

Gás natural como fonte de energia para a indústria cerâmica: análises energética e exergetica

A. A. Silva¹, W. C. P. B. de Lima¹, A. G. B. de Lima^{1*}

¹Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande – Campus I,
Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP 58429-900, Campina Grande – PB

(Recebido em 04/02/2010; revisado em 18/03/2010; aceito em 30/08/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho tem como objetivo modelar e analisar energética e exergeticamente a combustão do gás natural, e verificar a viabilidade econômica e vantagens encontradas no uso deste combustível para secagem e queima de materiais cerâmicos. O gás natural tem a seguinte composição química na base molar: 91,80% de CH₄, 5,58% de C₂H₆, 0,97% de C₃H₈, 0,05% de C₄H₁₀, 0,10% de C₅H₁₂, 1,42% de N₂ e 0,08% de CO₂. O gás é queimado a seco fornecendo produtos de combustão cuja análise na base molar é: 7,80% de CO₂, 0,20% de CO, 7,00% de O₂ e 85,00% de N₂. Resultados das eficiências energética e exergetica e da quantidade de calor liberada do processo de combustão, e energia dos gases de exaustão são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Gás natural; fornos cerâmicos; eficiência; secagem.

Abstract:

This work aimed to model and analyze energetic and exergetically natural gas combustion, and to verify economic feasibility and benefits found in the use of this fuel for drying and firing of ceramics material. Natural gas has the following chemical composition on the molar basis: CH₄ 91.80%, C₂H₆ 5.58%, C₃H₈ 0.97%, C₄H₁₀ 0.05%, C₅H₁₂ 0.10%, N₂ 1.42 % and CO₂ 0.08%. The gas is burned giving dry products of combustion whose molar analysis on the dry basis is: CO₂ 7.82%, CO 0.20%, O₂ 7.00% and N₂ 85.00%. Results of the energy and exergy efficiencies and heat transfer on the combustion process, and energy of the exhaust gases are presented and analyzed.

Keywords: Natural gas; ceramics kilns; efficiency; drying.

* E-mail: gilson@dem.ufcg.edu.br (A. G. B. de Lima)

1. Introdução

O setor cerâmico representa uma importante fatia da geração de emprego e renda para economia do Brasil, pois o mesmo possui aproximadamente 5.500 empresas distribuídas entre cerâmicas e olarias, gerando aproximadamente 400 mil empregos diretos e 1,25 milhões de empregos indiretos, movimentando a economia do país de forma intensa. Dentro deste contexto a cerâmica de revestimento é um dos mais importantes segmentos e apresenta um crescente desempenho tecnológico, devido às tecnologias utilizadas na fabricação de seus diversos produtos [1].

A fabricação das peças cerâmicas compreende diversas fases: exploração das jazidas, o tratamento prévio das matérias primas, a homogeneização, conformação das peças, a secagem e a queima [2,3]. Alguns processos também utilizam a esmaltação e decoração. Na homogeneização, água é adicionada à argila para dar características de plasticidade e facilitar a moldagem das peças. Numa fase seguinte, esta água acumulada nos poros é retirada pelo processo de secagem durante a fabricação de produtos cerâmicos. Isto é importante antes da queima, para evitar que essa peça venha a explodir dentro do forno.

Nos processos de secagem e queima de produtos cerâmicos, em especial a cerâmica vermelha, o principal combustível utilizado é a lenha e seus derivados. Em vista dos problemas que esses combustíveis apresentam quanto à questão ambiental, vem se tornando uma tendência mundial o consumo de gás natural como combustível para secagem e a queima desses produtos.

O gás natural é um combustível ecológico, de baixo impacto ambiental. Apresenta um elevado rendimento e eficiência, pela combustão completa com menor excesso de ar, e reduz as emissões de gases poluentes que são os causadores da chuva ácida e da destruição da camada de ozônio. O gás pode e vem substituindo outras fontes de energia, como madeira, carvão, óleo combustível e contribuindo para a redução do desmatamento. Isto faz com que haja um melhoramento da qualidade do ar e conseqüentemente uma melhor qualidade de vida das pessoas.

O gás natural possui algumas características importantes que diferenciam de outros combustíveis: não é tóxico; em caso de vazamento, dissipa-se na atmosfera naturalmente; é incolor e inodoro em seu estado natural, e não é explosivo, apesar de ser inflamável [4].

O uso do gás natural oferece muitas vantagens entre as quais pode-se citar: disponibilidade em amplo território internacional, eliminação de custos com transporte e seu uso como fonte de geração de energia elétrica junto aos centros de consumo. São justamente estas vantagens que têm atraído capitais externos para sua exploração. Do ponto de vista das vantagens diretas para o usuário pode-se citar a fácil adaptação das instalações existentes; menor corrosão dos equipamentos e menos custo de manutenção; menor custo das instalações; combustão facilmente regulável; elevado rendimento energético; o pagamento só é feito após ter utilizado o combustível e admite grande variação do fluxo [5].

Sabendo que os processos de secagem e queima são de grande importância na fabricação dos produtos cerâmicos e que dependem do tipo de forno a ser utilizado no processo, a indústria da cerâmica vermelha utiliza dois tipos principais de fornos, que são classificados em intermitentes e contínuos, cada um com suas vantagens e desvantagens. O forno intermitente funciona com interrupções para carga e descarga das peças cerâmicas, e geralmente as descargas das peças são feitas pela mesma porta onde foram feitas as cargas a serem aquecidas. A carga é colocada no forno e são aquecidas até que atinja a temperatura desejada, depois a carga é resfriada até a temperatura ambiente e então é retirada do forno. O forno contínuo funciona sem que haja interrupções, enquanto um lote de peças está saindo do forno, outro lote de peças está iniciando o processo de queima (ou secagem) sem que haja descontinuidade do processo. O forno contínuo possui as seções de pré-aquecimento, queima (ou secagem) e resfriamento; este tipo de forno tem a vantagem de fazer o reaproveitamento dos gases, ser mais eficiente no uso da energia, e a carga a ser queimada (ou secada) entra por uma porta e sai por outra por meio de vagonetas que são utilizadas para o transporte da carga.

