

DESEMPENHO DE UM QUEIMADOR INFRAVERMELHO FUNCIONANDO COM GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO E GLICERINA

Marcello Araújo Dantas

Mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo - UFRN. Graduado em Tecnologia dos Materiais - IFRN. E-mail: marcello_1984@hotmail.com

Francisco de Assis Oliveira Fontes

Professor Associado II do Departamento de Engenharia Mecânica - UFRN. Doutor em Engenharia Química - UFRN. E-mail: francisfontes@uol.com.br

Cleiton Rubens Formiga Barbosa

Professor Associado II do Departamento de Engenharia Mecânica - UFRN. Doutor em Engenharia Mecânica - EESC/USP. E-mail: cleiton@ufrnet.br

RESUMO

A utilização de queimadores infravermelhos em aplicações industriais apresenta muitas vantagens do ponto de vista técnico-operacional, como por exemplo, homogeneidade no fornecimento de calor, na forma de radiação e convecção, apresentando um maior controle das emissões devido à passagem dos gases de exaustão através de um leito cerâmico macroporoso. O presente trabalho apresenta um queimador infravermelho comercial, no qual foi adaptado um ejetor experimental, capaz de promover uma mistura de gás liquefeito de petróleo (GLP) e glicerina. Através da variação de percentuais de combustível *dual*, foi avaliado o desempenho do queimador infravermelho mediante a realização de um balanço de energia e das emissões atmosféricas. Foi introduzido um controlador de temperatura com termopar modulando dois estágios (fogo baixo/alto), utilizando válvulas solenóides para cada combustível. O queimador infravermelho foi submetido a testes e ensaios variando-se a quantidade de glicerina inserida por um sistema de alimentação por gravidade. Como método de análise termodinâmica para estimativa de carga foi utilizada uma placa de alumínio localizada na saída dos gases de combustão, sendo a distribuição de temperaturas medida por um sistema de aquisição de dados que registrou em tempo real as medidas dos termopares afixados. O queimador apresentou uma combustão estável para os níveis de 15, 20 e 25 % de adição de glicerina em razão mássica de GLP, aumentando o fornecimento de calor para a placa. Pelos dados obtidos, observou-se que houve uma melhora na eficiência de 1ª Lei do queimador infravermelho quando ocorre o aumento de adição da glicerina na mistura. Os níveis de emissões de gases poluentes produzidos pela combustão (CO, NO_x, SO₂ e HC) atenderam aos limites estabelecidos pela resolução ambiental nº 382/ 2006 do CONAMA.

PALAVRAS-CHAVE: queimador infravermelho, gás liquefeito de petróleo, glicerina, balanço de energia, emissões de gases poluentes.

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF AN INFRARED BURNER RUNNING WITH LIQUEFIED PETROLEUM GAS AND GLYCERIN

ABSTRACT

The use of infrared burners in industrial applications has many advantages in terms of technical-operational, for example, uniformity in the heat supply in the form of radiation

and convection, with greater control of emissions due to the passage of exhaust gases through a macro-porous ceramic bed. This paper presents an infrared burner commercial, which was adapted an experimental ejector, capable of promoting a mixture of liquefied petroleum gas (LPG) and glycerin. By varying the percentage of *dual-fuel*, it was evaluated the performance of the infrared burner by performing an energy balance and atmospheric emissions. It was introduced a temperature controller with thermocouple modulating two-stage (low heat / high heat), using solenoid valves for each fuel. The infrared burner has been tested and tests by varying the amount of glycerin inserted by a gravity feed system. The method of thermodynamic analysis to estimate the load was used an aluminum plate located at the exit of combustion gases and the distribution of temperatures measured by a data acquisition system which recorded real-time measurements of the thermocouples attached. The burner had a stable combustion at levels of 15, 20 and 25% of adding glycerin in mass ratio of LPG gas, increasing the supply of heat to the plate. According to data obtained showed that there was an improvement in the efficiency of the 1st Law of infrared burner with increasing addition of glycerin. The emission levels of greenhouse gases produced by combustion (CO, NO_x, SO₂ and HC) met the environmental limits set by resolution No. 382/2006 of CONAMA.

Keywords: infrared burner, liquefied petroleum gas, glycerin, energy balance, greenhouse gases.

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM QUEIMADOR INFRAVERMELHO FUNCIONANDO COM GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO E GLICERINA

INTRODUÇÃO

Desde o fim do século XX, a sociedade mundial vem ponderando significativamente suas preocupações com a preservação do meio ambiente, em todos os pontos inseridos no contexto econômico das atividades industriais. Isso é evidenciado pelo inconveniente da produção de elementos tóxicos prejudiciais a saúde humana e ao planeta, provocados por boa parte dos meios atuais de geração e consumo de energia.

Uma das rotas alternativas mais promissoras atuais para mitigação desse problema é a inserção dos combustíveis renováveis na matriz energética dos países. Dentre estes, podemos citar o biodiesel que é produzido a partir da biomassa proveniente de óleos vegetais como mamona, girassol, algodão e a soja. O que se observa no início do século XXI é um aumento progressivo da produção de biodiesel no país promovido pelo governo federal brasileiro. O uso de Biodiesel pode permitir economia ao ser misturado com o diesel de petróleo mediante proporções BX, onde X refere-se à percentagem em volume do biodiesel ao qual é misturado ao diesel do petróleo. Assim, B1, B3 e B5 referem-se, por exemplo, respectivamente às misturas de biodiesel/diesel contendo 1, 3 e 5% de biodiesel. Nos mesmos moldes como acontece com a gasolina e o álcool.

