiras podem crescer muito devido a recentes descobertas ainda não completamente inventariadas. Em Juruá (AM) foram confirmadas reservas da ordem de 10^{10} m^3 , mas estimativas preliminares indicam $120-200 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. A dificuldade de sua utilização seria a necessidade de construção de um gasoduto de 3000km ligando jazida à região sudeste, ao custo de cerca de 5 bilhões de dólares.

No Brasil o gás natural tem apresentado nos últimos anos, um aumento significativo de sua participação no consumo total de fontes primárias, passando de 0,3% em 1973 para 2,5% em 1994 [7]. Mesmo com o crescente aumento de produção, e do fato da maior parte dessa produção (85%) estar associada à extração do petróleo, o índice atual de comercialização do GN é somente 85%. Ele deverá ter uma participação crescente no balanço energético nacional, passando dos atuais 2,5% para 4% no ano 2000 e 15% em 2020 [2], caso tenha oferta suficiente. Essa demanda poderá ser atendida através da importação da Bolívia e Argentina, e prioridade na produção de gás natural nos poços onde está associado. Este aumento de demanda dever-se-á a uma legislação sobre emissão de poluentes mais rigorosa, à utilização em veículos automotivos e em cogeração. Outro setor que deverá utilizar o GN como combustível é a energia elétrica, através de instalação de termoeletricas ao longo do gasoduto da Bolívia, principalmente no Mato Grosso do Sul.

4. UTILIZAÇÃO DE GÁS NATURAL EM EQUIPAMENTOS TÉRMICOS

Em um equipamento térmico, operando com qualquer combustível, busca-se atender os seguintes objetivos:

- a) Baixo custo operacional;
- b) Combustão completa com segurança e operacionalidade;
- c) Máxima eficiência térmica (transmissão de calor otimizada);
- d) Níveis de emissão de poluentes (SO_2 , particulados, CO, hidrocarbonetos e NO_x) dentro dos níveis regulamentares.

Atender a estes objetivos simultaneamente, supera a técnica tradicional de controle de combustão, tornando-se um processo complexo de otimização. As características do GN fazem dele uma excelente alternativa para os demais combustíveis, devido às seguintes vantagens:

- a) Encontra-se pronto para o consumo, não sendo necessário manipulações ou preparação antes da combustão.
- b) O gás natural é facilmente miscível com o ar, obtendo-se um contato íntimo entre o combustível e o ar, reduzindo-se o excesso de ar necessário para assegurar a combustão completa. É fácil o controle da atmosfera da fornalha, e a obtenção de uma chama longa, de combustão lenta, com liberação gradual e uniforme da energia.
- c) O gás se desloca e se manipula com facilidade. Basta uma válvula para regular com precisão as vazões de ar e gás. Pode-se obter variações rápidas e grandes da vazão, mantendo-se constante a relação de mistura.
- d) O GN praticamente não contém impurezas. Seus produtos de combustão têm baixos níveis de

poluição, comparativamente aos outros combustíveis. O teor de enxofre do GN é muito inferior ao dos carvões e dos óleos combustíveis. Não origina depósitos de resíduos que contaminam a produção ou que afetem a eficiência do equipamento e/ou instalações. Isto simplifica e diminui os custos de operação e manutenção.

e) Em estado gasoso, o GN permite várias configurações e tipos de queimadores, além de grande flexibilidade no seu funcionamento. A eficiência dos sistemas de combustão à base de GN é em geral maior, porque permite maior flexibilidade de regulação e controle dos equipamentos.

Entre as desvantagens do gás natural, pode-se citar:

a) A densidade do gás natural é muito menor do que a dos combustíveis sólidos e líquidos. Isto leva a dificuldades de armazenamento e de transporte.

b) Devido ao alto teor de hidrocarbonetos leves (alto teor de hidrogênio), os produtos da combustão possuem grande quantidade de vapor-d'água. Assim, o calor específico dos produtos é alto, as temperaturas de combustão são mais baixas e existe os problemas devido à condensação do vapor.

c) A quantidade (massa) de combustível dentro da fornalha é muito pequena. Isso torna a combustão muito sensível à variação de consumo de ar e combustível, e permite, em caso de necessidade, modificar a carga da fornalha instantaneamente. Ao mesmo tempo torna-se crítico o controle da combustão, pois uma interrupção da alimentação provocará a extinção da chama, o que está vinculado ao perigo de explosão ao recomeçar a alimentação. Por isso, nessas fornalhas normalmente são instalados vários queimadores.