O uso do gás natural como combustível para os fornos cerâmicos está se tornando cada dia mais comum. Isto deve-se à necessidade da indústria modernizar-se e tornar-se mais competitiva neste mercado tão exigente, contribuindo para produção, qualidade e diversificação dos produtos e adoção de políticas ambientalmente corretas. A conversão de um forno que utiliza lenha, serragem ou GLP para a utilização do GN não só é possível, como também, em decorrência do uso deste último combustível, além da melhoria das condições ambientais, ocorre melhoria na qualidade do produto final. No entanto, a conversão tem sido dificultada em função do baixo custo da lenha.

Para se ter uma idéia, diante dos avanços na área de preservação ambiental, ocorridos no Brasil, o forno à lenha, muito utilizado na indústria cerâmica, está sendo substituído por outros tipos de fornos que não utilizam lenha, estando entre eles os que usam gás natural. As causas principais são: a escassez do combustível (madeira) na região (desertificação) e a poluição do meio ambiente quando queimada (grande quantidade de fuligem e impurezas tóxicas nos gases de exaustão) [5].

Contudo, apesar da importância, a conversão de fornos cerâmicos para a utilização de outro combustível requer uma análise técnica do processo de queima (ou secagem) e do balanço térmico do forno, e uma análise econômica antes da conversão para se identificar a viabilidade ou não da mesma. Medições em campo e ferramentas de simulação que modelem o funcionamento do forno são muito úteis nessa análise [6]. Neste sentido este trabalho tem como objetivo modelar e analisar energeticamente e exergeticamente o processo de combustão do gás natural, e verificar a viabilidade econômica e vantagens encontradas no uso deste combustível para secagem e queima de materiais cerâmicos.

2. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

2.1. Material (Gás Natural)

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que na temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso, com características adequadas para ser utilizado como combustível em instalações industriais, comerciais, residenciais e como matéria-prima em indústrias químicas, siderúrgicas e de fertilizantes. Apresenta normalmente baixos teores de contaminantes tais como nitrogênio, CO₂, água e compostos sulfurados. Na natureza, ele é encontrado acumulado em rochas porosas no subsolo, em alguns casos associado ao petróleo, quando é então chamado de gás associado, constituindo reservatórios naturais [7].

O gás natural que será analisado apresenta a seguinte composição química na base molar [8]:

Metano (CH ₄)	91,8 %
Etano (C ₂ H ₆)	5,58 %
Propano (C ₃ H ₈)	0,97 %
Butano (C ₄ H ₁₀)	0,05 %
Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,10 %
Nitrogênio (N ₂)	1,42 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,08 %

O gás natural é queimado a seco fornecendo produtos de combustão cuja composição em base molar é:

Dióxido de carbono (CO ₂)	7,80%
Monóxido de carbono (CO)	0,20%
Oxigênio (O ₂)	7,00%
Nitrogênio (N ₂)	85,00%

2.2. Análise energética e exergetica do processo de combustão

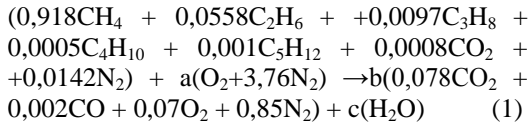
Para análise do sistema térmico operando em regime permanente, considera-se que o combustível entra no forno com uma vazão mássica de \dot{m}_c e é misturado com uma quantidade de ar \dot{m}_a . O combustível entra nesse sistema à temperatura T_c e à pressão P_c , enquanto o ar entra nele com a temperatura T_a e à pressão P_a . A mistura queima completamente e os produtos da combustão deixam o sistema à temperatura T_p e à pressão P_p com o fluxo de massa \dot{m}_p . Da combustão transfere-se uma quantidade de calor \dot{Q} , que pode ser aproveitado, por exemplo, para o ambiente interno do forno, o qual é responsável pela secagem e queima dos produtos cerâmicos.

2.2.1 Análise energética e exergetica do processo de combustão

De modo simplificado, a queima de um combustível se constitui em uma reação química rápida, a alta temperatura, com velocidade de reação crescente e com intensa liberação de calor e luz. Assim sendo, a garantia de uma mistura íntima ar-combustível é essencial para uma boa combustão. Sem contato não há reação química. Ao aplicar esse conceito aos combustíveis sólidos que vêm sendo utilizados pela indústria cerâmica - lenha e carvão - entende-se a razão de sua baixa eficiência, mesmo quando utilizados em equipamentos e sistemas dimensionados para seu processamento [7].

Os combustíveis gasosos são os que melhor se apresentam para se ter uma combustão rápida, segura e isenta de resíduos.

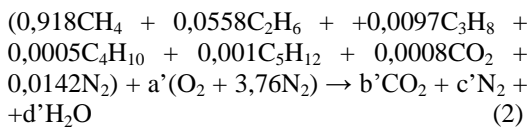
Considerando a mistura como gás ideal, para 1 kmol de mistura de gases (gás natural) pode-se escrever a seguinte equação química:



onde \underline{a} , \underline{b} e \underline{c} são coeficientes molares.

Os produtos consistem de \underline{b} kmoles de produtos secos e \underline{c} kmoles de vapor d'água, ambos por kmol da mistura combustível.

