

UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM CALDEIRAS¹

Paulo César da Costa Pinheiro
Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG
E-mail: pinheiro@demec.ufmg.br

Abstract

The way to compare boilers working with different fuels (which are normally not comparable) has been a long looked for solution for an important problem. The operational data are not useful, since the number of variables involved in the combustion and heat transfer processes makes difficult the overall evaluation of these results, disguising the individual influence of each term inside the global context. This work shows how simulation can go round this difficulty, producing both original and reliable results.

INTRODUÇÃO

Existem hoje centenas de caldeiras funcionando com óleo combustível, o qual atingiu um nível de preços tal, que é vantajosa a busca de uma outra solução. Uma vez que o preço do petróleo não vai cair, e que a conservação de energia tem seus limites, a eterna busca da viabilidade econômica dos processos tem 3 soluções:

- 1 - Modificação da tecnologia dos processos, eliminando a necessidade de vapor e/ou de caldeiras.
- 2 - Substituição das caldeiras por outras projetadas para a queima de combustíveis mais econômicos.
- 3 - Adaptação das caldeiras existentes nos processos, para o uso de outros combustíveis.

Das três soluções apresentadas, a que se apresenta mais atraente, economicamente, é a terceira. Há muito tempo existe a necessidade de comparar o comportamento de caldeiras funcionando com combustíveis diferentes; combustíveis estes que são normalmente incomparáveis. Entretanto, não existe um método direto para o cálculo das influências dos diversos combustíveis alternativos no desempenho das caldeiras. Encontramos na literatura técnica, somente resultados operacionais de algumas tentativas realizadas empiricamente (Brecheret F^o, 1978; Energia, 1980; Fontenelle, 1947; Lopes, 1980; Power, 1943).

Por causa do grande número de variáveis envolvidas nos processos de transmissão de calor e de combustão nas fornalhas, torna-se difícil a comparação dos resultados obtidos, e fica oculta a influência de cada uma das variáveis no contexto global.

MATERIAIS E MÉTODOS

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

¹PINHEIRO, 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.

foram analisados, e dentre eles o método da aproximação por similaridade dimensional, mais conhecido como Método CKTI (Kuznetsov, 1973), foi o que apresentou a maior flexibilidade quanto à utilização dos diversos combustíveis alternativos.

Este método foi proposto por A. M. Gurvich (1940), do Instituto Central de Construção de Caldeiras e Turbinas (CKTI, Moscou), e tem sido utilizado com bastante sucesso nos países do leste. Baseia-se na aplicação dos princípios da similaridade térmica a dados experimentais, obtidos na análise do desempenho das fornalhas das caldeiras. Através da análise dimensional, estabeleceu-se a equação (adimensional) que relaciona os critérios de similaridade e a troca de calor na fornalha:

$$\frac{T_f}{T_o} = \frac{Bo^{0,6}}{M \epsilon_f^{0,6} + Bo^{0,6}}$$

onde, T_f é a temperatura de saída dos gases da fornalha (K), T_o a temperatura adiabática da chama (K), Bo o número de Boltzman, ϵ_f a emissividade da fornalha, e M um coeficiente adimensional ($\approx 0,5$).

O critério básico de transmissão de calor na fornalha é o número de Boltzmann Bo :

$$Bo = \frac{B \overline{Cp}_g V_g}{5,67 \cdot 10^{-11} X_p \xi S_p T_o^3}$$

onde, B é o consumo de combustível (kg/s), Cp_g e V_g são o calor específico médio (kJ/m³) e o volume dos produtos da combustão (m³/kg comb), X_p o coeficiente de proteção das fornalhas (adm), ξ o coeficiente de deposição de fuligem (adm) e S_p a área total das paredes da fornalha (m²).

Apesar de ter sido exaustivamente testado ao longo do tempo que tem sido utilizado, período no qual lhe foram acrescentados diversos aperfeiçoamentos, o método CKTI possui raríssimas publicações no ocidente, onde é praticamente desconhecido. Sua principal desvantagem reside no fato de utilizar 15 coeficientes empíricos, dos quais 12 são função do combustível utilizado. Contudo, podemos obter excelentes resultados, sobretudo no cálculo das fornalhas das grandes centrais térmicas (até 1000 MW).