Os gás natural tem um grande espectro de aplicações, tanto em uso industrial quanto em uso doméstico. Na petroquímica é utilizado na reinjeção em poços para recuperação secundária de petróleo, na produção de GLP e gasolina natural, e como matéria prima na indústria petroquímica e de fertilizantes. O uso doméstico é limitado à substituição do GLP e do gás de rua, em locais onde existe rede de distribuição de gás canalizado.

Na indústria o GN pode ser utilizado em caldeiras, em substituição ao óleo combustível, para gerar vapor, ou aquecer fluido térmico, utilizado no aquecimento das indústrias de alimentos, papel e celulose, têxtil etc, acionamento de ventiladores, bombas e compressores e geração de eletricidade. Pode ser utilizado em substituição do GLP em oxicorte. O uso em fornos industriais é amplo, sobretudo devido à ausência de cinzas e ao baixo teor de enxofre, que poderiam contaminar o produto. O contato direto dos produtos da combustão com produtos alimentícios, apesar de prática usual, não é recomendável devido à presença de hidrocarbonetos.

O uso do GN como combustível automotivo reduz sensivelmente a emissão de poluentes. É cerca de 21% mais barato que o óleo diesel e seu uso como combustível aumenta a vida do motor, reduzindo os custos de manutenção e consumo de óleos lubrificantes. Pode ser utilizado em motores de combustão interna (Otto, Diesel), em substituição da gasolina e óleo diesel.

O uso em turbinas a gás é recomendado, pois os demais combustíveis devem sofrer tratamento prévio, afim de eliminar resíduos e evitar a contaminação a altas temperaturas. As turbinas a gás podem ser utilizadas para acionar bombas, compressores etc. Sua utilização mais importante é a geração de eletricidade, sobretudo em termoelétricas que trabalham em regime de ponta ou como unidades de emergência, pois podem entrar em operação em poucos minutos. O uso de turbinas a gás para geração termoelétrica vem aumentando, devido ao baixo investimento, baixo custo operacional e alto rendimento térmico. O uso de ciclo combinado (turbina a gás + caldeira de recuperação) permite atingir rendimentos da ordem de 55%, com baixa emissão de poluentes.

5. TRANSMISSÃO DE CALOR NAS CHAMAS DE GÁS NATURAL

O calor transmitido por radiação (Q_r) em uma fornalha totalmente fechada por superfícies receptoras de calor à temperatura T_p (K) é dado por:

$$Q_r = \sigma_0 A_p \epsilon_f (T_{ch}^4 - T_p^4)$$

onde σ_0 é a constante de Stefan-Boltzmann, ϵ_f a emissividade da fornalha (sistema chama/superfície receptora de calor), T_{ch} a temperatura da chama (K) e A_p a superfície das paredes. A temperatura das paredes, devido à incrustação de escória e deposição de cinzas, deve ser calculada levando-se em consideração o fluxo térmico e a resistência térmica da camada incrustada [5]. A emissividade da fornalha é dada por:

$$\epsilon_f = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} = \frac{\epsilon_c \epsilon_p}{\epsilon_c + \epsilon_p - \epsilon_c \epsilon_p}$$

onde ϵ_p é a emissividade das superfícies e ϵ_c e emissividade efetiva da combustão.

$$\epsilon_c = \eta \epsilon_{ch} + (1 - \eta) \epsilon_g$$

onde η é a fração da câmara ocupada da chama (p/ gás natural $\eta = 0,1$), ϵ_{ch} a emissividade da chama luminosa e ϵ_g a emissividade dos produtos da combustão.

A emissividade da chama é devida à emissividade dos gases triatômicos (CO_2 e H_2O), das partículas de fuligem, das partículas de combustível incandescentes (coque) e das partículas de cinzas. À mesma temperatura, as substâncias gasosas possuem uma emissividade muito menor que as sólidas. Em queimadores de pré-mistura, na chama do gás natural é não luminosa. A radiação emitida pela chama não luminosa é principalmente devido aos gases triatômicos (CO_2 e H_2O) presentes na fornalha. Sua radiação é seletiva e se situa principalmente na região infravermelha.