Para se ter conhecimento da quantidade percentual do ar, considere a equação para combustão completa da mistura combustível com a quantidade de ar teórica:



$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{h}_C} = \bar{h}_P - \bar{h}_R = \dot{a} \hat{n}_P \bar{h}_s - \dot{a} \hat{n}_e \bar{h}_e = \bar{h}_{RP} \quad (3b)$$

onde nestas equações, R e P simbolizam os reagentes e produtos respectivamente; \dot{h}_C é a vazão molar do combustível; \bar{h}_P e \bar{h}_R simbolizam, respectivamente, as entalpias dos produtos e dos reagentes por mol de combustível; \hat{n} correspondem aos respectivos coeficientes na reação química que fornecem os moles dos reagentes e produtos por mol de

$$\bar{h}(T, P) = \bar{h}_f^0 + [\bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{ref}, P_{ref})] = \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} = \bar{h}_f^0 + \int_{ref}^T c_p dT \quad (4)$$

onde \bar{h}_f^0 representa a entalpia de formação e c_p é o calor específico a pressão constante.

A entalpia \bar{h}_f^0 está associada com a formação do composto a partir de seus elementos e $\Delta\bar{h}$ está relacionada a uma variação de estado em uma composição constante.

A entalpia de formação é a energia liberada ou absorvida quando o composto é formado pelos seus elementos, estando ambos, o composto e os elementos, a T_{ref} e P_{ref} , que determinam o estado de referência padrão ($T_{ref}=298,15\text{ K}$ e $P_{ref}=1\text{ atm}$).

onde a' , b' , c' e d' são coeficientes a serem determinados por balanceamento de equação química.

2.2.2 Análise de energia

Usando a 1ª Lei da Termodinâmica, o balanço de energia, para o sistema reagente em regime permanente, quando a energia cinética e potencial são desprezíveis, é da forma:

$$\dot{Q}_{VC} + \dot{a} \hat{n}_e \bar{h}_e = \dot{a} \hat{n}_s \bar{h}_s \quad (3a)$$

onde \dot{Q}_{VC} representa o fluxo de calor transferido durante o processo e \bar{h} é a entalpia específica. O subscrito e e s representam as entrada e saída do volume de controle.

Para as entalpias expressas por mol de combustível, o balanço de energia toma a forma:

combustível, e \bar{h}_{RP} é a entalpia de combustão na base molar.

A entalpia específica de um composto em um estado que não o estado padrão é determinada pela adição da variação de entalpia específica $\Delta\bar{h}$ entre o estado padrão e o estado de interesse e a entalpia de formação como dado abaixo:

As entalpias na base molar, entalpia de formação e calor específico a uma determinada pressão e temperatura podem ser obtidas da literatura [9-13]. Por exemplo, para o gás carbônico:

$$\left(\bar{h}_f^0\right)_{\text{CO}_2} = -393520\text{ kJ/kmol}, T = 298\text{ K}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 9364\text{ kJ/kmol}, T = 298\text{ K}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 36876\text{ kJ/kmol}, T = 889\text{ K}$$

$$\bar{c}_p = -3,7357 + 30,529 \theta^{0,5} - 4,1034 \theta + 0,024198 \theta^2 \text{ kJ/kmol}$$

$$\text{sendo } \bar{c}_p = M' c_p \text{ e } \theta = \frac{T(\text{K})}{100}.$$

O poder calorífico representa a quantidade de calor transferida da câmara durante a combustão ou reação à temperatura constante. No caso de pressão constante, ou processo de escoamento em regime permanente, conclui-se, pela 1ª Lei da Termodinâmica, que eles são iguais à entalpia de combustão com o sinal contrário.

Junto com o termo poder calorífico, são usados os termos “superior” (PCS) e “inferior” (PCI). O poder calorífico superior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido. Já o poder calorífico inferior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor [9,14].

O poder calorífico inferior (PCI) do combustível é dado por:

$$x = x^{\text{term}} + x^{\text{qui}} = \left[\frac{q_p}{e} - h_{00} - T_0 \frac{q_p}{e} - s_{00} + \frac{v^2}{2} + gz \right] + x^{\text{qui}} \quad (7)$$

Quando se avalia uma variação de exergia, ou de exergia de fluxo entre dois estados onde a composição química da substância é a mesma, a contribuição química se cancela, permanecendo apenas a diferença das contribuições termomecânicas. Entretanto, em várias avaliações torna-se necessário levar em conta explicitamente a contribuição da exergia

$$\bar{x}^{\text{qui}} = \frac{x^{\text{qui}}}{M} = \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln \frac{y_i}{y_i^e} = \sum_i y_i \bar{x}_i^0 + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (8)$$

onde y_i e y_i^e simbolizam, respectivamente, a fração molar do componente i na mistura a T_0 , P_0 e no ambiente, e o superescrito 0 representa o estado padrão.

Para uma ampla gama de aplicações de engenharia, a conveniência de utilizar valores padronizados, geralmente compensa a pequena falta de precisão que tal procedimento pode trazer. Particularmente, o efeito de pequenas variações nos valores de T_0 , P_0 em torno de seus valores padrões podem ser desprezadas.

Se a potência de aquecimento do sistema térmico é tomada como o produto e se a transferência de calor para o ambiente externo juntamente com os gases produzidos na saída são vistos como perdas, uma expressão para a eficiência exergética, ϵ , que mede o quanto de

$$\text{PCI}_c = \sum y_i \text{PCI}_i / \sum y_i \quad (5)$$

onde y_i representa a fração molar do componente i na mistura a T_0 e P_0 . Similarmente pode-se fazer para obter o PCS.

A eficiência da combustão, η_{comb} , será:

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{|\dot{Q}_{\text{VC}}/\dot{m}_c|}{(\text{PCI ou PCS})_{25^\circ \text{C}, 1 \text{ atm}}} \quad (6)$$

2.2.3 Análise de exergia

A exergia, X , associada a um estado especificado é composta por duas contribuições: a contribuição termomecânica, X^{term} , e a contribuição química, X^{qui} . Em uma base unitária de massa, a exergia total, x , será:

química. Alguns exemplos são os problemas que envolvem reações químicas, como é o caso da combustão.

