

METODOLOGIA DE CÁLCULO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE CALDEIRAS OPERANDO COM CARVÃO MINERAL

Renato VERGNHANINI FILHO¹

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

RESUMO

Este texto apresenta a metodologia desenvolvida pelo IPT para cálculo do rendimento térmico de caldeiras aplicada à queima de carvão mineral. O desenvolvimento foi baseado em normas dos Estados Unidos e Alemanha, e leva ao cálculo do rendimento pelos métodos direto e indireto. A equipe do IPT vem obtendo resultados bastante consistentes no emprego do método para caldeiras operando com diferentes combustíveis. Uma das aplicações, em particular, para caldeiras a carvão instaladas numa empresa do setor petroquímico, levou à configuração de um programa que, fornecendo aos operadores valores instantâneos de rendimento, permitiu que os equipamentos fossem operados sempre de maneira a minimizar o consumo de combustível.

Palavras-chave: Rendimento térmico. Caldeira a carvão mineral

ABSTRACT

This paper presents the methodology developed by IPT to calculate the thermal efficiency boilers applied to the burning coal. The development was based on US and German standards, and leads to the calculation of efficiency by direct and indirect methods. The IPT team has been obtaining very consistent results in the use of the method for boilers operating with different fuels. One of the applications, particularly for coal-fired boilers installed in a petrochemical company, led to the configuration of a program that, by providing operators with instantaneous values of efficiency, allowed the equipment to be operated at all times to minimize fuel consumption.

Key-Words: Thermal efficiency. Coal boiler

1 INTRODUÇÃO

Na análise energética de instalações industriais, os geradores de vapor são equipamentos cuja verificação é obrigatória, uma vez que a sua operação deficiente ou incorreta implica diretamente em gastos adicionais de combustível. Uma das formas mais usadas para avaliar a operação desses equipamentos é o cálculo de sua “eficiência”.

De maneira simplista, define-se rendimento térmico, ou eficiência térmica, de uma caldeira como sendo a fração da potência liberada na câmara de combustão que é transferida ao fluido de trabalho (água - vapor).

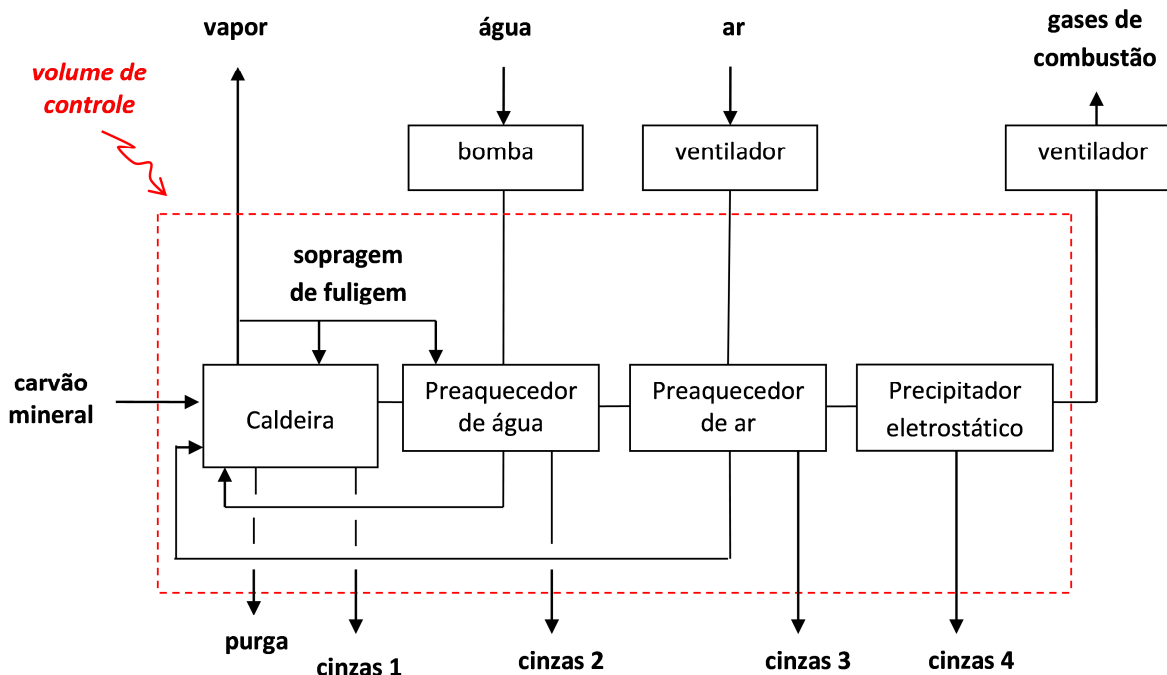
Não há metodologia normalizada no Brasil para o cálculo do rendimento de caldeiras. Costuma-

