

Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras

Simplified methodology for calculating the thermal efficiency of boilers

Renato Vergnhanini Filho^{a*}

^a Laboratório de Engenharia Térmica, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave:

rendimento térmico de caldeiras; combustão industrial; caldeiras.

Keywords:

thermal efficiency of boiler; industrial combustion; boiler.

Resumo

Define-se rendimento térmico de uma caldeira como sendo a fração da potência liberada na câmara de combustão que é transferida ao fluido de trabalho. Não havendo metodologia normalizada no Brasil para o cálculo do rendimento de caldeiras, costuma-se utilizar normas de outros países. A metodologia de cálculo desenvolvida pelo Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do IPT é baseada nas normas dos Estados Unidos (ASME) e Alemanha (DIN), e vem sendo utilizada em trabalhos realizados para a indústria envolvendo o uso eficiente de combustível.

Abstract

The thermal efficiency of a boiler is defined as the fraction of the power released in the combustion chamber which is transferred to the working fluid. Since there is no standard methodology in Brazil for the calculation of boiler efficiency, international standards are usually used. The calculation methodology developed by the Laboratory of Thermal Engineering (LET) of IPT is based on the American (ASME) and German (DIN) standards, and it has been used in industry work involving the efficient use of fuel.

1 Introdução

As caldeiras são equipamentos comumente encontrados na indústria para a geração de vapor, seja para aquecimento, seja para a geração de energia elétrica. No caso mais comum, a caldeira é um trocador de calor onde há a transferência de calor dos gases quentes - produzidos pela queima de um combustível - para a água. A água, ao receber calor, aquece-se e vaporiza-se, daí o nome "caldeira de vapor", "gerador de vapor" ou, simplesmente, "caldeira" (Figura 1).