O aparente sucesso do programa do Biodiesel, contudo, pode esconder um passivo ambiental incalculável, representado pela glicerina gerada durante o processamento do biodiesel, pois parte do excedente de glicerina tem sido incinerado em caldeiras de usinas no interior do país, o que pode resultar na emissão de gases poluentes perigosos com potencial poder cancerígeno. A poluição do solo e de cursos d'água com glicerina descartada irregularmente também é uma possibilidade real. Essas atitudes causam uma

grande preocupação por parte dos organismos de defesa ambiental; isso se torna ainda mais significativa, pois o Brasil não possui uma legislação específica para destinação correta da glicerina no meio ambiente (Mota, 2008).

As pesquisas em desenvolvimento estão buscando soluções para a glicerina, sendo que uma delas é o uso deste co-produto como combustível. A glicerina pode ser utilizada em equipamentos térmicos como fornos, caldeiras e queimadores, em permuta ao óleo combustível tradicional. Porém, a queima apresenta alguns problemas técnicos como alta viscosidade (dificultando o processo de atomização), alta temperatura de ignição e níveis de emissões altos (Metzger, 2007).

Visando obter dados conclusivos sobre a utilização da glicerina como combustível de baixo valor agregado, através da avaliação da eficiência pela 1ª lei termodinâmica e de emissões geradas, foi utilizado um queimador infravermelho de leito cerâmico macroporoso acoplado a um sistema semi-automático de controle e alimentação para realizar a queima conjunta de glicerina com gás liquefeito de petróleo (GLP).

A utilização conjunta do GLP permite que a glicerina seja queimada mais facilmente, pois o gás e o queimador infravermelho permitem que as temperaturas envolvidas na combustão cheguem a valores próximos dos 800 °C. Segundo Howell (1996), uma estrutura cerâmica de alta emissividade faz com que a mistura do comburente e do combustível seja pré-aquecida antes da zona de reação, promovendo um aumento na taxa de reação química, aumento da temperatura máxima na zona de reação, que pode chegar a valores próximos da temperatura adiabática de chama e menor emissão de poluentes.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Vlassov (2001) o queimador é um equipamento encarregado de processar a queima de uma mistura ar/combustível numa câmara de combustão. O combustível, seja ele sólido, líquido ou gasoso, somente apresenta uma boa combustão se forem criadas condições necessárias e adequadas. A construção desse equipamento depende de vários fatores como, por exemplo: consumo, pressões disponíveis para o combustível, pressão do ar na entrada do queimador, das temperaturas empregadas, entre outros.

A função do queimador é fazer com que o combustível e o oxidante fiquem em contato o tempo e a temperatura suficientes para ocorrer e completar a reação de combustão. Uma vez que a maioria das reações de combustão acontece na fase gasosa, o contato eficiente depende do tempo, da temperatura e da turbulência (Bizzo, 2008).

De acordo com Espinoza (2004) o queimador infravermelho é um equipamento em que a combustão desenvolve-se na saída da tela cerâmica refratária porosa, a chama produzida aquece a superfície da tela e o calor é transmitido principalmente por radiação infravermelha Figura (1).



Figura 1. Queimador infravermelho (Espinoza, 2004).

O queimador infravermelho oferece uma troca de calor através da radiação associada a um substancial volume de gases aquecidos. Ele é construído sob uma base metálica na qual um leito cerâmico fica inserido, nesse espaço é onde ocorre a reação de combustão.

Conforme Malico (1999) a combustão infravermelha envolve a estabilização de uma chama no interior de uma matriz cerâmica. À entrada do queimador, a fase sólida encontra-se a uma temperatura superior a dos reagentes gasosos já que é aquecida por radiação emitida pela matriz cerâmica para jusante. Como consequência, após entrarem na matriz cerâmica, o ar e o combustível pré-misturados são aquecidos por convecção à medida que atravessam os furos do leito cerâmico. O inverso ocorre na zona de combustão, onde a energia química do combustível é transformada em energia térmica. Nessa região a temperatura da fase gasosa é superior a da fase sólida, que é, portanto, aquecida por convecção.

Pelo exposto, a matriz cerâmica pode ser encarada como um trocador de calor que transfere para os reagentes uma fração energética química liberada pelo combustível/comburente. Devido a este mecanismo de *feedback* de energia dos produtos de combustão para os reagentes é possível queimar combustíveis de menor poder calorífico, com limites de inflamabilidade alargados, obtendo-se velocidades de chama superiores.

As outras vantagens da combustão no interior de matrizes cerâmicas estão relacionadas com as emissões de poluentes, já que embora as taxas de transferência de calor possam ser superiores, as temperaturas na zona de reação são relativamente baixas e a combustão muito eficiente o que conduz a baixos índices de emissão de NO_x e CO. (Malico, 1999)

Funcionamento de um queimador infravermelho

O processo de funcionamento de um queimador infravermelho ocorre da seguinte forma:

- I. Os gases entram no queimador a certa temperatura inicial e a medida que escoam, são aquecidos devido à troca de calor com a fase sólida. Existe então, um balanço entre os fluxos de calor através do meio e o fluxo convectivo carregado pela mistura.
- II. A certo ponto ocorre a ignição dos reagentes e o calor gerado pela reação química é balanceado pela convecção e radiação.
- III. Os produtos da reação escoam na direção da superfície de saída do queimador, aquecendo o leito cerâmico que, por sua vez, irradia e transporta calor para as regiões mais frias antes da chama.

O processo de transferência de calor se realiza pelo transporte de energia nas ondas eletromagnéticas infravermelhas por radiação e convecção.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta parte, serão apresentadas as metodologias utilizadas nos experimentos realizados no laboratório de energia da UFRN e a bancada experimental desenvolvida para testes do queimador infravermelho funcionando simultaneamente com GLP e glicerina.