se utilizar normas de outros países, geralmente dos Estados Unidos (ASME, 1998) ou da Alemanha (DIN, 1994), que serão designadas neste trabalho simplesmente por “norma ASME” e “norma DIN”, respectivamente.

A metodologia de cálculo desenvolvida pelo IPT é baseada nessas normas e, neste trabalho, foi aplicada a uma caldeira a carvão mineral típica, dotada de preaquecedores de ar (regenerativo, do tipo Ljungstrom) e água (“economizador”), e com retirada de cinzas pelo fundo, pelos preaquecedores e por um precipitador eletrostático instalado na linha de gases de combustão.

Na Figura 1, apresenta-se esquema simplificado dos principais fluxos de água, vapor, ar, combustível e gases de combustão da caldeira.

Figura 1 - Fluxograma simplificado da caldeira



No fluxograma apresentado:

- a linha pontilhada representa as fronteiras do objeto de estudo; o objeto de estudo considerado é comumente denominado de volume de controle (VC) na literatura técnica; a fronteira de um volume de controle é cruzada pelas assim denominadas correntes materiais, através das quais entra ou sai matéria para o VC.

- a bomba de água, os ventiladores de ar e de combustão, bem como todos os equipamentos utilizados na preparação e alimentação do carvão mineral, estão fora do volume de controle, ou seja, não serão consideradas no cálculo de rendimento as parcelas de energia elétrica referentes ao acionamento desses equipamentos.

2 CÁLCULO DO RENDIMENTO DA CALDEIRA

O balanço energético para a caldeira operando em regime permanente (regime de operação em que não há alteração das variáveis de processo ao longo do tempo) pode ser escrito de forma simplificada como:

$$E_f = E_u + P \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde:

E_f (kJ/h): potência fornecida à caldeira

E_u (kJ/h): potência útil absorvida pela água

P (kJ/h): potência não aproveitada

O rendimento pode ser determinado através do denominado “método direto”, ou “método da entrada e saída”, pela expressão:

$$\eta_{MD} = E_u / E_f \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde:

η_{MD} (adim.): rendimento térmico pelo método direto

Alternativamente, o rendimento pode ser determinado pelo denominado “método indireto”, ou “método das perdas”, através da [Eq. 03] ou da [Eq. 04], obtidas da substituição da [Eq. 01] na [Eq. 02].

$$\eta_{MI} = 1 - (P / E_f) \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$\eta_{MI} = E_u / (E_u + P) \quad [\text{Eq. 04}]$$

onde:

η_{MI} (adim.): rendimento térmico pelo método indireto

No cálculo do rendimento da caldeira pelo método direto, ou pelo indireto, é necessário que seja definido qual poder calorífico do combustível será utilizado, o superior (PCS) ou o inferior (PCI). Para uma mesma situação, os valores de rendimento calculados com base no PCI e no PCS são diferentes. No método proposto pela norma ASME é utilizado o PCS, enquanto o PCI é empregado na metodologia apresentada pela norma DIN.

Nos cálculos de rendimento mostrados adiante será utilizado o PCI. Portanto, nas equações apresentadas nos itens seguintes, deve-se entender que η_{MD} ou η_{MI} são calculados com base no PCI.

Tendo-se calculado o rendimento base PCI, pode-se obter o rendimento base PCS, multiplicando-se o valor encontrado pelo PCI e dividindo-se pelo PCS.

2.1 POTÊNCIA FORNECIDA

A principal potência fornecida ao processo é a energia química do combustível; as demais são as entalpias associadas aos fluxos de combustível e de ar de combustão.