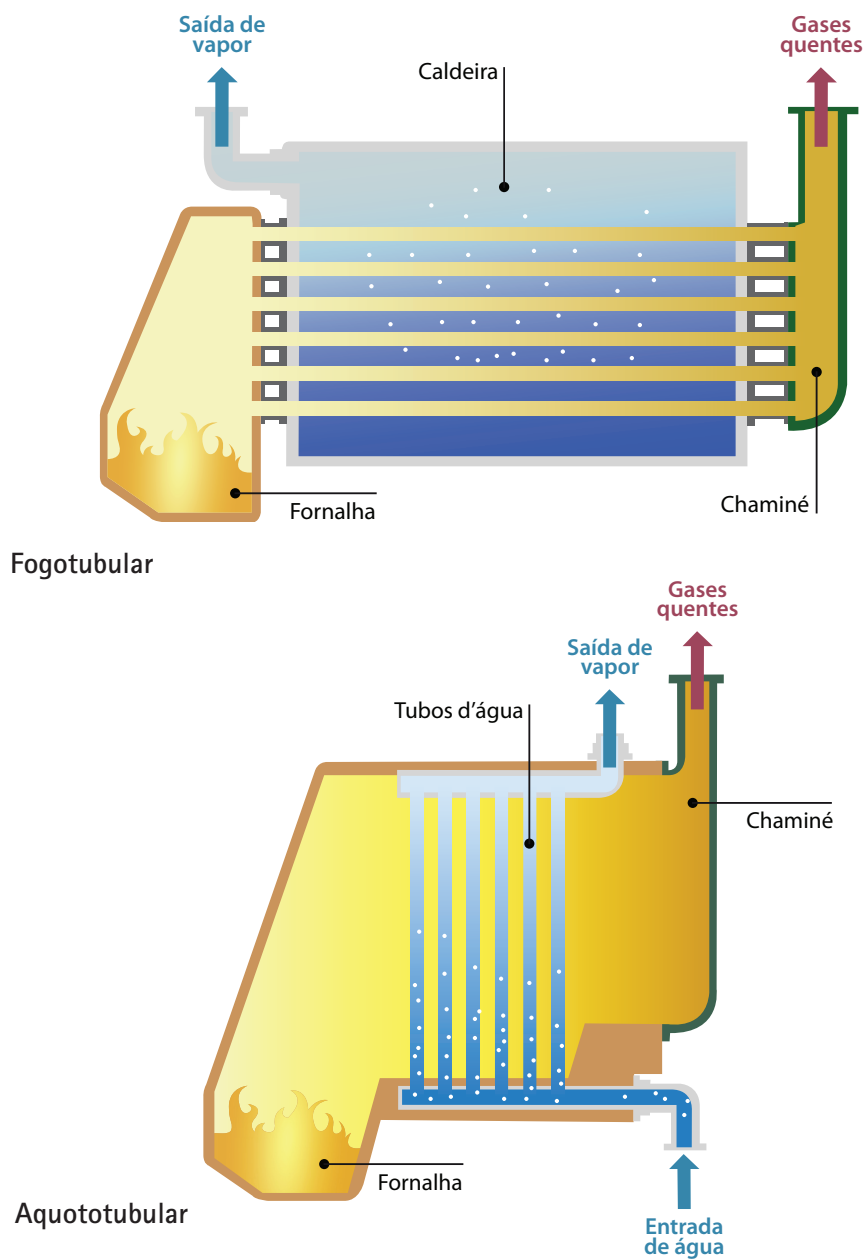


Figura 1 – Diagrama simplificado de caldeiras.

Fonte: portal São Francisco.

Na operação das caldeiras, por questões financeiras, ambientais ou estratégicas, é cada vez mais importante a preocupação com a eficiência energética, sendo o cálculo do seu rendimento térmico a forma de avaliação comumente utilizada. 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 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1999) ou da Alemanha (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 1996), que serão designadas neste texto simplesmente por "norma ASME" e "norma DIN", respectivamente.

Dentro desse contexto, o LET desenvolveu metodologia simplificada para o cálculo do rendimento térmico de caldeiras baseada nas normas ASME e DIN. A metodologia desenvolvida foi publicada em um manual elaborado para a Comgás sobre o uso racional do gás natural na indústria que, por sua vez, foi apresentado pelo LET num importante evento promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Química (ABEQ), (VERGNHANINI FILHO; SILVA, 2012).

2 Metodologia de cálculo do rendimento térmico de caldeiras desenvolvida pelo LET

Na **Figura 2**, apresenta-se esquema simplificado dos principais fluxos de água, vapor, ar, combustível, gases de combustão, água de purga e cinzas de uma caldeira típica, dotada de pré-aquecedores de ar e água ("economizador"), e com sistema em via seca de retirada de cinzas (material particulado orgânico proveniente da queima incompleta do combustível somado ao inorgânico presente no combustível) dos gases de combustão.