Descrição da bancada experimental

A Figura (2) ilustra a bancada de testes utilizada juntamente com os equipamentos e instrumentos utilizados e suas respectivas localizações. A seguir a descrição da mesma:

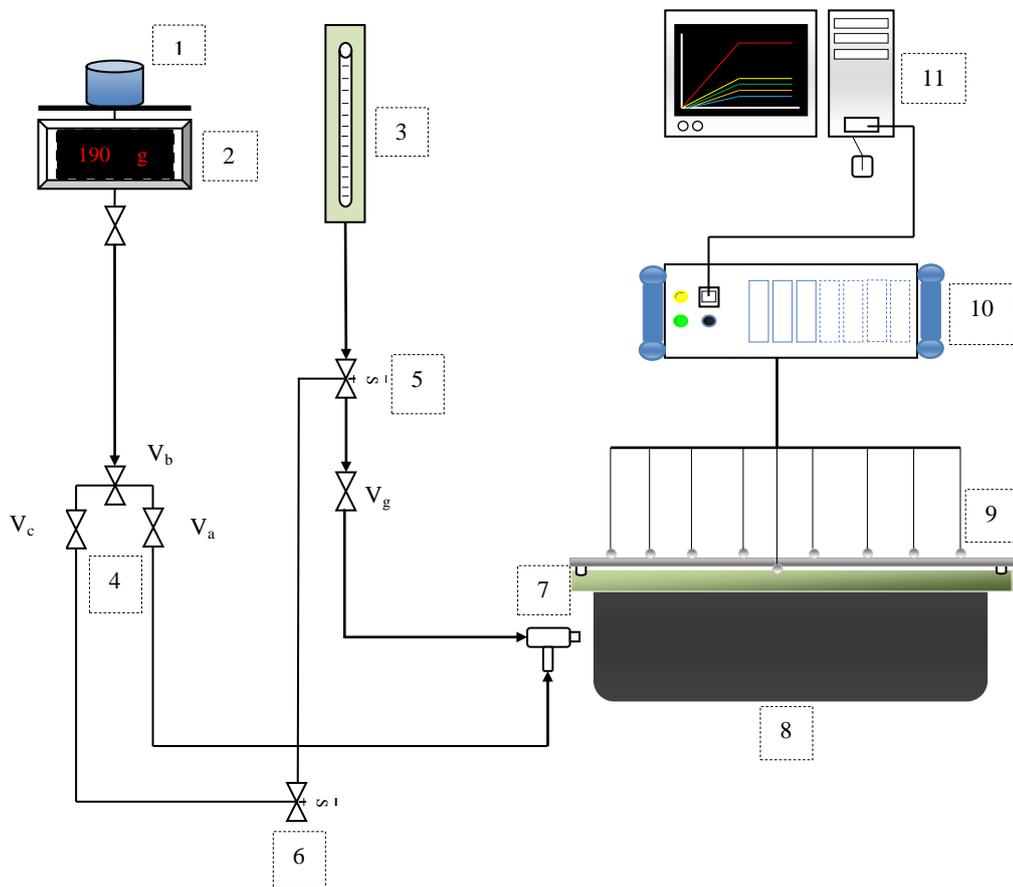


Figura 2. Diagrama esquemático da bancada de testes do queimador infravermelho.

Legenda:

1. Fonte de calor – Botijão de GLP 13 kg / cartucho de GLP de 190 g;
2. Balança digital de precisão para medição do consumo da ampola de GLP;
3. Coluna líquida de glicerina com alturas pré-definidas contendo uma pipeta calibrada instalada no topo dessa coluna para medição de consumo da mencionada substância;
4. Sistema de controle da chama do queimador – Manifold; Va - válvula do tipo agulha para fogo alto (vazão alta); Vb - válvula do tipo agulha para fogo baixo (vazão baixa); Vc - válvula reguladora (on-off).
5. Eletroválvula que atua no sistema de alimentação da glicerina;
6. Válvula solenóide que atua no sistema de alimentação de GLP
7. Bico Ejetor - equipamento responsável por misturar e inserir o GLP/glicerina na câmara de combustão do queimador;
8. Queimador infravermelho;

9. Termopares instalados em uma placa de alumínio (para dissipação de carga) localizada na saída dos gases de combustão para o mapeamento das temperaturas;
10. Sistema de aquisição de dados de temperatura - *Data logger da National Instruments*[®]
11. CPU - Microcomputador contendo software *VI Logger*[®] instalado para visualização e registro dos dados de temperatura.

O calor proveniente dos gases de saída do queimador infravermelho foi utilizado para aquecer uma placa de alumínio contendo termopares mediante monitoramento das temperaturas. Isso é realizado a partir de um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*[®] contendo o software *VI Logger*[®].

O consumo de combustível do queimador de infravermelho foi determinado através de uma pipeta calibrada para medição da vazão de glicerina e de uma balança digital com cartucho de gás de 190 g para medição da vazão de GLP.

Um sistema de monitoramento de temperatura foi empregado para acionar o controle automático para modulação de chama (alta e baixa) visando a proteção do conjunto contra altas temperaturas.

Além desses equipamentos, foi utilizado um analisador eletroquímico de gases com sensor localizado à jusante dos gases de combustão para realização das medições de concentração de compostos tóxicos emitidos pela queima conjunta.

Descrição dos ensaios

O teste era iniciado ligando-se o queimador infravermelho através de uma centelha no bico ejetor de entrada do GLP. Os gases de exaustão submetiam a placa de alumínio a uma irradiação térmica Figura (3).

Após alguns minutos a temperatura da placa de alumínio atingia 200°C. Nesse momento, as temperaturas nas placas cerâmicas que estavam dentro do queimador giravam ao redor dos 700°C. Essa temperatura garantia uma boa queima da glicerina e impedia, teoricamente, a formação de acroleína, que é uma substância gerada pela oxidação parcial da glicerina entre 250°C e 300°C.