A potência fornecida é calculada pela equação:

$$E_f = m_{CM} * PCI_{CM} + m_{CM} * Cp_{CM} * (T_{CM} - T_{REF.}) + m_{AR} * Cp_{AR} * (T_{AR} - T_{REF.}) \quad [Eq. 05]$$

onde:

m_{CM} (kg/h): vazão mássica de carvão mineral

PCI_{CM} (kJ/kg): poder calorífico inferior do carvão mineral

$T_{REF.}$ (°C): temperatura de referência; as normas ASME e DIN adotam o valor de 25 °C

T_{CM} (°C): temperatura de entrada do carvão mineral na caldeira

Cp_{CM} (kJ/kg°C): calor específico médio do carvão mineral entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, a pressão constante

m_{AR} (kg/h): vazão mássica de ar de combustão

T_{AR} (°C): temperatura do ar de combustão na entrada do volume de controle

Cp_{AR} (kJ/kg°C): calor específico médio do ar entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, a pressão constante

2.2 POTÊNCIA ÚTIL

A potência útil é a potência transferida à água e é calculada pela equação:

$$E_u = m_v * h_v - m_{H_2O} * h_{H_2O} \quad [Eq. 06]$$

onde:

m_v (kg/h): vazão mássica de vapor gerado; num cálculo menos rigoroso, pode-se substituir esse termo por " m_{H_2O} (kg/h)"

h_v (kJ/kg): entalpia específica do vapor gerado

m_{H_2O} (kg/h): vazão mássica de água fornecida a caldeira

h_{H_2O} (kJ/kg): entalpia específica da água de alimentação da caldeira

2.3 POTÊNCIA NÃO APROVEITADA

A potência não aproveitada corresponde à somatória de uma série de perdas que ocorrem no processo e é calculada pela expressão:

$$P = P_{gases} + P_{CO} + P_{MPO} + P_{purgas} + P_{cinzas} + P_{ambiente} \quad [Eq. 07]$$

onde:

P_{gases} (kJ/h): potência perdida associada aos gases de combustão

P_{CO} (kJ/h): potência não aproveitada associada à presença de CO nos gases de combustão

P_{MPO} (kJ/h): potência não aproveitada associada à presença de carbono no material particulado presente nos gases de combustão

P_{purgas} (kJ/h): potência perdida por purgas

P_{cinzas} (kJ/h): potência perdida associada à retirada de cinzas do processo

$P_{ambiente}$ (kJ/h): potência perdida para o ambiente

2.3.1 Potência não aproveitada associada aos gases de combustão (P_{gases})

A perda de potência pelos gases efluentes é calculada pela expressão:

$$P_{\text{gases}} = m_{\text{gases}} * C_{p_{\text{gases}}} * (T_{\text{gases}} - T_{\text{REF.}}) \quad [\text{Eq. 08}]$$

onde:

m_{gases} (kg/h): vazão mássica de gases de combustão

T_{gases} (°C): temperatura dos gases de combustão

$C_{p_{\text{gases}}}$ (kJ/kg°C): calor específico médio dos gases de combustão entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

2.3.2 Potência não aproveitada devido à presença de CO nos gases de combustão (P_{CO})

A perda de potência devido ao fato de parte do carbono do combustível ter sido convertida a CO, e não a CO₂, é calculada pela expressão:

$$P_{\text{CO}} = V_{\text{gases}} * f_{\text{CO}} * PCI_{\text{CO}} \quad [\text{Eq. 09}]$$

onde:

V_{gases} (m³/h): vazão volumétrica de gases de combustão

f_{CO} (m³n CO/m³n gases de combustão): fração volumétrica de CO dos gases de combustão

PCI_{CO} (kJ/m³n): poder calorífico inferior do monóxido de carbono

2.3.3 Potência não aproveitada devido à presença de carbono nos gases de combustão (P_{MPO})

A perda de potência devido ao fato de parte do carbono do combustível não ter sido oxidada, nem a CO e nem a CO₂, e que deixa o processo via gases de combustão é calculada pela expressão:

$$P_{\text{MPO}} = V_{\text{gases}} * C_{\text{MP}} * f_{\text{CMP}} * PCI_{\text{C}} \quad [\text{Eq. 10}]$$

onde:

C_{MP} (kg/ m³n): concentração de material particulado dos gases de combustão

f_{CMP} (kg C/kg MP): fração mássica de carbono do material particulado dos gases de combustão