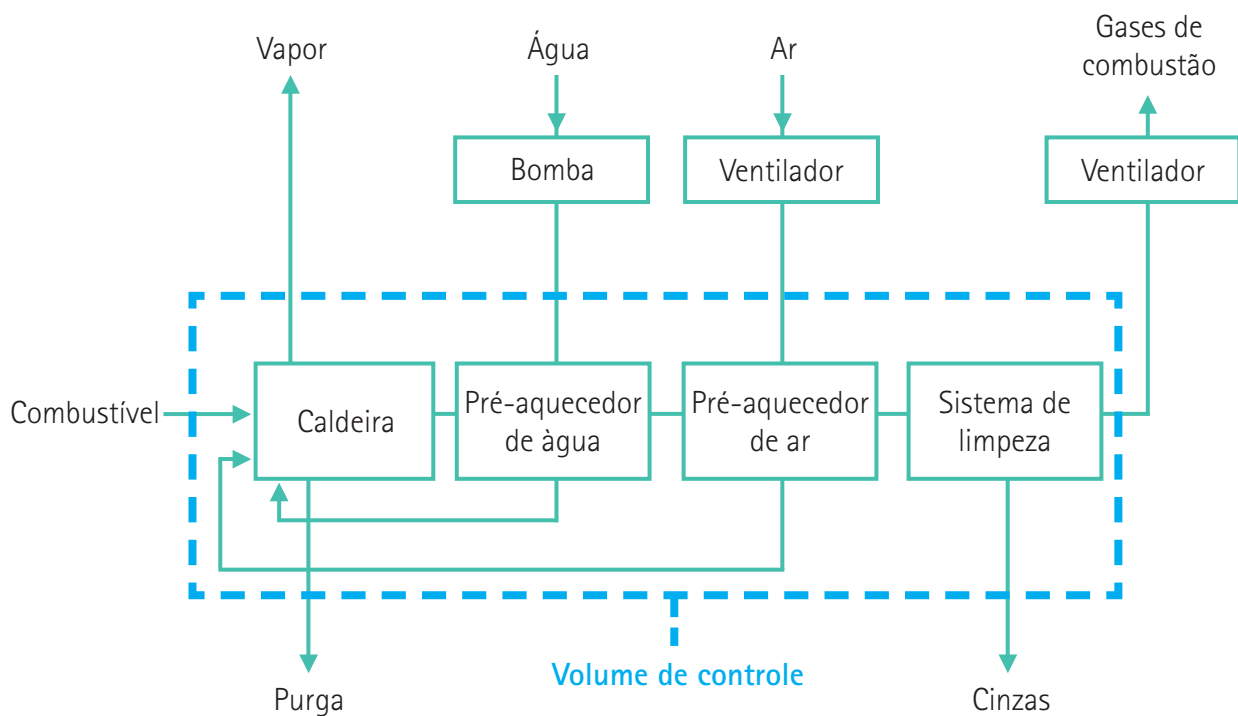


Figura 2 - Fluxograma simplificado da caldeira.

Fonte: elaborado pelos autores.

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 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.

2.2 Balanço energético na caldeira

O balanço energético na caldeira (na verdade, no VC definido anteriormente) operando em regime permanente (regime de operação em que não há alteração significativa das variáveis de processo ao longo do tempo) pode ser escrito de forma simplificada como:

$$E_f = E_u + P \quad (1)$$

Onde:

E_f = potência fornecida à caldeira em kJ/h;

E_u = potência útil absorvida pela água em kJ/h;

P = potência não aproveitada em kJ/h.

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

$$\eta_{MD} = E_u / E_f \quad (2)$$

Onde:

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

O rendimento pode, também, ser determinado pelo denominado "método indireto", ou "método das perdas", através da **Equação 3** ou da **Equação 4**, obtidas da substituição da **Equação 1** na **Equação 2**.

$$\eta_{MI} = 1 - (P / E_f) \quad (3)$$

$$\eta_{MI} = E_u / (E_u + P) \quad (4)$$

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 (PC) 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 .

2.2 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:

$$E_f = m_c * PCI_c + m_c * Cp_c * (T_c - T_{REF.}) + m_{AR} * Cp_{AR} * (T_{AR} - T_{REF.}) \quad (5)$$

Onde:

m_c = vazão mássica do combustível em kg/h;

PCI_c = poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg;

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

T_c = temperatura de entrada do combustível na caldeira em °C;

Cp_c = calor específico médio do combustível entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C);

m_{AR} = vazão mássica do ar de combustão em kg/h;

T_{AR} = temperatura do ar de combustão na entrada do volume de controle em °C;

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

2.3 Potência útil

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

$$E_u = m_v * h_v - m_{H_2O} * h_{H_2O} \quad (6)$$

Onde:

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

h_v = entalpia específica do vapor gerado em kJ/kg;

m_{H_2O} = vazão mássica de água fornecida à caldeira em kg/h;

h_{H_2O} = entalpia específica da água de alimentação da caldeira em kJ/kg.