A fim de minimizar o trabalho de análise e facilitar a utilização do modelo matemático para o cálculo da transmissão de calor nas fornalhas, foi desenvolvido um programa na linguagem Fortran IV, para o computador Burroughs B-6900. Uma versão para os microcomputadores compatíveis com o IBM PC é também disponível. O programa montado modularmente, constou de um programa principal e de 6 sub-rotinas, num total de 660 linhas.

Concluída a instalação do modelo matemático, foram realizados uma série de testes, a fim de verificar o seu correto funcionamento:

1 - Verificação do funcionamento do método pelo cálculo de verificação de caldeiras conhecidas. Como eram disponíveis os dados operacionais de algumas caldeiras (entre 10 e 240 ton/hr), funcionando com combustíveis diferentes (óleo diesel, óleo combustível, carvão e licor-preto), foram recalculadas através do método CKTI. O cálculo apresentou um erro inferior a 7% em relação aos dados experimentais.

2 - Verificação do funcionamento do método de cálculo, por comparação com outros métodos. Foram dimensionadas várias caldeiras, pelos diferentes métodos (Gulic, 1981; Nuber, 1968; Pera, 1966;

Taliev, 1957), e os resultados comparados com aqueles obtidos pelo método CKTI. O método CKTI apresentou um desvio inferior a 13%, em relação aos demais métodos citados acima.

3 - Análise das seguintes variáveis sobre a transmissão de calor na fornalha:

- Tamanho e forma da fornalha;
- Temperatura de preaquecimento;
- Coeficiente de excesso de ar;
- Taxa de oxigenação do ar de combustão;
- Temperatura de vaporização;
- Taxa de liberação de calor.

4 - Análise da influência de diversos combustíveis alternativos na transmissão de calor na caldeira. Esta análise foi efetuada tomando por modelo uma caldeira padrão, de dimensões variáveis, conforme as especificações abaixo:

Tabela 1. Características da Caldeira

Fornalha:	
Tipo	- Aquatubular
Forma	- Paralelepípedo
Dimensões	- L x L x 3L
Volume	- entre 50 e 1000 m ³ (3L ³)
Área total (S _p)	- (14L ²)
Superfície Absorvedora	- 0,95 (14L ²)
Emissividade da parede	- 0,82 (aço)
Queimador de fluido auxiliar:	
Posição	- altura "L" da soleira
Comburente: ar atmosférico	
Temperatura ambiente	- 298 K
Temperatura preaquecimento	- 400 K
Umidade	- 13 g/kg ar seco
Excesso de ar (α_f)	- conforme tabela (1)
Fluido térmico - Vapor de água	
Temperatura de vaporização	- 498 K
Pressão de vaporização	- 25,5 kg/cm ²

As características dos combustíveis analisados estão apresentadas na tabela 2, onde α_f é o coeficiente de excesso de ar na saída da fornalha e q_v a taxa de liberação de energia (kW/m³) recomendada.

Tabela 2. Características dos Combustíveis Analisados.

COMBUSTÍVEL	PCI	α_f	q_v	Análise Gravimétrica						
				C	H	N	O	S	W	Ash
	kJ/kg		kW/m ³							
Óleo combustível	38220	1,13	290	0,830	0,104	0,003	0,004	0,028	0,030	0,001
Óleo diesel	42700	1,13	290	0,860	0,132	0,001	0,001	0,006		
Álcool etílico	24780	1,13	290	0,486	0,122		0,324		0,068	
Metanol	18820	1,13	290	0,346	0,144		0,461		0,050	
Carvão SC	18300	1,25	175	0,431	0,029	0,009	0,060	0,024	0,060	0,387
Pó de serra	16940	1,20	175	0,426	0,055	0,032	0,340		0,134	0,013

COMBUSTÍVEL	PCI kJ/m ³	α_f	q_v kW/m ³	Análise Volumétrica						
				CO	CO ₂	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
Gás natural	37000	1,05	350				0,019	0,870	0,076	0,035
Gás de coqueria	17288	1,05	350	0,062	0,021	0,533	0,113	0,250	0,014	0,007
Gás pobre	5086	1,05	230	0,285	0,059	0,128	0,525	0,003		
Gás alto-forno	3977	1,05	230	0,290	0,075	0,025	0,610			

RESULTADOS

A figura 1 mostra a quantidade de energia absorvida na fornalha, com a utilização do óleo combustível BPF e com os diversos combustíveis alternativos. Pode-se notar que o óleo diesel permite uma maior absorção de energia na fornalha do que o óleo combustível. Estes dois combustíveis possuem temperatura e emissividade da chama semelhantes, mas a combustão do óleo diesel é mais limpa, produzindo uma menor quantidade de fuligem. A fuligem se deposita sobre os tubos da fornalha, diminuindo a transmissão de calor para os tubos.