Em fornalhas industriais, onde é desejável uma chama longa e lenta. Isto é obtido por queimadores de chama de difusão, onde somente uma fração do ar de combustão é alimentado no queimador, e o restante dentro da fornalha. Como resultado, são criadas zonas de alta temperatura e deficiência de oxigênio, onde os hidrocarbonetos, especialmente as espécies insaturadas sofre o craqueamento térmico (pirólise) e forma partículas de carbono (fuligem). A incandescência dessas partículas forma uma chama de alto brilho, cuja temperatura máxima de combustão se situa próxima à porta do queimador, o que diminui o risco de extinção da chama. Assegurando alimentação de ar e tempo suficientes, as partículas de carbono realizam uma combustão secundária, mas se o ar for deficiente ou a chama instável, será produzida fumaça e depositado carbono sólido (fuligem). Assim, nos queimadores de difusão é necessário uma assegurar alimentação de ar secundário para a conclusão da combustão.

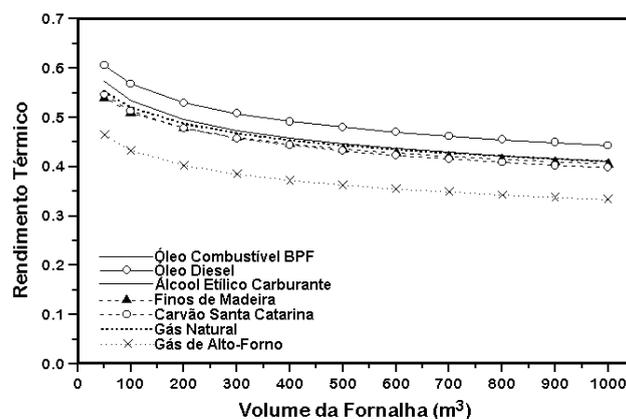


Figura 1. Rendimento térmico da fornalha.

A emissividade de qualquer meio gasoso é calculada pela lei de Bouguer:

$$\begin{aligned}\epsilon_{ch} &= 1 - \exp(-(K_g + K_s) P S_{ef}) \\ \epsilon_g &= 1 - \exp(-K_g P S_{ef})\end{aligned}$$

onde S_{ef} é o comprimento efetivo do meio semi-transparente, P a pressão total dos gases dentro da fornalha (atm), K_g o coeficiente de atenuação da radiação pelo meio semi-transparente e K_s o coeficiente de atenuação pelas partículas de fuligem. K_g e K_s podem ser calculados por [5]:

$$K_g = \left[\frac{0,78 + 1,6 R_{H_2O}}{\sqrt{P S_{ef}} (R_{H_2O} + R_{CO_2})} - 0,1 \right] \left[1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right] (R_{H_2O} + R_{CO_2})$$

$$K_s = 0,03 (2 - \alpha) (0,0016 T_g - 0,5) (C/H_2)$$

onde T_g é a temperatura dos gases na saída da câmara de combustão, $(R_{H_2O} + R_{CO_2})$ a fração volumétrica dos gases triatômicos, α o coeficiente de excesso de ar, C e H_2 a razão carbono-hidrogênio do combustível.

A análise dos processos de transmissão de calor e de combustão do gás natural em fornalhas, é difícil devido ao grande número de variáveis envolvidas, ficando oculta a influência de cada variável no contexto global. A existência deste problema nos levou a procurar na simulação, a sua solução. Vários métodos de cálculo da transmissão de calor em fornalhas de caldeiras aquatubulares a combustível pulverizado foram analisados, e dentre eles, o Método CKTI [5], foi o que apresentou a maior flexibilidade quanto à aplicação a diversos combustíveis alternativos. A figura 1 [9] mostra rendimento térmico de uma fornalha, com a utilização do óleo combustível BPF, gás natural e diversos combustíveis alternativos.

Na combustão do gás natural a menor deposição de fuligem sobre as superfícies da fornalha proporciona uma maior transmissão de calor. Além disso, a grande velocidade de combustão permite grandes taxas de liberação de energia no volume da fornalha (até 350 kW/m³), sem que a chama atinja o duto de saída da fornalha. Assim, a utilização do gás natural, ou mesmo do gás de coqueria e do gás de refinaria (não representados na figura), pode-se obter, até mesmo uma maior produção térmica do que com o óleo combustível. Resultados análogos da simulação da utilização de gás natural em caldeiras para óleo foram encontrados por Davies e Oeppen [1].

