

---

# **P04, Estudo para avaliação da otimização na transmissão de calor radiante em processos de combustão de gás natural para uso industrial. Ciclo 2004/2005.**

Renato Verghnanini Filho

COMGÁS - Companhia de Gás de São Paulo  
IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica – Laboratório de Engenharia Térmica

**Resumo** – Neste projeto foi desenvolvida uma metodologia de cálculo, solidamente baseada em ciências de engenharia, para a análise de problemas de conversão de equipamentos industriais (fornos e caldeiras) que utilizem originalmente outros energéticos (especialmente óleo combustível e eletricidade) para o uso de gás natural e treinada a equipe técnica da Comgás na aplicação dessa metodologia a casos reais. A metodologia compreendeu uma parte teórica, apresentada em quatro exposições a essa equipe e uma parte prática composta de quatro experimentos (em escala real) realizados no laboratório de combustão do IPT, acompanhados por essa equipe que posteriormente tratou os dados obtidos e os discutiu com pesquisadores do IPT. Ao final do projeto, a equipe técnica da Comgás adquiriu conhecimento suficiente para abordar com razoável profundidade problemas de conversão de equipamentos industriais para gás natural.

Palavras-chave: combustão de gás natural; conversão de equipamentos para gás natural; intercambialidade de combustíveis; transferência de calor em processos de combustão

## **Introdução - Objetivo do projeto**

A conversão de equipamentos existentes que utilizam outras fontes energéticas para gás natural requer a realização prévia de uma análise detalhada do problema, envolvendo um conjunto numeroso de aspectos, dentre os quais o impacto dessa substituição nos mecanismos de troca de calor no interior do equipamento e, por decorrência, na eficiência energética do processo. Inicialmente, é necessário relembrar que em equipamentos que operam a alta temperatura o mecanismo preponderante de troca de calor com cargas ou superfícies é a radiação térmica, cuja contribuição para a potência total transferida pode chegar a 90% ou mais, dependendo da região do equipamento considerada.

Por exemplo, no caso do energético original ser óleo combustível, a(s) chama(s), bem como a atmosfera gasosa do equipamento, contêm concentrações apreciáveis de fuligem que, como é amplamente conhecido, incrementa fortemente o mecanismo de radiação. No caso de gás natural, a(s) chama(s), bem como a atmosfera gasosa contêm concentrações de fuligem muito pequenas, reduzindo a eficiência desse mecanismo de transferência. Adicionalmente, os gases produzidos pela combustão de gás natural possuem teores de vapor de água muito mais elevados do que aqueles resultantes da combustão de óleos combustíveis e, devido ao alto calor específico do vapor, a entalpia específica dos primeiros, a determinada temperatura, é mais elevada que a dos

segundos. Os dois fatos mencionados podem contribuir para reduções consideráveis da eficiência energética de equipamentos como fornos e caldeiras após o processo de conversão, a menos que medidas sejam tomadas para atenuar essa redução.

Do exposto acima decorre que uma conversão baseada apenas em equivalência energética das vazões de combustível, originalmente e posteriormente aportadas ao equipamento, pode se defrontar com sérios problemas: impossibilidade de se atingir a produtividade original do equipamento e/ou a impossibilidade de se obter a mesma eficiência energética original.

A experiência decorrente dos contatos com técnicos e engenheiros do setor de distribuição e usuários de gás natural mostra que os conhecimentos técnicos relativos a estes aspectos são precários e que os estudos de conversão são realizados de forma bastante superficial com relação ao aspecto eficiência energética.

Dentro desse contexto, o objetivo do projeto foi desenvolver uma metodologia de cálculo, solidamente baseada em ciências de engenharia, para a análise de problemas de conversão de equipamentos industriais (fornos e caldeiras) que utilizem originalmente outros energéticos (especialmente óleo combustível e eletricidade) para o uso de gás natural e treinar equipes técnicas da COMGAS na aplicação dessa metodologia a casos reais.

## Desenvolvimento

Foi elaborado um procedimento de cálculo, com forte ênfase nos aspectos de radiação térmica, consubstanciado em aplicativo computacional de domínio bastante amplo (planilha Excel) e realizada sua apresentação a um conjunto de engenheiros da Comgás. Nesse curso, foi feita uma análise detalhada dos impactos da conversão de energéticos nas trocas de calor, na capacidade de produção de equipamentos e na sua eficiência energética.