A exergia química para uma mistura de gases ideais a T_0 e P_0 é obtida pela soma das contribuições de cada componente. O resultado, por mol da mistura, é:

exergia na entrada do sistema é convertida em produtos é da forma:

$$\epsilon = \frac{|\dot{Q}_{\text{VC}}|}{\dot{X}_c} \quad (9)$$

onde $\dot{X}_c = \dot{m}_c x_c^{\text{qui}}$ representa a taxa pela qual a exergia entra como o combustível.

Para analisar os efeitos da temperatura dos gases de exaustão e do ar na entrada do sistema térmico, sobre a quantidade de calor liberada na combustão do gás e sobre as eficiências energética e exergética deste sistema, foi desenvolvido um código computacional

utilizando o software EES (Engineering Equation Solver).

3. Resultados e Discussão

3.1. Balanço estequiométrico e razão ar-combustível

Fazendo o balanceamento da equação (1), tem-se:

$$a = 3,1308875; b = 13,33125; c = 2,0507$$

Neste caso, a razão ar-combustível em base molar e as massas moleculares do ar e combustível, são dadas por:

$$\frac{\overline{AC}}{AC} = \frac{3,1308875 (1 + 3,76)}{1} = 14,9030245 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível l}}$$

$$M_{\text{ar}} = 0,21 \times 2 \times 16 + 0,79 \times 2 \times 14 = 28,84 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kmol de ar}}$$

$$M_c = 0,918 \times (12 + 4 \times 1,01) + 0,0558 \times (2 \times 12 + 6 \times 1,01) + 0,0097 \times (3 \times 12 + 8 \times 1,01) + 0,0005 \times (4 \times 12 + 10 \times 1,01) + 0,001 \times (5 \times 12 + 12 \times 1,01) + 0,0142 \times (2 \times 14) = 17,328414 \frac{\text{kg de combustível}}{\text{kmol de combustível l}}$$

Logo, em base mássica, a razão ar-combustível será:

$$AC = \frac{\overline{M}_{\text{ar}}}{M_c} = 14,9030245 \frac{28,84}{17,328414} = 24,80337938 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kg de combustível l}}$$

A quantidade teórica de ar é obtida através do balanceamento químico da equação (2) para combustão completa. Neste caso, fazendo o balanceamento da equação (2), obtém-se:

$$a' = 2,08505; b' = 1,0665; c' = 7,853988; d' = 2,0507$$

Então a razão ar-combustível teórica em base molar será:

$$\frac{\overline{AC}}{AC} = \frac{a'(1 + 3,76)}{1} = 9,924838 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível l}}$$

Assim sendo, a percentagem de ar teórico será dada por:

$$\% \text{ de ar teórico} = \frac{14,9030245 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}}{9,924838 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}} = 1,5015 \text{ ou } 150,15\%$$

Com referência ao armazenamento, a quantidade de combustível em kmoles, n_c , presente em 10 m^3 de mistura combustível à 300 K e a 1 bar (10^5 N/m^2), é dada por:

$$n_c = \frac{PV}{RT} = 0,400930158 \text{ kmol de combustível}$$

Isto corresponde a uma massa de:

$$m_c = n_c M_c = 6,947483763 \text{ kg de combustível}$$

A quantidade total de produtos da combustão é dada por:

$$b+c=15,38195 \text{ kmol de produto / kmol de combustível.}$$

Conseqüentemente, a quantidade de mistura de produtos que será formada por 10 m^3 de mistura de combustível será:

$$n_p = (b+c) \times n_c = 6,167087644 \text{ kmoles de produto gasoso.}$$

A massa total dos produtos será:

$$m_p = n_p \times M_p = 168,6067552 \text{ kg de produto.}$$

onde $M_p = 27,99376958 \text{ kg de produto/kmol de combustível.}$

A massa de produto também pode ser dada por:

$$m_p = m_c + m_a = 6,947483763 + 24,80337938 \times 6,947483763 = 173,0468821 \text{ kg de produto}$$

A diferença entre os dois resultados de m_p é proveniente de erros de arredondamento nas operações matemáticas.

Já que a água é formada na queima dos combustíveis hidrocarbonados, a fração molar do vapor d'água nos produtos gasosos da combustão pode ser significativa. Se os produtos gasosos da combustão forem resfriados a uma pressão de mistura constante, a

temperatura de ponto de orvalho pode ser atingida quando a água começa a se condensar. Como a água depositada no sistema de descarga (metálico) podem causar corrosão, o conhecimento da temperatura de ponto de orvalho é importante. Desse modo, de acordo com a equação química balanceada, a fração molar do vapor d'água, y_{vp} é:

$$y_{vp} = \frac{a}{b+a} = 0,1901 \quad \text{ou} \quad 19,01\%$$

Por outro lado, a pressão parcial do vapor d'água nos produtos da combustão é dada por:

$$P_{vp} = y_{vp} P_p$$

Daí, conhecendo-se P_{vp} , obtém-se T_p a partir das tabelas termodinâmicas ou de algum software comercial como por exemplo o CATT ou o EES. A temperatura T_p é a temperatura de saturação à uma pressão P_{vp} , que também é a temperatura de ponto de orvalho.