2.4 Potência não aproveitada

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

$$P = P_{gases} + P_{CO} + P_{MPO} + P_{purgas} + P_{cinzas} + P_{ambiente} \quad (7)$$

Onde:

P_{gases} = potência perdida associada aos gases de combustão em kJ/h;

P_{CO} = potência não aproveitada associada à presença de CO nos gases de combustão em kJ/h;

P_{MPO} = potência não aproveitada associada à presença de carbono nos sólidos presentes nos gases de combustão em kJ/h;

P_{purgas} = potência perdida por purgas em kJ/h;

P_{cinzas} = potência perdida associada à retirada de cinzas do processo em kJ/h;

$P_{ambiente}$ = potência perdida para o ambiente em kJ/h.

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

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

$$P_{gases} = m_{gases} * C_{p_{gases}} * (T_{gases} - T_{REF.}) \quad (8)$$

Onde:

m_{gases} = vazão mássica de gases de combustão em kg/h;

T_{gases} = temperatura dos gases de combustão em °C;

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

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:

$$P_{CO} = V_{gases} * f_{CO} * PCI_{CO} \quad (9)$$

Onde:

V_{gases} = vazão volumétrica de gases de combustão (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em m³/h;

f_{CO} = fração volumétrica de CO dos gases de combustão;

PCI_{CO} = poder calorífico inferior do CO (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em kJ/m³.

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:

$$P_{MPO} = V_{gases} * C_{MP} * f_{CMP} * PCI_C \quad (10)$$

Onde:

C_{MP} = concentração de sólidos dos gases (volume nas CNTP - 0 °C e 101,3 kPa) em kg/m³;

f_{CMP} = fração mássica de carbono dos sólidos dos gases;

PCI_C = poder calorífico inferior do carbono em kJ/kg.

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:

$$P_{purgas} = m_p * Cp_{H2O} * (T_i - T_{H2O}) \quad (11)$$

Onde:

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

Cp_{H2O} = calor específico médio da água entre a temperatura de entrada na caldeira e a de saturação, à pressão constante em kJ/(kg °C);

T_i = temperatura de saturação da água na pressão da caldeira em °C;

T_{H2O} = temperatura da água na entrada da caldeira em °C.

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

Há perda de potência na retirada de cinzas pelo sistema de limpeza de gases 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 pela expressão:

$$P_{cinzas} = m_{cinzas} * Cp_{cinzas} * (T_{cinzas} - T_{REF.}) + m_{cinzas} * fC_{cinzas} * PCI_C \quad (12)$$

Onde:

P_{cinzas} = potência perdida associada à retirada de cinzas do processo em kJ/h;

m_{cinzas} = vazão mássica das cinzas em kg/h;

T_{cinzas} = temperatura das cinzas em °C;

Cp_{cinzas} = calor específico médio das cinzas entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C);

fC_{cinzas} = fração mássica de carbono das cinzas.

Potência não aproveitada associada às trocas de calor entre a superfície externa da caldeira e o ar ambiente ($P_{ambiente}$)

Essa perda decorre do fato da temperatura da superfície externa da caldeira ser superior à do ar ambiente, o que produz uma transferência de calor da caldeira para o meio. Tal calor rejeitado para o meio não é aproveitado sendo, portanto, uma perda de energia.

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 a seguinte expressão:

$$P_{ambiente} = C * (Eu)^{0,7} \quad (13)$$

Onde:

$P_{ambiente}$ = potência perdida para o ambiente em kJ/h;

C (adimensional) = coeficiente de valor igual a 0,0113 para caldeiras convencionais operando com óleo combustível ou gás natural, de valor 0,0220 para carvão mineral tipo antracito e de valor 0,0315 para carvão tipo linhito; o valor é igual a 0,0315 para caldeiras de leito fluidizado.