O procedimento de cálculo desenvolvido foi aplicado a três casos de equipamentos reais, sendo os resultados apresentados e discutidos com a equipe técnica da Comgás que recebeu o treinamento.

A primeira aplicação do procedimento envolveu as trocas de calor entre chamas, gases, refratários e carga no interior de um forno de soleira rotativa para aquecimento de blocos de aço para posterior processo de forja. Como caso exemplo foi tomado um forno da Mafersa S.A. que já havia sido estudado anteriormente de forma mais simples pelas equipes do IPT e da Comgás. O forno foi dividido em oito zonas e o procedimento aplicado se baseou essencialmente no modelo de forno longo proposto por Hottel (1967).

A segunda aplicação do procedimento envolveu o estudo da conversão de um queimador operando inicialmente com óleo combustível mais um resíduo aromático para gás natural. Trata-se de um caso real resolvido pela equipe técnica do IPT em passado recente. O exemplo se mostrou muito interessante, pois o referido forno possui uma zona de radiação (câmara de combustão enclausurada pelas serpentinas no interior das quais escoam o óleo térmico), uma zona de convecção, também enclausurada por partes dessas serpentinas e um sistema de recuperação de calor (pré-aquecimento de ar mediante trocas de calor com os gases de combustão antes da entrada destes na chaminé). Dessa forma, foi possível avaliar como a redução da eficiência da zona de radiação após a conversão para gás natural é parcialmente atenuada pelas zonas de convecção e recuperação. Neste caso, a câmara de combustão (cilíndrica, vertical) foi tratada como uma única zona para o cálculo das trocas de calor por radiação.

A terceira aplicação do procedimento envolveu um forno de aquecimento de barras da empresa Montepino S.A. para posterior laminação, cujo estudo de conversão para gás natural a Comgás estava iniciando. Foram realizadas medições no campo, para a coleta de

dados que permitissem elaborar o estudo da conversão. O forno foi dividido em cinco zonas de gás e vinte e duas zonas de superfície (cinco das quais são correspondentes à carga em aquecimento). Foi incorporado ao procedimento desenvolvido: um modelo para o progresso da reação de combustão ao longo dos volumes de gás; um modelo para a distribuição da concentração de fuligem ao longo dos volumes de gás (no caso das chamas originais, a óleo) e um modelo para representação da mistura gasosa mais fuligem por dois gases cinzentos. Foi elaborado um programa de computador em linguagem C++, o qual foi aplicado sucessivamente à condição atual (operação a óleo, com alto excesso de ar), operação a óleo com baixo excesso de ar, operação a gás natural com alto excesso de ar, operação a gás natural com baixo excesso de ar e, finalmente, a gás natural com ar pré-aquecido.

O procedimento de cálculo desenvolvido foi, também, aplicado a quatro experimentos realizados no laboratório de combustão do IPT.

O primeiro experimento consistiu em operar a fornalha horizontal do laboratório (figura 1) com uma chama de óleo 1B com potência de 930 kW.



Figura 1 – Fornalha horizontal do laboratório

Para essa finalidade, a fornalha, cuja carcaça é dividida em módulos resfriados a água, teve sua superfície interna parcialmente revestida de manta de fibra cerâmica, ficando o restante da superfície como uma carga para a qual seria transferido calor pela chama. A fornalha foi equipada com um queimador de óleo, tipicamente utilizado em caldeiras (Figura 2). O experimento teve duração de oito horas, tendo sido adquiridas continua e automaticamente todas as variáveis de fronteira que permitiram, posteriormente, elaborar um procedimento de cálculo dos balanços de massa, espécies químicas e energia. Com tal procedimento foi possível, entre outras coisas, calcular a eficiência

do processo (fração da potência total liberada que foi transferida para a carga).