3.2. Análise energética

Considerando a equação (1) balanceada quimicamente e que o ar e os produtos de combustão são misturas de gases ideais, tem-se no sistema térmico a seguinte equação da energia:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{h}_c} = \bar{h}_p - \bar{h}_R = & \{13,3125 \dot{e} 0,078 \bar{h}_{CO_2} + \\ & + 0,002 \bar{h}_{CO} + 0,07 \bar{h}_{O_2} + 0,85 \dot{h}_{N_2} \dot{u} + 2,0507 \\ & \bar{h}_{H_2O} \dot{u} - \} 0,918 \bar{h}_{CH_4} + 0,0558 \bar{h}_{C_2H_6} + 0,0097 \\ & \bar{h}_{C_3H_8} + 0,0005 \bar{h}_{C_4H_{10}} + 0,001 \bar{h}_{C_5H_{12}} + 0,0008 \\ & \bar{h}_{CO_2} + 0,0142 \bar{h}_{N_2} + 3,1308875 \dot{e} \bar{h}_{O_2} + \\ & 3,76 \bar{h}_{N_2} \dot{u} \dot{u} \end{aligned}$$

Quando os elementos e os compostos são estáveis no estado padrão, suas entalpias de formação são nulas. Por exemplo, O_2 e N_2 presentes no ar de combustão são estáveis a 25 °C e 1 atm, então $\bar{h}_{f_{O_2}}^0$ e $\bar{h}_{f_{N_2}}^0$ para estes elementos são iguais a zero.

Usando as equações (3a) e (3b), o balanço de energia assume a forma:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{h}_c} = & + \{13,3125 \dot{e} 0,078 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{CO_2}^0 + \\ & + 0,002 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{CO}^0 + 0,07 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{O_2}^0 + \\ & + 0,85 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{N_2}^0 + 2,0507 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{H_2O}^0 - \\ & - \{0,918 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{CH_4}^0 + 0,0558 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{C_2H_6}^0 \\ & + 0,0097 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{C_3H_8}^0 + 0,0005 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{C_4H_{10}}^0 \\ & + 0,001 \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}_{C_5H_{12}}^0 + 0,0008 (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{CO_2} \\ & + 0,0142 (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{N_2} + 3,1308875 \dot{e} (\bar{h}_f^0 + \\ & + \Delta \bar{h})_{O_2} + 3,76 (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{N_2} \dot{u} \dot{u} \} \end{aligned}$$

Considerando como exemplo que $\dot{h}_c = 0,0072 \text{ Kg/s}$, $T_c = T_a = 27^\circ\text{C}$, $P_c = P_a = 1 \text{ atm}$, e $T_p = 616^\circ\text{C}$, tem-se para:

a) Produtos

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_{CO_2} &= (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{CO_2} = 36876 - \\ &- 9364 = 27512 \text{ KJ/kmol} \\ \Delta \bar{h}_{CO} &= (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{CO} = 26740 - \\ &- 8669 = 18071 \text{ KJ/kmol} \\ \Delta \bar{h}_{O_2} &= (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{O_2} = 27584 - \\ &- 8682 = 18902 \text{ KJ/kmol} \\ \Delta \bar{h}_{N_2} &= (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{N_2} = 26568 - \\ &- 8669 = 17899 \text{ KJ/kmol} \\ \Delta \bar{h}_{H_2O(g)} &= (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{H_2O(g)} = 31429 - \\ &- 9904 = 21525 \text{ KJ/kmol} \end{aligned}$$

b) Reagentes

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_{CH_4} &= \int_{298}^{300} \bar{c}_p(T) dT = \int_{2,98}^3 100 \bar{c}_p(\theta) d\theta = \\ &= \int_{2,98}^3 100(-672,87 + 439,74 \theta^{0,25} - 24,875 \theta^{0,75} + \\ &+ 323,88 \theta^{-0,5}) d\theta = 72,243 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\Delta h}_{C_2H_6} &= \frac{3}{2,98} \int_{100}^{\theta} (-6,895 + 17,26\theta - 0,6402\theta^2 \\ &+ 0,00728\theta^3) d\theta = 78,36707 \text{ kJ/kmol} \\ \bar{\Delta h}_{C_3H_8} &= \frac{3}{2,98} \int_{100}^{\theta} (-4,042 + 30,46\theta - 1,571\theta^2 \\ &+ 0,03171\theta^3) d\theta = 147,673 \text{ kJ/kmol} \\ \bar{\Delta h}_{C_4H_{10}} &= \frac{3}{2,98} \int_{100}^{\theta} (3,954 + 37,612\theta - 1,833\theta^2 \\ &+ 0,03498\theta^3) d\theta = 198,9818 \text{ kJ/kmol} \\ \bar{\Delta h}_{C_5H_{12}} &= \frac{3}{2,98} \int_{298}^{\theta} c_P dT = \frac{3}{2,98} \int_{298}^{\theta} 2,273 dT = \\ &= 2,273'300 - 2,273'298 = 4,546 \text{ kJ/kmol} \\ \bar{\Delta h}_{N_2} &= (\bar{h}_{T=270C} - \bar{h}_{T=250C})_{N_2} = 8723 - \\ &- 8669 = 54 \text{ kJ/kmol}^* \quad \text{*do ar.} \\ \bar{\Delta h}_{O_2} &= (\bar{h}_{T=270C} - \bar{h}_{T=250C})_{O_2} = 8736 - \\ &- 8682 = 54 \text{ kJ/kmol}^* \quad \text{*do ar.} \end{aligned}$$

Assim sendo, tem-se que:

$$\begin{aligned} \bar{h}_P &= \{13,33125 [0,078(-393520 - \\ &- 27512) + 0,002(-110530 + 18071) + 0,07 \\ &(0 + 18902) + 0,85(0 + 17899)] + [2,0507 \\ &(-241820 + 21525)]\} = -614099,5318 \\ &\text{kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_R &= \{[0,918(-74850 + 72,243) + 0,0558 \\ &(-84680 + 78,367) + 0,0097(-103850 + \\ &+ 147,673) + 0,0005(-126150 + 198,982) + \\ &+ 0,001(-146440 + 4,546) + 0,0008(-393520 + \\ &+ 27512) + 0,0142(0 + 54)] + 3,1308875 \\ &[(0 + 54) + 3,76(0 + 54)]\} = -74069,33026 \\ &\text{kJ/kmol} \end{aligned}$$