6. QUEIMADORES PARA GÁS

Os queimadores de gás são classificados em 3 tipos, quanto ao local onde o gás combustível é misturado com o ar de combustão:

- Queimador de pré-mistura: o gás é misturado com o ar de combustão a montante do queimador, e a mistura combustível, com baixo excesso de ar é introduzida na fornalha.
- Queimador de chama de difusão: o gás e o ar são alimentados separadamente na fornalha, e a mistura é realizada ao mesmo tempo que a combustão, pelo processo de difusão turbulenta.
- Queimador de tipo intermediário: ar e gás são misturados parcialmente no queimador, e a mistura sofre adição de ar, por difusão, no interior da fornalha. Quanto maior for a mistura dentro do queimador, maior o seu desempenho.

A escolha de um queimador para gás é delicada, devido aos vários parâmetros que

influenciam seu funcionamento: poder calorífico, temperatura, pureza do gás; pressão e temperatura do ar; comprimento, luminosidade e temperatura da chama; pressão e tipo de atmosfera no interior da fornalha. Mudanças da composição do combustível provocam importantes variações na velocidade da chama e nos limites de inflamabilidade, e estas propriedades de propagação da chama afetam o projeto dos queimadores de gás. Assim, na escolha do queimador deve-se procurar atender as seguintes condições de uma boa combustão:

- a) Mistura ar/combustível homogênea, com excesso de ar mínimo, em toda faixa de operação;
- b) Baixa velocidade de saída, para evitar o descolamento da chama;
- c) Possibilidade de regular o volume e comprimento da chama, para assegurar o preenchimento da fornalha e evitar impacto sobre as paredes;
- d) obtenção de uma chama luminosa para melhorar a transmissão de calor por radiação.

6.1 Queimadores de Pré-Mistura

Como a mistura ar/combustível é de fácil explosão, esta mistura deve ser realizada somente dentro do corpo do queimador. Em caldeiras de pequena capacidade, gás a alta pressão pode ser queimado em queimadores de aspiração, onde o ar é aspirado pelo jato de gás (queimadores de indução). A quantidade de ar aspirado é proporcional à vazão do gás. Assim, ao variar o consumo de gás (potência do queimador), o coeficiente de excesso de ar permanece aproximadamente constante. O excesso de ar é regulado por uma válvula que ajusta a vazão de ar. Mas, é mais comum utilizar um sistema de dois dutos, onde o ar de combustão é alimentado por um ventilador de tiragem forçada.

O uso de queimadores de pré-mistura permite redução do volume da fornalha, que é importante para as pequenas caldeiras. Eles são recomendados para a queima de combustíveis de baixo poder calorífico em caldeiras de pequeno porte. Entretanto, estes queimadores são grandes, comparados com outros tipos.

Os queimadores de pré-mistura incluem queimadores com pré-câmara de mistura, queimadores túnel, combustão catalítica (queima do combustível em um bloco refratário poroso, na presença de platina, sem a formação de chama). Estes queimadores são chamados sem chama, de chama azul ou de chama curta, uma vez que somente uma chama curta e pouco luminosa se forma na saída do queimador.

6.2 Queimadores de Chama de Difusão

As fornalhas das caldeiras de média e alta capacidade são dotadas de queimadores de chama de difusão ou do tipo intermediário. Quando utilizados com gás natural, os queimadores de difusão produzem uma chama luminosa de alta emissividade, devido à formação de fuligem. A forma mais simples é o bocal aberto, de seção redonda ou retangular, da tubulação de gás. São construídos de tamanho pequeno, para uso residencial, até queimadores industriais de 500kcal/hr.

Os queimadores de difusão são simples, baratos, estáveis e extremamente flexíveis quanto a resposta à demanda. Eles formam uma chama longa e luminosa, de baixa temperatura. O comprimento e a forma da chama pode ser controlado distribuindo o ar secundário por vários pontos da câmara de combustão. Isto é conveniente quando é necessário um aquecimento uniforme em uma fornalha longa.

Eles normalmente funcionam com gás a baixa pressão (>60mm CA) e as variações da pressão do gás devem ser estabilizadas por um regulador de pressão. O fator mais importante de projeto é a velocidade de combustão: se a velocidade de combustão for baixa e a velocidade de saída da mistura alta, a chama se torna instável, podendo se descolar do queimador e se extinguir, provocando a acumulação de mistura explosiva na fornalha. Um bom projeto de queimador e o controle da pressão e composição do gás, podem prevenir esta situação.