Deste o momento da partida do queimador, o sistema de aquisição e registro *NI-DAQmx*[®] monitorava e armazenava as temperaturas a cada segundo na CPU. Através da tela do monitor, foi possível acompanhar o perfil gráfico “*em tempo real*” das temperaturas da placa de alumínio com seus pontos de medição estrategicamente posicionados, da temperatura dos gases de combustão e da temperatura ambiente.

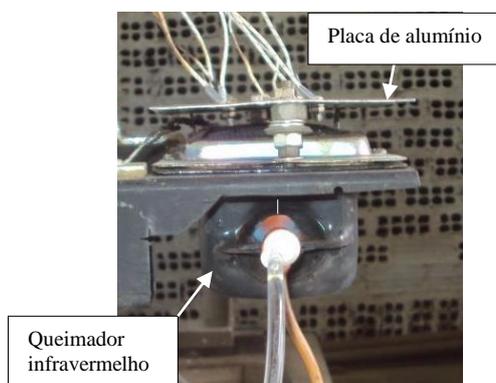


Figura 3. Queimador infravermelho em processo de combustão

Quando o sistema entrava em regime permanente, ou seja, quando não ocorria mais variação nas temperaturas produzidas durante o funcionamento do queimador, dava-se início as medições simultâneas de consumo de GLP (kg/s) e de glicerina (m³/s). Após as medições de consumo, realizavam-se as medições de emissão de gases poluentes.

É importante ressaltar que foi escolhida a glicerina bi-destilada por causa da falta de informações da composição química da glicerina advinda do processo de fabricação nas usinas de produção de biodiesel e pela falta de trabalhos técnico-científicos referentes às emissões de acroleína a partir de processos de combustão infravermelha envolvendo glicerina com GLP.

Por medida de segurança, foi utilizada a glicerina bi-destilada da *Mapric*[®] de composição e propriedades físico-químicas ratificadas através de um laudo de análise laboratorial.

Dados Calculados

O consumo de combustível pelo bico ejetor foi calculado através da equação (1) a seguir.

$$G = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot \rho_{ol} \cdot \Delta p} \quad (1)$$

onde:

G = consumo de combustível [kg/s]

μ = coeficiente de consumo [adimensional]

A = área de orifício na saída do bico [m²]

ρ_{ol} = densidade do combustível líquido [kg/m³]

Δp = queda da pressão no bico ejetor [Pa]

A queda de pressão no bico ejetor é igual a diferença das pressões na entrada e na câmara de combustão. Na prática, porém, a diferença de pressão é desconsiderada porque a pressão na câmara de combustão é quase igual à atmosférica, $P_{cam} = P_{atm}$.

O coeficiente de consumo μ é igual ao consumo real do combustível. Devido as perdas hidráulicas, o coeficiente de consumo sempre é menor que $\mu = 1$. Os principais fatores que influem sobre o valor de μ são: viscosidade do combustível que diminui a velocidade de escoamento; estreitamento do jato; geometria da câmara de combustão.

Sob viscosidade constante, o valor de coeficiente de consumo μ depende também muito da geometria do bico ejetor, em particular da razão do comprimento da parte cilíndrica pelo diâmetro do orifício. A área na saída do ejetor do combustível foi calculada pela equação (2) abaixo.

$$A_{ol} = \frac{G_{max}}{\mu \cdot \rho_c \cdot \omega_b} \quad (2)$$

onde:

A_{ol} = área na saída do bico de combustível [m²]

G_{max} = consumo máximo de combustível [kg/s]

μ = coeficiente de consumo [$\phi_b = 0,5$]

ρ_c = densidade do combustível [kg/m³]

ω_b = velocidade de escoamento do combustível no bico [m/s]

Realizou-se a medição da perda de massa do cartucho de 190 g, para cada ensaio, de cinco amostras de massa de gás no intervalo de tempo de dez minutos. A Equação (3) foi

utilizada para calcular a vazão em cada amostra. Calculou-se a média aritmética e o desvio padrão das cinco amostras realizadas. Obteve-se a variação da massa de gás durante a operação do queimador infravermelho: massa de gás inicial (m_{gi}) e massa de gás final (m_{gf}).

$$m_i = \frac{m_{gi} - m_{gf}}{t_{eg}} \quad (3)$$

onde:

m_i = vazão mássica de gás calculada para uma amostra [kg/s]

m_{gf} = massa final do gás [kg]

m_{gi} = massa inicial do gás [kg]

t_{eg} = tempo de escoamento do gás [s]

A vazão mássica média de gás e o desvio padrão foram calculadas através das equações (4) e (5), respectivamente.

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{\sum_{i=1}^5 \dot{m}_i}{5} \quad (4)$$

onde:

\dot{m}_{GLP} = vazão mássica de gás calculada para as cinco amostras [kg/s]

\dot{m}_i = vazão mássica de gás calculada para uma amostra [kg/s]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_a - 1} \sum_{i=1}^N (m_i - m_{GLP})^2} \quad (5)$$

onde:

σ = desvio padrão [kg/s]

N_a = número de amostras

m_i = vazão mássica de gás calculada para uma amostra [kg/s]

m_{GLP} = vazão mássica média de todas as amostras de gás [kg/s]

Realizou-se a medição da vazão da glicerina através da leitura em uma escala (em mL) presente na pipeta instalada no topo da coluna líquida. A leitura na escala consistiu em verificar o tempo de escoamento ao equivalente de 1 mL de glicerina consumida. Efetuaram-se cinco medidas no decorrer de dez minutos de operação do queimador. A equação (6) foi utilizada para calcular a vazão volumétrica conforme a altura estabelecida pela coluna líquida.

$$V_{vol-glic} = \frac{\delta V}{\delta t} \quad (6)$$

onde:

$V_{vol-glic}$ = vazão volumétrica da glicerina [m³/s]

δV = volume da glicerina [m³]

δt = tempo de escoamento do glicerina [s]

A vazão volumétrica média e o desvio padrão para a glicerina foram calculados conforme as equações (4) e (5).