A vazão molar do combustível é dada por:

$$\dot{n}_C = \frac{\dot{m}_C}{M_C} = \frac{0,0072}{17,328414} = 0,000415502 \text{ kmol de} \\ \text{combustível/s}$$

Então a transferência de calor durante a combustão do gás para o forno será:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{VC} &= \dot{n}_C (\bar{h}_P - \bar{h}_R) = 0,000415502 \\ &[-614099,5318 - (-74069,33026)] = \\ &= -224,3839194 \text{ kW} \end{aligned}$$

Utilizando a equação (5) para o PCI, tem-se:

$$\begin{aligned} PCI_C &= 0,918 PCI_{CH_4} + 0,0558 PCI_{C_2H_6} \\ &+ 0,0097 PCI_{C_3H_8} + 0,0005 PCI_{C_4H_{10}} + \\ &+ PCI_{C_5H_{12}} + 0,0008 PCI_{CO_2} + 0,0142 PCI_{N_2} \end{aligned}$$

então:

$$\begin{aligned} PCI_C &= 0,918'50020 + 0,0558'47480 + \\ &+ 0,0097'46360 + 0,0005'45720 + \\ &+ 0,001'45350 + 0,0008'0 + 0,0142'0 = \\ &= 49085,646 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

O poder calorífico superior do combustível (PCS) é dado por:

$$\begin{aligned} PCS_C &= 0,918'55510 + 0,0558'51870 + \\ &+ 0,0097'50380 + 0,0005'49500 + \\ &+ 0,001'49010 + 0,0008'0 + 0,0142'0 = \\ &= 54409,659 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Assim sendo, usando a equação (6), a eficiência da combustão usando o valor do PCI é de 0,6348 ou 63,48%.

As Figuras 1-6 ilustram a influência da temperatura dos produtos de combustão na saída e do ar na entrada, no rendimento do forno e na quantidade de calor liberada na combustão do gás natural para o forno.

Verifica-se nas Figuras 1 e 2 que à medida que a temperatura dos gases de exaustão na saída do forno aumentam, o rendimento energético do forno diminui; isto ocorre de forma linear. Observa-se na Figura 1 que o rendimento energético variou de aproximadamente 77% para 48% quando a temperatura dos gases de exaustão passam de 400°C para 850°C.

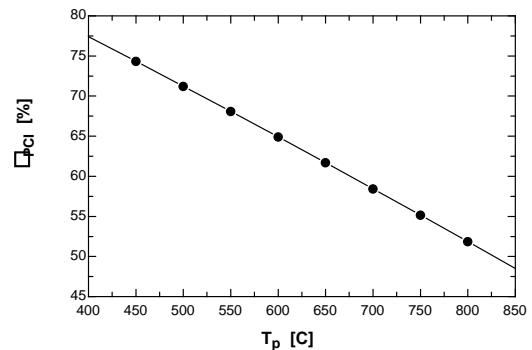


Figura 1: Rendimento energético do forno (baseado no PCI do gás natural) em função da temperatura dos gases de exaustão.

A Figura 3 mostra que a quantidade de calor disponível variou de aproximadamente 263 kW até 166 kW, quando a temperatura dos gases de exaustão variou de 400°C até 850°C, respectivamente.

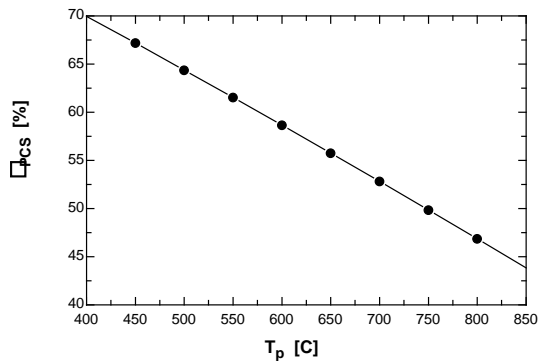


Figura 2: Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura dos gases de exaustão

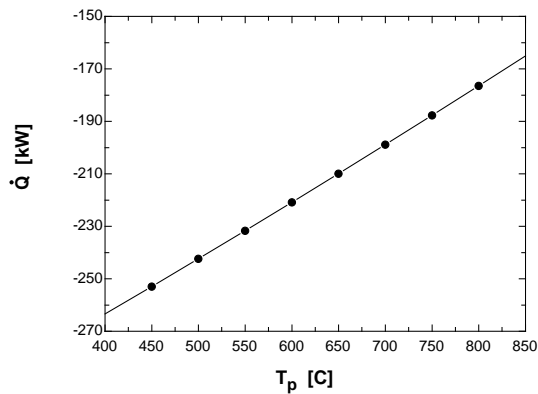


Figura 3: Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura dos gases de combustão na saída do forno.

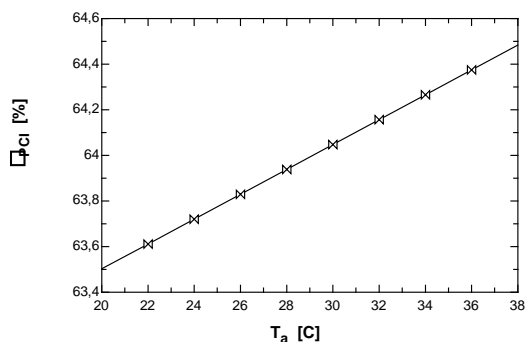


Figura 4: Rendimento energético do forno (baseado no PCI do gás natural) em função da temperatura do ar na entrada do forno.