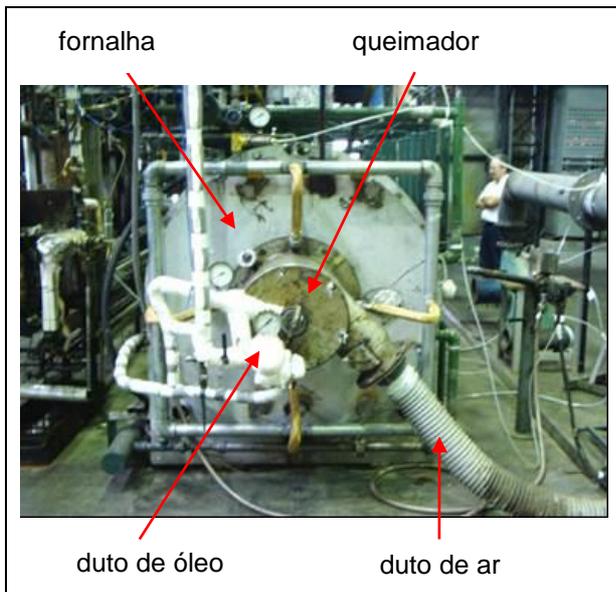


Figura 2 – Frontal da fornalha

O segundo experimento consistiu em operar a fornalha horizontal do laboratório com uma chama de gás natural, com potência de 930 kW (a mesma da chama de óleo do experimento 1). Para tal, o queimador já se achava equipado com quatro lanças de gás conectadas a um anel de distribuição (Figura 3). O experimento teve a duração de cerca de oito horas e o objetivo da sua realização foi permitir à equipe técnica da Comgás o acompanhamento e o posterior cálculo da redução de eficiência num processo de conversão de óleo para gás.

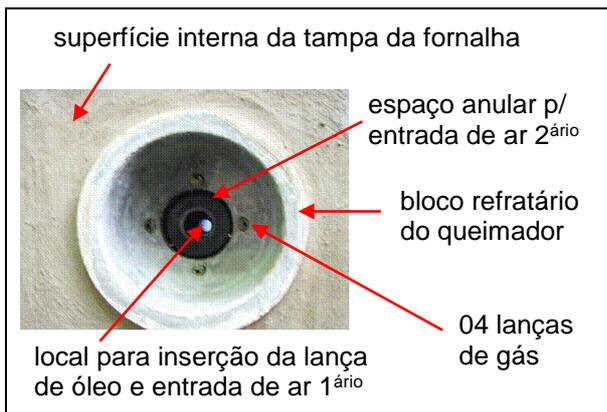


Figura 3 – Vista interna do queimador

O terceiro experimento teve a duração de cerca de oito horas e o objetivo da sua realização foi permitir à equipe técnica da Comgás a verificação de possíveis ganhos de eficiência na conversão de óleo para gás natural. O queimador instalado, na fornalha do laboratório foi operado a potência total de

930 kW e a partição foi de aproximadamente 50 % em óleo combustível e 50 % em gás natural.

O quarto experimento teve, também a duração de cerca de oito horas e sua realização permitiu a verificação de consideráveis ganhos de eficiência, em relação a uma simples conversão de óleo para gás, com a introdução de ar pré-aquecido mediante troca de calor com os gases efluentes do sistema. Para realizar este experimento, o queimador foi conectado ao sistema de recuperação de calor já existente na fornalha mediante uma tubulação isolada termicamente, especialmente construída para tal fim.

### Resultados obtidos e conclusões

As principais metas do projeto foram atingidas:

\_ Foi elaborada uma metodologia de cálculo para análise de problemas de conversão para gás natural de equipamentos industriais que utilizam outros energéticos.

\_ A metodologia desenvolvida foi aplicada com sucesso a equipamentos em escala real e semi-industrial, instalado no laboratório de combustão do IPT.

- A equipe técnica da Comgás foi treinada para uso da metodologia desenvolvida.

### Referências

Stambuleanu, A. Flame combustion processes in Industry. Abacus Press, 1976.

Thring, M.W. and Newby, M.P. Combustion length of enclosed turbulent jet flames, 4th International Symposium on Combustion, 1958, pp. 789-796.

Gupta, A.K. et al. Swirl flows" Abacus Press, 1984.

Monnot, G. et al. La combustion dans les fours et les chaudières. Éditions Technip, 1978.

Hottel, H.C. and Sarofim, A.F. Radiative heat transfer. McGraw-Hill, 1967.

Johnson, T.R. and Beér, J.M. Radiative heat transfer in furnaces: further development on the zone method of analysis. 14th International Symposium on Combustion, 1972, pp. 639-649.

Felske, J.D. et al. Gray gas weighting coefficients for arbitrary gas-soot mixtures. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 25, nº 12, pp. 1844-1855, 1982.

Hottel, H.C. and Cohen, E.S. Radiant heat exchange in a gas filled enclosure: allowance for nonuniformity of gas temperature", AIChE Journal, March 1958, vol. 4, nº 1, pp. 3-14.

Siegel, R. and Howell, J.R. Thermal radiation heat transfer" Taylor & Francis Publishers, 1992.