Para efeito de cálculo da potência térmica do combustível *dual*, foi necessário transformar matematicamente, de acordo com a equação (7), a vazão volumétrica em vazão mássica.

Para isso, bastava ter o valor da massa específica da glicerina e das medidas de vazão da glicerina realizadas.

$$V_{mass-glic} = \frac{V_{vol-glic}}{m_{esp-glic}} \quad (7)$$

onde:

$V_{mass-glic}$ = vazão mássica da glicerina [kg/s]
 $V_{vol-glic}$ = vazão volumétrica da glicerina [m³/s]
 $m_{esp-glic}$ = massa específica da glicerina [kg/m³]

Na determinação da estimativa da potência térmica do combustível sem adição da glicerina, utilizou-se a equação (8), onde considerou-se a vazão mássica do gás e o poder calorífico inferior do GLP.

$$P_{c-GLP} = m_{GLP} \times PCI_{GLP} \quad (8)$$

onde:

P_{c-GLP} = estimativa da potência térmica do combustível sem adição de glicerina [W]
 m_{GLP} = vazão mássica média de todas as amostras de gás GLP [kg/s]
 PCI_{GLP} = poder calorífico inferior do GLP [kJ/kg]

Para o uso do combustível *dual*, foi preciso aplicar a conservação de massa no sistema, assim a vazão mássica total será igual a soma das vazões mássicas do GLP com a da glicerina, conforme apresentado na equação (9). Assim, para as porcentagens de 15%, 20% e 25% na adição da glicerina, ocorre um incremento no valor da vazão mássica total.

$$m_T = m_{GLP} + m_{\%glic} \quad (9)$$

onde:

m_T = vazão mássica total [kg/s]
 m_{GLP} = vazão mássica do gás GLP [kg/s]
 $m_{\%glic}$ = vazão mássica média da glicerina conforme o percentual adicionado [kg/s]

Considerando 1 kg de combustível *dual*, efetuou-se o cálculo do poder calorífico da mistura através da equação (10) que soma o poder calorífico do gás GLP proporcional na mistura com o poder calorífico da glicerina proporcional na mistura.

$$PCI_{dual} = \% \times PCI_{GLP} + \% \times PCI_{glicerina} \quad (10)$$

onde:

PCI_{dual} = poder calorífico inferior do combustível dual [kJ/kg]
 PCI_{GLP} = poder calorífico inferior do gás GLP [kJ/kg]
 PCI_{glic} = poder calorífico inferior da glicerina [kJ/kg]

Assim pode-se encontrar a potência térmica do combustível *dual* com as diferentes porcentagens de adição de glicerina, utilizando os resultados das equações (9) e (10), como mostrado na equação (11).

$$P_{c-GLP+\%glic} = m_T \times PCI_{dual} \quad (11)$$

onde:

$P_{c-GLP+\%glyc}$ = estimativa da potência térmica fornecida pelo combustível *dual* [W]

m_T = vazão mássica total [kg/s]

PCI_{dual} = poder calorífico inferior do combustível *dual* [kJ/kg]

Para a estimativa do calor transferido à placa de alumínio, foram feitas as seguintes considerações:

1. Condições em regime estacionário;
2. Transferência de calor por condução é desconsiderado devido as característica do queimador;
3. Fator de emissividade do leito cerâmico igual a 0,8^(a);
4. Área da superfície emissora igual 0,0358 m²;

Assim o calor transferido à placa de alumínio, pode ser calculada pela equação (12) que corresponde a soma do calor transferido por convecção e do calor transferido por irradiação.

$$P_t = q_{conv} + q_{rad} \quad (12)$$

onde:

P_t = estimativa do calor transferido a placa de alumínio [W]

q_{conv} = calor transferido por convecção [W]

q_{rad} = calor transferido por radiação [W]

Onde o calor transferido por convecção é dado pela equação (13) que expressa a relação entre o coeficiente convectivo h_c , a área da superfície da placa cerâmica emissora A e a diferença de temperatura dos gases de combustão T_{gases} (fonte emissora) e da placa de alumínio T_{placa} (fonte absorvedora).

$$q_{conv} = h_c \cdot A_t \cdot (\Delta t) \quad (13)$$

onde:

q_{conv} = fluxo de calor transferido por convecção [W]

A_t = área de transferência de calor [m²]

h_c = coeficiente médio de transferência de calor por convecção [W/m² K]

ΔT = diferença de temperatura entre os gases e a placa de alumínio [K]

O coeficiente convectivo teórico h_c pode ser calculado em função da massa da placa de alumínio m , do calor específico do alumínio c_p , da área da placa de alumínio A , do gradiente de temperatura entre as fontes emissora e absorvedora e da variação de temperatura da placa de alumínio em função do tempo $\partial T/\partial t$ (taxa de aquecimento) decorrido em cada ensaio. Considerando a placa de alumínio isotérmica e a perda radioativa desprezível, temos a estimativa do coeficiente convectivo teórico expresso pela equação (14).

$$h_c = \frac{m \times c_p}{A \times (T_{gases} - T_{placa})} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

onde:

h_c = coeficiente convectivo teórico [W/m².k]

c_p = calor específico do alumínio [997 J/kg.K, a 500K]

T_{gases} = temperatura dos gases de combustão [K]

T_{placa} = temperatura média da placa de alumínio [K]
 $\partial T/\partial t$ = taxa de aquecimento da placa de alumínio [K/s]

E o calor transferido por radiação é dado pela equação (15) que expressa a relação entre a fator de emissividade, a constante de Stefan-Boltzmann, a área da superfície da placa cerâmica emissora, a temperatura dos gases de combustão (fonte emissora) e a temperatura média da placa de alumínio (fonte absorvedora) elevadas a quarta potência.