7. CONVERSÃO DE FORNALHAS PARA UTILIZAÇÃO DO GÁS NATURAL

A conversão de uma fornalha para o uso de gás natural depende, sobretudo de suas características. A conversão de uma fornalha a óleo combustível é simples e barata, mas as de combustão sobre grelha, mais difícil. Entretanto, não se pode generalizar, pois cada caso requer um estudo particular.

7.1 Caldeiras funcionando com óleo combustível

Se trata do caso mais fácil. Não são necessárias mudanças estruturais, e quase sempre é possível instalar os queimadores de gás em torno das lanças de óleo. As lanças de óleo são mantidas, como medida de segurança, para dispor de um combustível suplementar ou de emergência. De modo geral se podem utilizar os mesmos dispositivos de controle.

A conversão ao gás natural resulta, normalmente, em um pequeno aumento de rendimento, devido à redução do excesso de ar e da deposição de cinzas sobre as superfícies. Dependendo do tipo de caldeira, a temperatura do vapor superaquecido poderá manter-se ou aumentar. Testes realizados em 65 caldeiras [3], mostraram que apesar das perdas pela chaminé aumentarem cerca de 2,5% devido à presença de mais vapor-d'água, as outras perdas térmicas são menores e o rendimento total da caldeira aumenta em cerca de 3,5%. Alguns resultados operacionais da substituição de fornos e caldeiras para o uso de gás natural são apresentados em [12]

7.2 Caldeiras a combustível sólido com combustão sobre grelha [13]

A conversão destas fornalhas é mais difícil, mas, devido à grande variedade de modelos, é impossível generalizar as modificações necessárias e o desempenho resultante. A potência térmica da caldeira pode aumentar até 8%, devido à combustão mais limpa e rápida. O requisito essencial é que o volume da câmara seja suficiente para a combustão do gás. Esta condição é sempre satisfeita em caldeiras de radiação com fornalha integrada. A distância entre a soleira e os primeiros tubos deve ser suficiente para acomodar a chama, podendo ser necessário a retirada da grelha. Caso a grelha seja mantida, é necessário protegê-la com material refratário. Em alguns casos é possível a combustão simultânea de gás e carvão. Caso haja aumento da capacidade de vaporização, pode ser necessário a substituição das válvulas de segurança.

É recomendável instalar paredes de tubos de água em toda a fornalha, para resfriar as paredes refratárias, e aumentar a capacidade de evaporação da caldeira. Caso os painéis existentes sejam de tubos recobertos, deve-se descobrir os tubos, salvo nos pontos em contato com a chama.

A forma da fornalha, muitas vezes impossibilita a instalação dos queimadores na parede frontal. Os queimadores podem ser instalados nas laterais, mas em muitas caldeiras, existe pouco espaço para instalar corretamente os dutos ar e os queimadores. Nesta conversão, a posição dos queimadores na fornalha é crítica: se instalados alto, a temperatura do vapor superaquecido torna-se excessiva, se instalados baixo, aquece a grelha, soleira e paredes inferiores. Como a chama de gás é menos emissiva que a de carvão ou óleo, a transmissão de calor por radiação é menor, e a temperatura dos gases no superaquecedor maior, a qualquer carga. Deve-se evitar o contato da chama com a soleira ou as paredes laterais da fornalha.

O volume dos produtos da combustão é cerca de 20% menor, diminuindo a potência necessária de tiragem, e o ventilador de tiragem forçada poderá ser conservado. O aumento da pressão de tiragem é recomendado pois facilita a combustão do gás pelo aumento da turbulência. Deve ser evitado qualquer infiltração de ar na fornalha, pois ela cria instabilidades, dificultando que a combustão se complete na fornalha, formando chamas longas que atingem o superaquecedor. O ar de combustão deve ser igualmente distribuído por todos queimadores, de modo a evitar

problemas. A perda de carga dos queimadores deve ser igual à que existiam no leito de combustão.