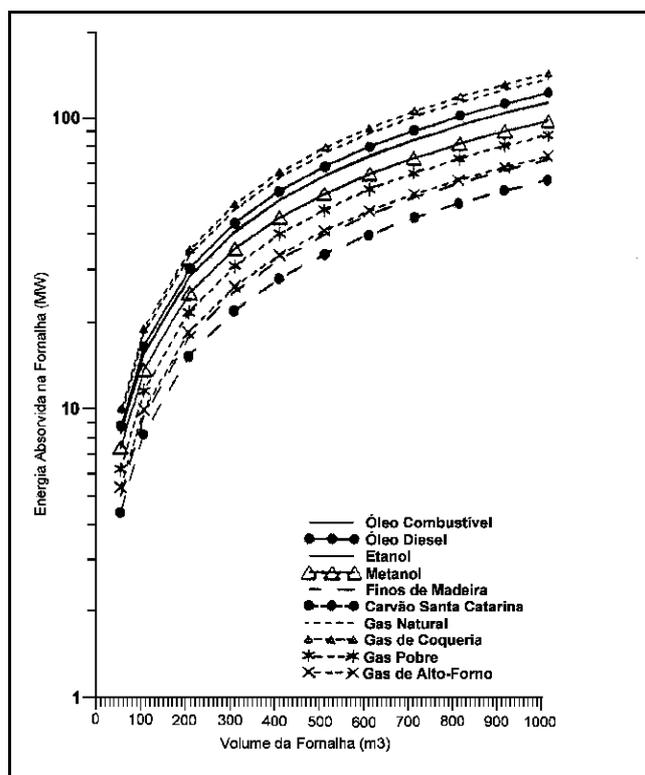


Figura 1. Quantidade de energia absorvida na fornalha (MW).

O etanol (álcool combustível) e o metanol, possuem temperatura de chama menores, e uma baixa emissividade da chama. Entretanto, a combustão destes álcoois é praticamente isenta da deposição de fuligem, o que compensa estes fatores. Na figura 1, a curva do etanol se sobrepõe à do óleo combustível.

Assim, nas condições admitidas na análise, sendo permitida uma queda de até 10% na produção térmica, o óleo BPF poderá ser substituído pelo álcool etílico e metanol. É apresentado na literatura (Energia, 1980, Brecheret F°, 1978), algumas experiências da utilização destes combustíveis em caldeiras. As únicas modificações necessárias seriam a adaptação dos queimadores e das linhas de bombeamento do combustível (Duhl, 1976).

Se os álcoois não são economicamente competitivos com o óleo BPF, o são com o óleo diesel e o querosene, muito utilizados em caldeiras de pequeno e médio porte, e nas grandes caldeiras como combustível de partida. A substituição do diesel pelos álcoois é bastante simples.

A combustão dos gases é praticamente isenta da formação de fuligem. Além disso, a grande velocidade de combustão dos gases 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, do gás de coqueria, ou mesmo do gás de rua COMGAS (não representado na figura), pode-se obter, até mesmo uma maior produção térmica do que com o óleo combustível. A utilização de gás natural em caldeiras para óleo é apresentada por Davies e Oeppen (1972).

O gás pobre (gasogênio) e o gás de alto-forno, possuem um baixo poder calorífico, e um combustão mais difícil, não permitindo uma alta taxa de liberação de energia. A utilização destes gases vai levar a uma queda na absorção de energia na fornalha da ordem de 25 a 35%. Na análise realizada, estes gases foram considerados isentos de cinzas volantes. A presença de cinzas volantes vai diminuir a transmissão de calor na fornalha devido à sua deposição sobre os tubos e ao aumento da absorvidade do meio semi-transparente que preenche a fornalha.