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{gases}^4 - T_{placa}^4) \quad (15)$$

onde:

q_{rad} = fluxo de calor por irradiação [W]
 ε = emissividade, propriedade radiativa da superfície [$0 \leq \varepsilon \leq 1$]
 σ = constante de Stefan-Boltzmann [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$]
 A_{SR} = área da saída dos gases de combustão [m^2]
 T_{gases} = temperatura dos gases de combustão [K]
 T_{placa} = temperatura média da placa de alumínio [K]

O cálculo da eficiência do queimador infravermelho operando com o combustível *dual* foi obtido através da Equação (16).

$$\eta_t = P_t / P_{c\text{-GLP+}\% \text{glic.}} \quad (16)$$

onde:

η_t = eficiência de 1ª Lei (%)
 P_t = estimativa da potência térmica transferida a placa de alumínio [W]
 $P_{c\text{-GLP+}\% \text{glic.}}$ = estimativa da potência térmica do combustível *dual* [W]

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos serão apresentados nos ensaios do queimador infravermelho funcionando com GLP (ensaio 01), GLP + 15% glicerina (ensaio 02), GLP + 20% glicerina (ensaio 03) e GLP + 25% glicerina (ensaio 04).

Estes ensaios foram realizados com o auxílio do sistema de aquisição de dados, que registrou as temperaturas desde o momento da partida do queimador infravermelho até quando este equipamento entrava regime permanente.

Os ensaios experimentais foram realizados no Núcleo de Máquinas e Sistemas Térmicos do Laboratório de Energia da UFRN.

Temperaturas medidas

A tabela 1 ilustra os pontos de medição de temperatura elencados para verificação da energia transferida para a placa de alumínio.

Foram utilizados oito (8) termopares na superfície da placa para obtenção da temperatura média da mesma, um (1) termopar para medição da temperatura ambiente e outro termopar localizado na saída dos gases de combustão.

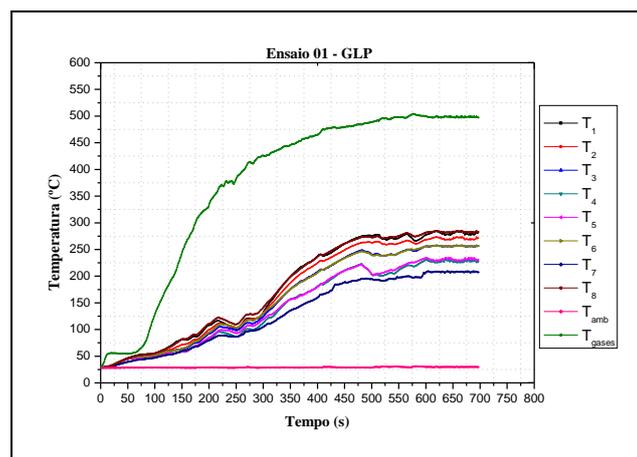
Tabela 1. Localização dos pontos de medição para coleta das temperaturas utilizando termopares.

Termopar	Ponto de medição
T ₁	Temperatura no ponto 1
T ₂	Temperatura no ponto 2
T ₃	Temperatura no ponto 3
T ₄	Temperatura no ponto 4
T ₅	Temperatura no ponto 5
T ₆	Temperatura no ponto 6
T ₇	Temperatura no ponto 7
T ₈	Temperatura no ponto 8
T _{amb}	Temperatura ambiente
T _{gases}	Temperatura de saída dos gases

As temperaturas registradas no sistema de aquisição de dados, ilustradas nos gráficos a seguir, mostram que a medida que se injetou mais glicerina no queimador infravermelho, as temperaturas ficaram maiores. O que se pode observar pelos gráficos obtidos é que a taxa de aquecimento da placa de alumínio aumentou em função do aumento da vazão do combustível dual. Verifica-se nos resultados que o queimador infravermelho não apresentou uma uniformidade de emissão de energia da sua superfície emissora, devido a um não-balanceamento das temperaturas produzidas (pontos com maior e menor intensidade térmica). A temperatura ambiente em todos os ensaios praticamente se manteve constante.

O ensaio 01, ilustrado na Figura (4), foi o que apresentou o menor gradiente de temperatura (entre a temperatura dos gases de combustão e a temperatura média da placa de alumínio) com valor igual a $\Delta T = 262,39^{\circ}\text{C}$.

O ensaio 04, ilustrado na Figura (7), apresentou o maior gradiente de temperatura com valor igual a $\Delta T = 277,82^{\circ}\text{C}$. Esse resultado demonstra que houve um acréscimo de 5,5% no valor nominal quando se comparado ao ensaio 01.