PCI_{C} (kJ/kg): poder calorífico inferior do carbono

2.3.4 Potência não aproveitada devido às purgas da caldeira (P_{purgas})

A perda de potência devido ao fato de parte da água não deixar a caldeira na forma de vapor é calculada pela expressão:

$$P_{\text{purgas}} = m_p * C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} * (T_1 - T_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [\text{Eq. 11}]$$

onde:

m_p (kg/h): vazão mássica média de água purgada da caldeira (purgas contínuas) ou vazão média fictícia de água purgada (para purgas descontínuas)

T_1 (°C): temperatura de saturação da água na pressão da caldeira

2.3.5 Potência não aproveitada devido à retirada de cinzas do processo (P_{cinzas})

Há perda de potência na retirada de cinzas pelo fundo da caldeira e dos preaquecedores, e no precipitador eletrostático porque o material deixa o volume de controle numa temperatura acima da ambiente e porque esse material possui carbono não oxidado do combustível. Essa perda é calculada pelas expressões:

$$P_{\text{cinzas}} = P_{\text{cinzas1}} + P_{\text{cinzas2}} + P_{\text{cinzas3}} + P_{\text{cinzas4}} \quad [\text{Eq. 12}]$$

$$P_{\text{cinzas1}} = m_{\text{cinzas1}} * C_{p_{\text{cinzas1}}} * (T_{\text{cinzas1}} - T_{\text{REF.}}) + m_{\text{cinzas1}} * f_{\text{Ccinzas1}} * PCI_{\text{C}} \quad [\text{Eq. 13}]$$

$$P_{\text{cinzas2}} = m_{\text{cinzas2}} * C_{p_{\text{cinzas2}}} * (T_{\text{cinzas2}} - T_{\text{REF.}}) + m_{\text{cinzas2}} * f_{\text{Ccinzas2}} * PCI_{\text{C}} \quad [\text{Eq. 14}]$$

$$P_{\text{cinzas3}} = m_{\text{cinzas3}} * C_{p_{\text{cinzas3}}} * (T_{\text{cinzas3}} - T_{\text{REF.}}) + m_{\text{cinzas3}} * f_{\text{Ccinzas3}} * PCI_{\text{C}} \quad [\text{Eq. 15}]$$

$$P_{\text{cinzas4}} = m_{\text{cinzas4}} * C_{p_{\text{cinzas4}}} * (T_{\text{cinzas4}} - T_{\text{REF.}}) + m_{\text{cinzas4}} * f_{\text{Ccinzas4}} * PCI_{\text{C}} \quad [\text{Eq. 16}]$$

onde:

P_{cinzas1} (kJ/h): potência perdida associada à retirada de cinzas pelo fundo da caldeira

m_{cinzas1} (kg/h): vazão mássica das cinzas retiradas pelo fundo da caldeira

T_{cinzas1} (°C): temperatura das cinzas retiradas pelo fundo da caldeira

$C_{p_{\text{cinza1}}}$ (kJ/kg°C): calor específico médio das cinzas retiradas pelo fundo da caldeira entre a temperatura

de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

$f_{C_{cinzas1}}$ (kg C/kg MP): fração mássica de carbono das cinzas retiradas pelo fundo da caldeira

$P_{cinzas2}$ (kJ/h): potência perdida associada à retirada de cinzas pelo fundo do economizador

$m_{cinzas2}$ (kg/h): vazão mássica das cinzas retiradas pelo fundo do economizador

$T_{cinzas2}$ (°C): temperatura das cinzas retiradas pelo fundo do economizador

Cp_{cinza2} (kJ/kg°C): calor específico médio das cinzas retiradas pelo fundo do economizador entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

$f_{C_{cinzas2}}$ (kg C/kg MP): fração mássica de carbono das cinzas retiradas pelo fundo do economizador

$P_{cinzas3}$ (kJ/h): potência perdida associada à retirada de cinzas pelo fundo do preaquecedor de ar

$m_{cinzas3}$ (kg/h): vazão mássica das cinzas retiradas pelo fundo do preaquecedor de ar

$T_{cinzas3}$ (°C): temperatura das cinzas retiradas pelo fundo do preaquecedor de ar