3 Emprego da metodologia de cálculo desenvolvida pelo LET

Nos trabalhos de campo realizados pelo LET, 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 mineral, em particular, foi realizada uma única vez e envolveu dois equipamentos da empresa Braskem, unidade de Trinfo-RS. O trabalho realizado teve início com o acompanhamento durante quinze dias das principais variáveis operacionais das caldeiras, utilizando-se instrumentação do LET 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 conseqüente redução no consumo de combustível.

Os bons resultados alcançados no desenvolvimento desse trabalho permitiram a sua apresentação em dois eventos nacionais: um da área de engenharia química (VERGNHANINI FILHO; BUENO; RORATO, 2010) e outro específico sobre produção, conversão e aplicações do carvão mineral (VERGNHANINI FILHO, 2017).

A aplicação do método para caldeiras a gás natural foi realizada em cerca de quarenta equipamentos instalados em empresas clientes da Comgás situadas nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (RMSP) e de Campinas (RMC). Os dados necessários para os cálculos foram levantados experimentalmente utilizando o laboratório móvel do LET (**Figura 3**).

O monitoramento das caldeiras mostrou que aproximadamente metade delas, as que possuem economizador ou, menos comum, pré-aquecedor de ar instalado, o rendimento térmico é satisfatório, entre 91 % e 95 %, base *PCI*, sendo as de maior rendimento aquelas que operam com excesso de ar reduzido, ou seja, teor de O₂ dos gases próximo de 1,5 %. Nas demais caldeiras, o rendimento se situou entre 84 % e 91 %.

Nas indústrias, que tiveram suas caldeiras monitoradas, foi realizado seminário com o objetivo de apresentar e debater os resultados obtidos, e as técnicas possíveis de serem aplicadas para reduzir o consumo de combustível dos equipamentos. Foram apontadas desde estratégias de custo zero e aplicação imediata, como modificações nos procedimentos operacionais do equipamento até medidas de médio prazo, envolvendo troca e aquisição de equipamentos e instrumentos.

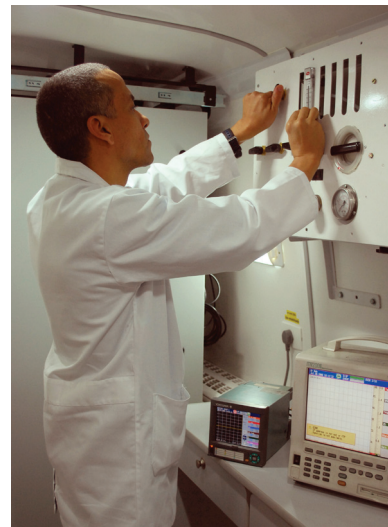


Figura 3 – Laboratório móvel do LET.
 Fonte: elaborado pelos autores.

4 Disseminação de conhecimento

A difusão da metodologia de cálculo desenvolvida tem sido feita nos trabalhos realizados para a indústria, mas também por meio da participação do LET em eventos e da apresentação do tema "Balanços de massa e energia em processos industriais de combustão" no curso "Combustão Industrial", que vem sendo ministrado regularmente pelo Laboratório desde 1986 nas modalidades aberta e *in-company*.

5 Referências

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

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

PORTAL SÃO FRANCISCO. Colégio São Francisco. **Motor a vapor – caldeira**. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/mecanica/motor-a-vapor>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia de cálculo do rendimento térmico de caldeiras operando com carvão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 5., 2017, Criciúma. **Anais...** Criciúma: Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) e Rede Carvão, 2017.

VERGNHANINI FILHO, R.; BUENO, P. R. B.; RORATO, M. A. Metodologia de cálculo e de acompanhamento on-line do rendimento térmico de caldeiras multicomcombustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 18, 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: ABEQ, 2010.

VERGNHANINI FILHO, R.; SILVA, J. R. N. M. Manual sobre o uso racional do gás natural em equipamentos de combustão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., 2012, Búzios. **Anais...** São Paulo: ABEQ, 2012.