**Figura 4. Gráfico das temperaturas no ensaio 01 - GLP**

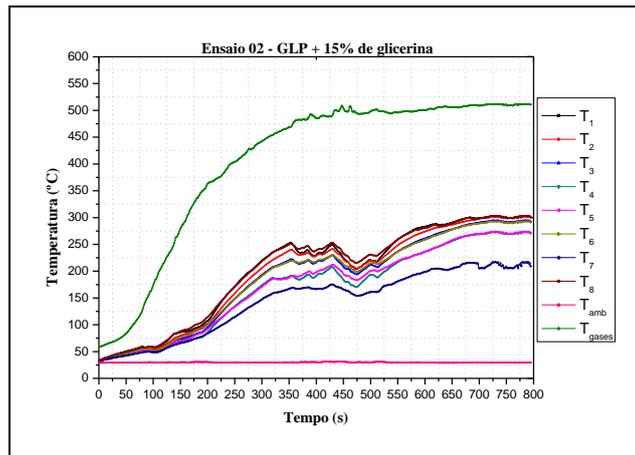


Figura 5. Gráfico das temperaturas no ensaio 02 – GLP+15% glicerina

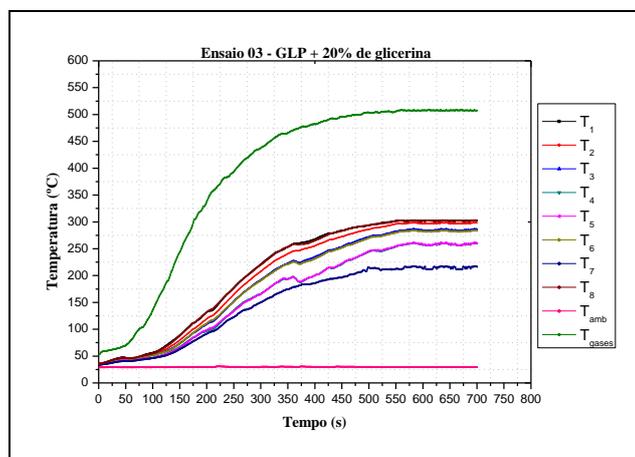


Figura 6. Gráfico das temperaturas no ensaio 03 – GLP+20% glicerina

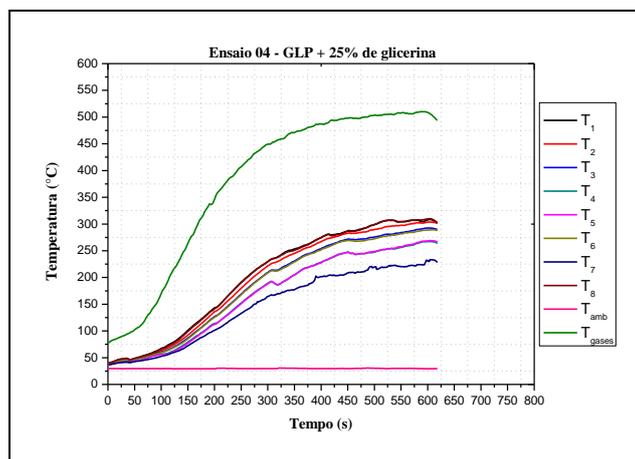


Figura 7. Gráfico das temperaturas no ensaio 04 – GLP+25% glicerina

Vazão de GLP e glicerina

A tabela 2 mostra os resultados das medições de consumo de combustível dual para cada ensaio realizado. Observa-se que, para todas as condições, não houve variação da vazão de GLP. Essa não-variação constatada pelas medições pode ter sido causada pela pouca precisão da balança utilizada para este fim, além da regulagem da chama de gás, através do

manifold, permanecer sempre a mesma. Essas medições de vazão foram realizadas quando o queimador entrava em regime. A vazão de glicerina aumentou em função do aumento da altura da coluna líquida proposta. Os resultados correspondem aos seus valores médios.

Tabela 2. Registro das vazões do combustível dual.

Parâmetro	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03	Ensaio 04	Condição
	Sem glicerina	+15% glicerina	+20% glicerina	+25% glicerina	
Vazão do GLP (kg/s)	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$	Regime permanente
Vazão da glicerina (kg/s)	-	$9,32 \cdot 10^{-6}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	
Vazão total (kg/s)	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$7,62 \cdot 10^{-5}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	

Estimativa das eficiências de 1ª Lei

A tabela 3 mostra os dados calculados para estimativa do desempenho do queimador infravermelho em função das condições estabelecidas nos ensaios experimentais. Como citado na metodologia, utilizou-se uma placa de alumínio para dissipação do calor produzido pelos gases de combustão e assim realizar uma compreensão analítica desse desempenho a partir das eficiências de 1ª Lei atingidas.

Verifica-se que o poder calorífico diminuiu em função do aumento percentual de glicerina adicionada na vazão mássica do combustível. Os coeficientes convectivos teóricos calculados praticamente se mantiveram constantes em todas as condições experimentais. Nos balanços de energia efetuados com o queimador infravermelho e a placa de alumínio foram considerados os seguintes aspectos: área da placa de alumínio = 0,0358 m², massa placa de alumínio = 0,12 kg e o calor específico do alumínio Cp (500 K) = 997 J/kg.K.

Tabela 3. Dados obtidos para estimativa das eficiências

Parâmetros	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03	Ensaio 04	Condições
	GLP	GLP + 15% glicerina	GLP + 20% glicerina	GLP + 25% glicerina	
Poder calorífico inferior (kJ/kg)^a	47.456,18	43.071,35	41.609,74	40.148,13	Regime permanente
Coef. Convectivo teórico h_c (W/m².K)	11,131	11,139	11,129	11,138	
Gradiente de temperatura ΔT (°C)	262,39	272,71	275,06	277,82	
Taxa de aquecimento da placa de alumínio $\partial T/\partial t$ (°C /s)	0,874	0,909	0,916	0,926	

A tabela 4 mostra os resultados obtidos dos valores referentes aos balanços de energia e as potências térmicas calculadas para estimativa das eficiências.

Tabela 4. Estimativa das eficiências

Parâmetros	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03	Ensaio 04	Condições
	GLP	GLP + 15% glicerina	GLP + 20% glicerina	GLP + 25% glicerina	
Potência térmica do combustível (kW)	3,000	3,127	3,173	3,219	Regime permanente
Balanco de energia (kW)	0,521	0,560	0,633	0,679	
Eficiência de 1ª Lei (%)	17,3	17,9	19,9	21,1	

Apesar dos valores de poder calorífico para o combustível ficarem menores a medida que se aumentava o percentual de glicerina na mistura, os valores estimados para a potência térmica se elevaram em função do aumento da vazão de combustível.