Cp_{cinza3} (kJ/kg°C): calor específico médio das cinzas retiradas pelo fundo do preaquecedor de ar entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

$f_{C_{cinzas3}}$ (kg C/kg MP): fração mássica de carbono das cinzas retiradas pelo fundo do preaquecedor de ar

$P_{cinzas4}$ (kJ/h): potência perdida associada à retirada de cinzas pelo precipitador eletrostático

$m_{cinzas4}$ (kg/h): vazão mássica das cinzas retiradas pelo precipitador eletrostático

$T_{cinzas4}$ (°C): temperatura das cinzas retiradas pelo precipitador eletrostático

Cp_{cinza4} (kJ/kg°C): calor específico médio das cinzas retiradas pelo precipitador eletrostático entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

$f_{C_{cinzas4}}$ (kg C/kg MP): fração mássica de carbono das cinzas retiradas pelo precipitador eletrostático

2.3.6 Potência não aproveitada associada às trocas de calor entre as superfícies externas dos

equipamentos e outros elementos, e o ar ambiente ($P_{ambiente}$)

Essa perda decorre do fato da temperatura da superfície externa da caldeira, bem como a de outros elementos internos ao volume de controle, ser superior à do ar ambiente, o que produz uma transferência de calor do volume de controle para o meio. Tal calor rejeitado para o meio não é aproveitado, é, portanto, uma parcela de “perda” energética.

O cálculo dessa perda é difícil, sendo necessário o conhecimento das áreas, temperaturas e emissividades das superfícies externas dos elementos internos ao volume de controle, além da temperatura e velocidade do ar ambiente ao redor desses elementos. A norma ASME fornece um roteiro completo para o cálculo.

Alternativamente, essa perda pode ser estimada através de expressões empíricas. A norma DIN apresenta duas expressões para a queima de carvão: uma para linhito - *brown coal* [Eq. 17] e outra para antracito - *hard coal* [Eq. 18]:

$$P_{ambienteLinhito} = 0,0315 * (E_u)^{0,7} \quad [Eq. 17]$$

$$P_{ambienteAntracito} = 0,0220 * (E_u)^{0,7} \quad [Eq. 18]$$

onde:

$P_{ambienteLinhito}$ (kJ/h): potência perdida para o ambiente na queima de linhito

$P_{ambienteAntracito}$ (kJ/h): potência perdida para o ambiente na queima de antracito

3 CONCLUSÃO

Nos trabalhos de campo realizados pelo IPT, a metodologia de cálculo desenvolvida tem levado a valores consistentes de rendimento térmico de caldeiras operando com diferentes combustíveis.

A aplicação do método para caldeiras a carvão, em particular, foi realizada uma única vez e envolveu duas caldeiras da empresa Braskem, unidade de Trifino-RS.

O trabalho realizado pelo IPT teve início com o acompanhamento durante quinze dias das principais variáveis operacionais das caldeiras, utilizando-se instrumentação do IPT e cativa dos equipamentos. Foram coletadas amostras de

combustível e de cinzas para análises químicas e físicas nos laboratórios do IPT.

Os resultados obtidos no levantamento foram utilizados no cálculo do rendimento das caldeiras pelos dois métodos, chegando-se a valores bastante consistentes. Foi, então, configurado um programa que, anexado ao sistema supervisor das caldeiras, permitiu que os valores obtidos fossem disponibilizados em tempo real à equipe de operação, possibilitando ajustes e consequente redução no consumo de combustível.

Os bons resultados alcançados no desenvolvimento desse trabalho permitiu sua apresentação num importante evento nacional da área de engenharia química (VERGNHANINI FILHO; BUENO, 2010).

4 REFERÊNCIAS

ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME PTC 4-1998**: Fired Steam Generators. New York, 1999. (revision of ASME PTC 4.1 - 1964).

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **DIN 1994-02**: Acceptance Testing of Steam Generators. Berlin, 1996 (updated version of the DIN 1942).

VERGNHANINI FILHO, R.; BUENO, P.R.B. e Rorato, M.A. **Metodologia de cálculo e de acompanhamento on-line do rendimento térmico de caldeiras multicombustível**. XVIII COBEQ - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Foz do Iguaçu-PR, 19-22/09/2010.