7.3 Caldeiras de carvão pulverizado

De modo geral não é necessária modificação da câmara de combustão. Em algumas fornalhas pode ser necessário modificar ou substituir o circuito de ar, e instalar os queimadores de gás em posição distinta dos queimadores de carvão. O gás natural contém um maior teor de hidrogênio que o óleo combustível e o carvão. Um alto teor de hidrogênio no combustível produz um correspondente alto teor de vapor-d'água nos produtos da combustão, fator que contribui para reduzir a eficiência da fornalha.

8. GÁS NATURAL E O MEIO AMBIENTE

A combustão dos hidrocarbonetos produz essencialmente CO_2 e H_2O . Estes produtos não são considerados poluentes no funcionamento normal de instalações térmicas utilizando combustíveis fósseis. Entretanto, além desses produtos, são produzidos o monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SOx) e nitrogênio (NOx), que são poluentes. A tabela 5 apresenta a taxa de emissão de poluentes na queima de diversos combustíveis. Observa-se que o GN é muito menos poluente que o óleo combustível e o carvão, tornando-se assim, as plantas a GN mais fáceis de se localizar, regulamentar e operar dentro das normas ambientais. Entretanto, nos gasodutos são utilizados compressores acionados a turbinas a gás, onde, muitas vezes, não é controlada a emissão de NOx e CO ou fugas de gás.

Tabela 5. Emissões de poluentes dos combustíveis industriais (kg/tep, kg/10⁷cal)

Combustível	Gás Natural 7550 kcal/m ³	Óleo BTE 10000kcal/kg 1,0% enxofre	Carvão 7000 kcal/kg 1% enxofre
Poluente			
CO	0,3	0,7	1,5
NOx	2,3-4,3	8,2	1,5
SOx	0,007	20,0	29,2
CnHm	-	0,4	1,5
Aldeídos	-	0,28	0,004
Particulados	0,1-0,3	1,8	100

World Bank, Natural Gas Unit, Nov. 1989, SCHIMITT, O.A. *Gas Wervendung*, 1974.

Os óxidos de enxofre são formados pela oxidação do enxofre presente no combustível. Como no gás natural os teores de enxofre são extremamente baixos, as emissões de SO_2 e SO_3 nessas instalações são geralmente consideradas nulas.

Os óxidos de nitrogênio (NOx) podem ser formados de 2 modos distintos:

- a) Conversão do N quimicamente ligado no combustível (NOx combustível);
- b) Oxidação do N_2 do ar de combustão (NOx térmico).

A taxa de emissão de NOx combustível é sobretudo uma função do teor de nitrogênio no combustível. A taxa de emissão do NOx térmico é função da temperatura da chama, da quantidade de excesso de ar e do tempo de residência dos gases dentro da chama.

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para diminuir a emissão de NOx nas instalações utilizando gás natural [6]: filtragem, precipitação eletrostática, lavagem de gases, Injeção de diluente, redução catalítica (SCR), e controle e modificação na combustão. Dentre estas, as

técnicas de controle da combustão, onde a formação de NOx é limitada na chama, apresentam grande redução da emissão de NOx a um baixo custo, e são facilmente implementadas quando da combustão do gás natural:

a) **Combustão com baixo excesso de ar.** A combustão de gás permite uma boa homogeneização da mistura ar/combustível, permitindo utilizar uma taxa de excesso de ar muito baixa. Isso diminui as emissões de NOx, devido à redução do teor de oxigênio livre dentro da chama, ao mesmo tempo que permite um grande rendimento térmico [11].

b) **Combustão com alto excesso de ar.** Em certos processos industriais, onde é necessário um grande volume de ar de diluição (ex. secagem), a combustão pode ser efetuada com grande excesso de ar (<100%), o que diminui a temperatura da chama e as taxas de NOx [11].

c) **Recirculação de gases.** Esta técnica consiste de recircular uma parte dos produtos da combustão no ar de combustão. Também pode ser utilizado a injeção de vapor-d'água. Esta técnica permite uma redução de cerca de 50% das taxas de emissão de NOx, mas pode criar instabilidade de chama.

d) **Combustão em multiestágios.** A combustão é realizada escalonando a entrada de combustível e escalonando a entrada de ar. Por esse método, as taxas de NOx podem diminuir cerca de 60% em relação à combustão normal.

e) **Combustão catalítica.** Sistemas catalíticos em desenvolvimento atualmente são capazes de reduzir a temperatura da chama de 1800°C para 1300°C, levando a emissão de NOx de 200 ppm para menos de 1 ppm.