A queima de combustíveis gasosos, que possuem baixa temperatura de chama, simultaneamente com o óleo combustível, não é recomendada, pois diminui a temperatura de combustão, provocando o craqueamento e o aparecimento de fuligem. Neste caso é necessário uma fornalha com câmaras de combustão independentes.

A utilização de combustíveis sólidos provoca a maior queda na produção térmica da fornalha (de 40 a 50 %). Isto é devido a necessidade da permanência da partícula sólida um longo tempo dentro da fornalha, para que possa completar a sua combustão. Isto leva a utilização de baixas taxas de liberação de energia.

Deve ser lembrado, que os combustíveis sólidos possuem grandes quantidades de cinzas, que são arrastadas pelo fluxo de gases e depositadas sobre as superfícies da fornalha e dos elementos convectivos, diminuindo o calor absorvido nestes equipamentos. Torna-se assim, necessário a sopragem sistemática destas superfícies. Além disso, as cinzas volantes e as partículas incandescentes atenuam a radiação oriunda da chama. Esta queda de potência é apresentada na literatura (Moris, 1979).

Caso a perda de potência seja admissível, a adaptação de uma caldeira para a utilização de combustíveis sólidos é complicada, e nem sempre economicamente viável, principalmente caso seja necessário a combustão em grelha. Muitas vezes torna-se mais econômico a instalação de uma antecâmara de combustão, ou a substituição da caldeira por uma projetada para o combustível desejado. Fontenelle (1947), Power (1976), Morris (1979) e Lopes (1980), mostram modificações necessárias para que uma caldeira projetada para o uso com combustível líquido, possa funcionar com combustível sólido.

A figura 2 apresenta a eficiência térmica da fornalha, com a utilização do óleo combustível e dos diversos combustíveis alternativos. Pode-se notar que, para os combustíveis, mantendo-se constante a taxa de liberação de energia (kW/m^3), existe um diminuição do rendimento térmico com o aumento do volume da fornalha. Isto ocorre porque, mantendo-se constante a forma da fornalha, a relação área/volume (no caso $14\text{L}^3/\text{L}^2$) diminui com o aumento das dimensões. Assim, para manter o rendimento térmico, ao aumentar o volume da fornalha deve-se adaptar a sua forma a manter a relação área/volume.

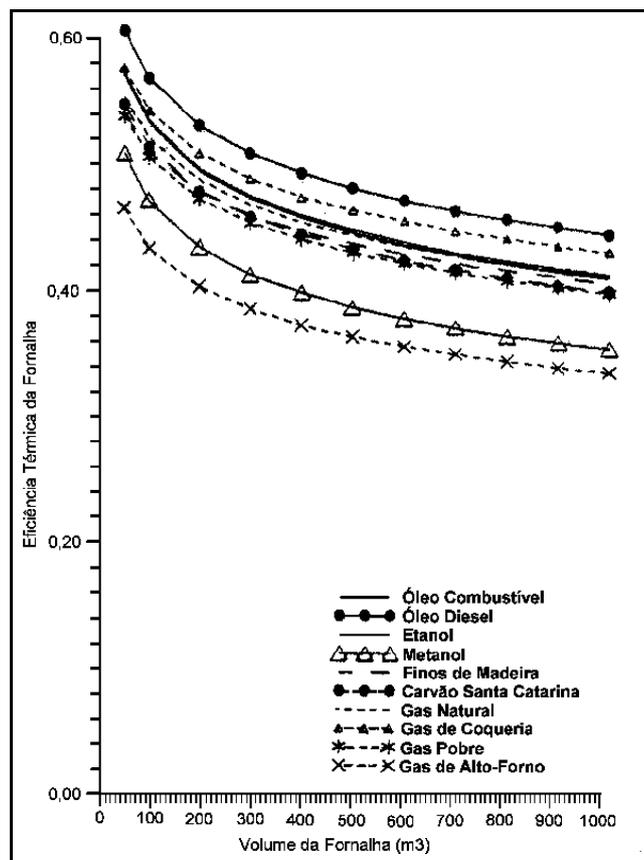


Figura 2. Eficiência térmica da fornalha.