Nas Figuras 4 e 5 verifica-se na medida que a temperatura de entrada do ar no sistema térmico aumenta, o rendimento energético aumenta, ou seja, o rendimento energético é proporcional a

temperatura de entrada do ar. Observa-se na Figura 6 que enquanto a quantidade de calor liberada variou de aproximadamente 216 kW até 219,4 kW, seu rendimento energético variou de 63,5% para 64,5%, pondo em evidência a sua pouca influência sobre o rendimento. A maior influência está relacionada com a quantidade de ar injetada no sistema, que proporciona uma combustão mais completa e portanto maior quantidade de calor disponível.

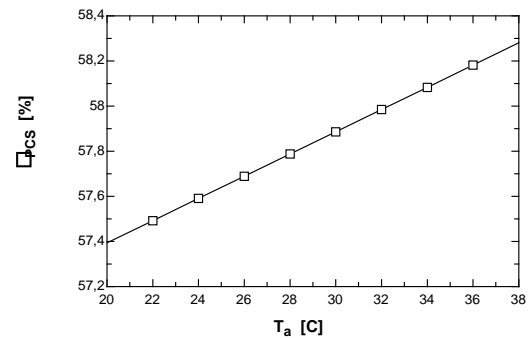


Figura 5: Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura do ar na entrada do forno.

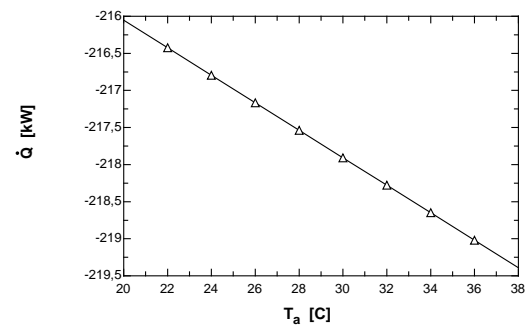


Figura 6: Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura do ar na entrada do forno.

3.3 Análise exergética

De acordo com a composição do gás natural tem-se que:

$$y_{CH_4} = 0,918;$$

$$y_{C_2H_6} = 0,0558; \quad y_{C_3H_8} = 0,0097;$$

$$y_{C_4H_{10}} = 0,0005; \quad y_{C_5H_{12}} = 0,001;$$

$$y_{N_2} = 0,0142 \quad \text{e} \quad y_{CO_2} = 0,0008.$$

Por outro lado, a exergia química a T_0 e P_0 , dos constituintes são [10]:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{CH}_4}^0 &= 836510 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{CH}_4}^0 = \frac{836510}{16,042} = \\ &= 52144,994 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^0 &= 1504360 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{C}_2\text{H}_6}^0 = \frac{1504360}{30,068} = \\ &= 50031,928 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{C}_3\text{H}_8}^0 &= 2163190 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{C}_3\text{H}_8}^0 = \frac{2163190}{44,094} = \\ &= 49058,602 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^0 &= 2818930 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^0 = \frac{2818930}{58,120} = \\ &= 48501,893 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^0 &= 3477050 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^0 = \frac{3477050}{72,12} = \\ &= 48212,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{CO}_2}^0 &= 20140 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{CO}_2}^0 = \frac{20140}{44} = \\ &= 457,727 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \bar{x}_{\text{N}_2}^0 &= 720 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ P } x_{\text{N}_2}^0 = \frac{720}{28,013} = \\ &= 25,702 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Desde que $\bar{R} = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$, e $T_0 = 298 \text{ K}$, tem-se que:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{CH}_4}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{CH}_4} P_0) &= \bar{x}_{\text{CH}_4}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{CH}_4} = 836510 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,918) = 836298,0242 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \\ \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{C}_2\text{H}_6} P_0) &= \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1504360 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,0558) = 1497209,773 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \\ \bar{x}_{\text{C}_3\text{H}_8}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{C}_3\text{H}_8} P_0) &= \bar{x}_{\text{C}_3\text{H}_8}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{C}_3\text{H}_8} = 2163190 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,0097) = 2151704,894 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \\ \bar{x}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} P_0) &= \bar{x}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 2818930 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,0005) = 2800098,217 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} P_0) &= \bar{x}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 3477050 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,001) = 3459935,539 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \\ \bar{x}_{\text{CO}_2}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{CO}_2} P_0) &= \bar{x}_{\text{CO}_2}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{CO}_2} = 20140 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,0008) = 2472,684723 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \\ \bar{x}_{\text{N}_2}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{N}_2} P_0) &= \bar{x}_{\text{N}_2}^0(T_0, P_0) + \\ &+ \bar{R}T_0 \ln y_{\text{N}_2} = 720 + 8,314 \cdot 298 \cdot \\ &\cdot \ln(0,0142) = -9820,863061 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

Nas condições ambientais, a exergia termomecânica é nula. Então, a exergia total para o gás natural é justamente a exergia química dada pela equação (8). Assim:

$$\begin{aligned} x_{\text{C}}^{\text{qui}} &= 0,918 \cdot 836298,0242 + 0,0558 \cdot \\ &\cdot 1497209,773 + 0,0097 \cdot 2151704,894 + \\ &+ 0,0005 \cdot 2800098,217 + 0,001 \cdot \\ &\cdot 3459935,539 + 0,0008 \cdot 2472,68472 + \\ &+ 0,0142 \cdot (-9820,86) = 876859,93 \text{ kJ} / \\ &\text{kmol de combustível} \end{aligned}$$

ou,

$$x_{\text{C}}^{\text{qui}} = \frac{\bar{x}_{\text{C}}^{\text{qui}}}{M_{\text{C}}} = \frac{876859,93}{17,328414} = 50602,434 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para obtenção da eficiência exergética do forno, um balanço de exergia deve ser utilizado. Em regime permanente, a taxa pela qual a exergia entra no forno é igual à taxa pela qual a exergia sai acrescentada da taxa pela qual a exergia é destruída no interior do sistema.