9. CONCLUSÕES

O gás natural, pode ser utilizado, sem grandes dificuldades, na substituição do óleo combustível em equipamentos térmicos. Na conversão ao gás natural, estes equipamentos podem apresentar um ganho de rendimento. O gás natural é de fácil manipulação e sua combustão produz menor emissão de poluentes. A atual disponibilidade nos grandes centros, próximo aos consumidores, torna-o substituto ideal para o óleo combustível, sobretudo devido às restrições ambientais.

A implantação da ISO-14000 vai tornar necessário a implementação de normas rigorosas de redução de emissão de NOx, incentivando o uso do gás natural, com uma conseqüente elevação de preços. É necessário normas de emissão, diferenciadas para cada combustível, de modo a minimizar a vantagem do GN, e criar um maior espectro de opções energéticas.

As vantagens da geração termoelétrica a ciclo combinado são grandes: ambientalmente aceitável, mais baratas, de implantação a curto prazo. Existe uma forte e fundamentada expectativa de crescimento acelerado da geração térmica e da co-geração no futuro próximo, utilizando tecnologias ainda não aplicadas em escala significativa no País, sendo assim, necessário sistematizar e acelerar a capacitação de recursos humanos.

Deve ser lembrado que, o gás natural como todo combustível fóssil, encontra-se em extinção. As reservas Brasileiras ($141,8 \cdot 10^6$ tep) são suficientes para 28,4 anos do atual nível de consumo ($5,0 \cdot 10^6$ tep). Com o aumento do consumo, as reservas se esgotarão em menor tempo, e em breve (10-15 anos) a demanda deverá suplantar a oferta. Os usuários devem estar cientes da potencial crise de demanda e aumento de preços, e encontrar meios de administrar esse risco.

10. BIBLIOGRAFIA

[1] DAVIES R.M. OEPPEN B. Combustion and Heat Transfer in Natural Gas Fired Boilers. *J. Inst. Fuel*, v.45, n.377, p.383-390, 1972.

[2] DUARTE J.A.; LIMA L.C.; SILVA R.P.M. Validação de um Modelo de Previsão de Consumo de

- Energia Para o Brasil. In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 95), 12-15 Dezembro 1995, Belo Horizonte, MG, *Actas-Anais-Proceedings...* Rio de Janeiro: ABCM, 1995.
- [3] ECKERLIN H.M. Results from the Nationwide Oil-Versus-Gas Boiler Test Program. *Energy Engineering*, v.91, n.4, p.33-54, 1994.
- [4] FERREIRA J.C. A origem do petróleo: Orgânica ou inorgânica? *Spectrun - J. Bras. Cien.*, n.1, v.2, p.34-41, Julho/agosto 1981.
- [5] KUZNETSOV N.V, MITOR V.V, et al. *Teplovoy Raschet Kateknykh Agregatov. Normativni Metod.* Moscou, Energia, 1973, 295p.
- [6] LOCANETTO P. La Combustion du Gaz Naturel et l'Environnement. *Revue Générale Thermique*, v.27, n.314, p.119-123.
- [7] MME. *Balanco Energético Nacional*, Brasília, Ministério de Minas e Energia, 1995, 141p.
- [8] OLADE. *Energia en Chifras*. Quito, Organización Latinoamericana de Energia, n.7, Julho 1995.
- [9] PINHEIRO, Paulo César da Costa. Utilização de Combustíveis Alternativos em Caldeiras. In: IV Encontro Nacional de Ciências Térmicas (ENCIT-92), 01-04 Dezembro 1992, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: ABCM, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1992, p.69-71.
- [10] PINHEIRO Paulo César da Costa; VALLE Ramon Molina. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar. In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 09-11 Agosto 1995, Rio de Janeiro, RJ, *Anais... Automação Industrial* São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, 1995, p.157-162.
- [11] QUEIROZ Mozart Schimitt et al. Produção de Proteína a Partir de Gás Natural. *Boletim Técnico da Petrobrás*, v.31, n.4, Parte 1 p.291-302, Parte 2 p.283-290, Out/Dez 1988.
- [12] SWANEKAMP R. Natural Gas. Poised to Penetrate Deeper Into Electric Generation. *Power*, v.139, n.1, p.13-16,19, Janeiro 1995.
- [13] TOTTEN J.M. Converting To Gas Firing? *Power*, v.103, n.11, p.78-79, Nov. 1959.