O maior rendimento térmico do óleo diesel em relação ao óleo combustível, é devido à menor

deposição de fuligem sobre as superfícies da fornalha. Para os gases, com a mesma taxa de liberação de energia, os maiores rendimentos estão relacionados com a temperatura e emissividade da chama.

CONCLUSÕES

O Método CKTI mostrou-se satisfatório para o cálculo da transferência de calor nas fornalhas das caldeiras usuais, podendo ser utilizado para a simulação da utilização dos diversos combustíveis alternativos em caldeiras.

O etanol e o metanol mostraram ser uma solução tecnicamente correta para a substituição do óleo combustível BPF; e ser uma solução técnico-econômica para a substituição do óleo diesel e querosene nas caldeiras. O gás natural, o gás de coqueria e o gás de rua podem ser utilizados sem problemas para a substituição do óleo combustível. Os novos gasodutos projetados, vão levar o gás natural aos grandes centros, e isto pode torná-lo o substituto ideal para o óleo combustível. Caso seja admissível uma perda de potência de 40-50%, podem ser utilizados os gases pobre e de alto-forno e os combustíveis sólidos.

REFERÊNCIAS

.BRECHERET FILHO, V. "Em Projeto a Troca do Óleo Combustível pelo Metanol" (entrevista) IN: Dirigente Industrial, v.19, n.11, pp.44-45, Dezembro 1978.

.DAVIES R.M. OEPPEN B. Combustion and Heat Transfer in Natural Gaz Fired Boilers. J. Inst. Fuel, v.45, p.383-390, 1972.

.DUHL R. W. "Methanol as Boiler Fuel". Chem. Eng. Proc., pp.75-76, Julho 1976.

.ENERGIA. "Light Estuda o Uso do Etanol na Geração de Eletricidade". Energia, v.2, n.2, Maio-Junho 1980.

.FONTENELLE P. "Carvão Nacional. Adaptação Recíproca para Utilização em Caldeiras". Rev. Eng. RGS, v.3, n.10, pp.46-64, Setembro 1947.

.GULIC M.G. e GVOZDENAC D.D. "A Mathematical Model for Heat Transfert in Combustion Chambers of Steam Generators". J. Eng. Power, v.103, n.7, pp.545-51, Julho 1981.

.GURVICH A.M. Dolk-Akad. Nauk., v.27, n.7, 1940.

.KUZNETSOV N.V. et alii. Teplovoy Raschet Katelnykh Agregatov. Normativni Metod. Moscou, Energia, 1973, 295p.

.LOPES B.A.D. "Queima de Carvão Vegetal nos Geradores de Vapor da Copene". Energia, v.2, n.8, pp.56-63, Maio-Junho 1980.

.MORRIS K.W., BARYNIN J.A. "Converting to Coal Firing". Pulp & Paper Canada, v.80, n.7, pp.T216-20, Julho 1979.

.NUBER F. Cálculo Térmico de Caldeiras e Fornalhas. Porto Alegre, Globo, 1968, v.7, parte 2, Cap.4, pp.583-824.

.PERA H. Geradores de Vapor d'Água (Caldeiras). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1966, 288p.

.POWER. "Oil-to-Coal Conversions Still Necessary". POWER, v.87, n.5, pp.94-5, 180, 182, 184, 186, Maio 1943.

.POWER. "Should You Convert to Coal?" Power, v.120, n.7, pp.38-40, Julho 1976.

.TALIEV V.N. Vodosnabzhenie i Sanit. Tekh., n.2, pp.17-21, 1957.

Sumário

A necessidade de se encontrar uma solução para comparar caldeiras funcionando com diferentes combustíveis (que são normalmente incomparáveis) é há muito tempo almejada. Uma metodologia para a avaliação da influência dos diversos combustíveis alternativos no desempenho das caldeiras não é apresentada na literatura. A literatura apresenta somente alguns resultados de ensaios práticos. Os resultados operacionais encontrados não são úteis, pois o grande número de variáveis envolvidas no processo de combustão e de transmissão de calor, torna difícil a comparação destes resultados, ocultando a influência de cada uma das variáveis no contexto global. Este trabalho mostra como a simulação pode contornar este problema, produzindo resultados confiáveis e originais.