Conforme o ar de combustão entra na condição ambiente, e conseqüentemente com um valor nulo de exergia, apenas o combustível fornece exergia ao sistema. A exergia sai do forno acompanhando o calor, e com os produtos da combustão. Já que o combustível entra a 27°C e 1 atm, o que corresponde aos valores aproximados de T_0 e P_0 do ambiente, e sendo os efeitos de energia cinética e potencial desprezíveis, a exergia do combustível é apenas a sua exergia química. Não existe contribuição termomecânica alguma. Assim,

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\text{C}} &= \dot{m}_{\text{C}} x_{\text{C}}^{\text{qui}} = 0,0072 \cdot \\ &\cdot 50602,43457 = 364,3375289 \text{ kW} \end{aligned}$$

Então usando a equação (9), a eficiência exérgica será de 0,6158 ou 61,58%.

Na Figura 7 apresenta-se o rendimento exérgico do forno em função da temperatura dos gases de exaustão. Observa-se que quanto maior for a temperatura dos gases de exaustão, menor será o rendimento exérgico do forno. O rendimento exérgico variou de aproximadamente 74,5% até 47%, quando a temperatura dos gases de exaustão variam de 400°C para 850°C, respectivamente.

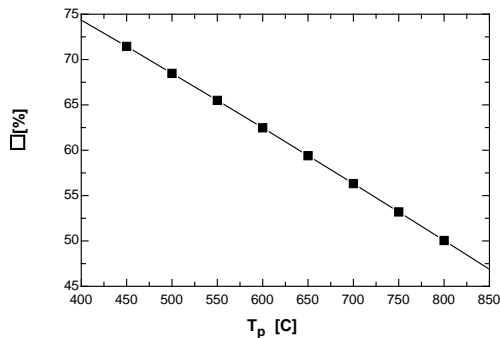


Figura 7: Rendimento exérgico do forno em função da temperatura dos gases de exaustão.

Na Figura 8 apresenta-se o rendimento exérgico em função da temperatura do ar na entrada do sistema térmico. Verifica-se que quanto maior for a temperatura do ar na entrada no sistema, maior será o rendimento exérgico do mesmo. Resultados similares foram reportados por [7,15].

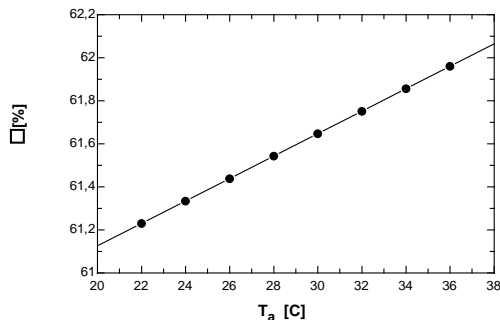


Figura 8: Rendimento exérgico do forno em função da temperatura do ar na entrada do forno.

4. Conclusões

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa teórica, pode-se concluir que:

a) o gás natural mostrou-se ser viável para ser usado em sistemas térmicos, por exemplo, em fornos cerâmicos uma vez que possui vantagens, econômica e ambiental e boa eficiência de combustão;

b) a medida que a temperatura dos gases de combustão na saída do sistema aumenta de 400 para 850°C, o rendimento energético e exérgico deste sistema diminui de 77% para 48% e de 74% para 47%, respectivamente;

c) quanto maior for a temperatura dos gases de entrada no sistema térmico, maior será o rendimento exérgico e energético. Quando se aumenta a temperatura do ar na entrada deste sistema de 20°C até 38°C, o rendimento energético do forno aumenta de 63,5% para 64,5%;

d) as eficiências exérgica e energética apresentaram resultados muito próximos entre si.

Referências

- [1] ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). *Setor: dados oficiais*. Acesso em 06 de janeiro de 2010. www.anicer.com.br
- [2] Bauer, L. A. F. *Materiais de construção*. Rio de Janeiro: Editora LCT, 1994.
- [3] Guilherme, A. *Fabricação em cerâmica vermelha. Mineropar-minerais do Paraná/SERT*, 1998.
- [4] GASMIG (Companhia de Gás de Minas Gerais). Acessado em janeiro de 2009. www.gasmig.com.br
- [5] CTGAS (Centro Tecnológico do gás). Acesso em janeiro de 2009. www.ctgas.com.br
- [6] Santos, G. M. *Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) da Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2001.
- [7] Melchiades, A. C. B.; Albuquerque, S. F.; Lima, A. G. B. *Análise energética e exérgica de um forno cerâmico operando com gás natural*. Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 2007, Cusco.
- [8] PBGAS (Companhia Paraibana de Gás). Acesso em abril de 2009. www.pbgas.com.br
- [9] Van Wylen, V. G. J.; Sonntag, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. Editora Jonh & Sons, 1976.
- [10] Kotas, T. J. *The exergy method of thermal plant analysis*. Londres: Editora Butterworths, 1985.

- [11] Li, K. W. *Applied thermodynamics: Availability method and energy conversion*. New York: Editora TAYLOR & FRANCIS, 1996.
- [12] Rohsenow, W. A.; Hartnett, J. P.; Cho, Y. I. *Handbook of heat transfer*. Boston: Editora Mc Graw Hill, 1998.
- [13] Moran, M. S.; Shapiro, H. N. X. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. New York: Editora John Wiley e Sons, 2003.
- [1] Van Wylen, V. G.; Sonntag, R.; Borgnakke, C. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1993.
- [14] Melchíades, A. C. B. *Análises energética e exergética de num forno a gás natural operando para a indústria cerâmica*. 2006 119p. Relatório Técnico de Pesquisa CNPq, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.