A potência térmica do combustível sem glicerina (ensaio 01) foi de 3,00 kW. No ensaio 02 a potência térmica teve um acréscimo de 4,1% se comparado ao valor do primeiro ensaio. No ensaio 03 obteve-se um incremento de 5,4% na potência térmica em relação ao ensaio 01. E finalmente no ensaio 04 o valor obtido foi 6,8% superior em relação ao ensaio sem glicerina.

As eficiências térmicas se elevaram em função do aumento da potência térmica do combustível conforme ilustrado na Figura (8).

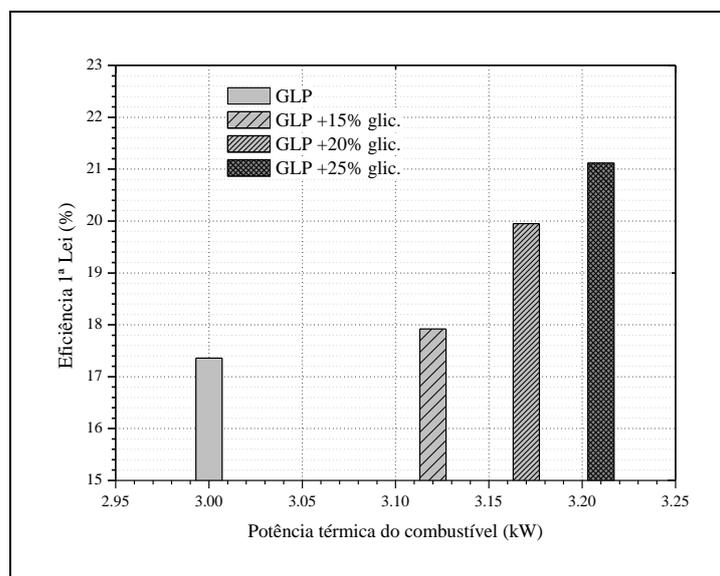


Figura 8. Eficiência de 1ª Lei (%) versus Potência térmica do combustível (kW)

As quantidades de calor transferido por convecção e radiação para a placa de alumínio (balanço de energia) aumentaram conforme o aumento da potência térmica do combustível,

isso acabou influenciando na elevação dos valores de eficiência do queimador infravermelho, conforme ilustrado na Figura (9).

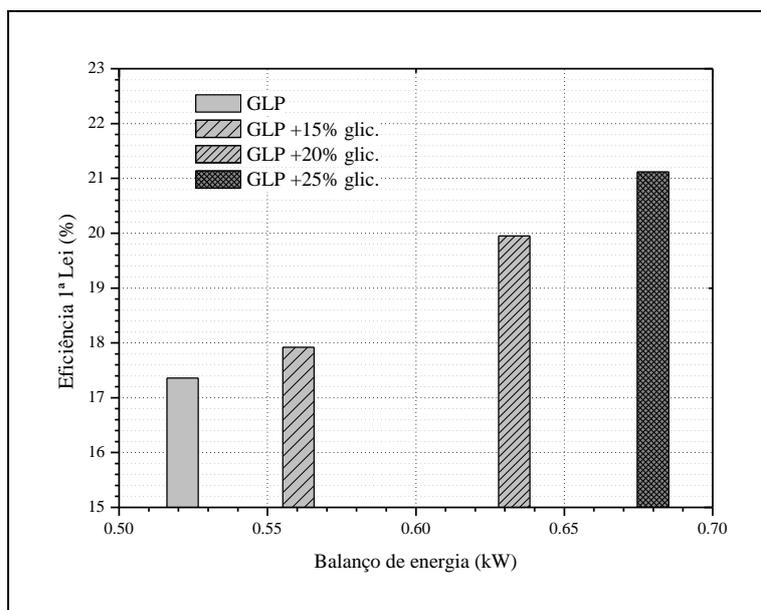


Figura 9. Eficiência 1ª Lei (%) versus balanço de energia (kW)

Emissões de gases poluentes

Monóxido de carbono

Em relação ao monóxido de carbono (CO), foi observada uma diferença gradual entre os ensaios realizados. Observa-se analiticamente pela tabela 5 a seguir que o queimador infravermelho apresentou valores de emissões de CO abaixo do que a legislação determina.

O único ensaio que apresentou problemas de emissões foi quando ocorreu o funcionamento do queimador com GLP + 25% de glicerina, onde a concentração de CO emitida foi de 90,20 mg/Nm³ e não poderia ter passado dos 80 mg/Nm³. O queimador infravermelho utilizado não operou com auxílio de um sistema de ventilação para controle do excesso de ar utilizado, e tendo somente o ar atmosférico disponível.

Tabela 5. Resultados referentes às emissões de CO

Monóxido de Carbono (CO)	Ensaio 01 (mg/Nm ³)	Ensaio 02 (mg/Nm ³)	Ensaio 03 (mg/Nm ³)	Ensaio 04 (mg/Nm ³)	Valor máximo CONAMA 382/2006 (mg/Nm ³)
1	66,72	72,10	72,17	91,70	80
2	57,72	67,86	78,99	78,43	
3	68,44	69,80	77,33	97,21	
4	65,38	76,92	77,03	91,91	
5	66,05	77,22	87,01	99,89	
6	73,31	82,67	72,42	82,10	
Média	66,27	74,47	77,49	90,20	

Óxido de nitrogênio

Em relação ao óxido de nitrogênio (NO_x), observa-se pela tabela 6, que os valores medidos pelo analisador de gases foram bem inferiores se comparados com as concentrações máximas estabelecidas pela resolução CONAMA.

A explicação mais plausível para o índice de NO_x ter sido tão baixo durante os ensaios foi devido a limitação de temperatura imposta pelo controlador do queimador infravermelho. Esse controlador cortava a alimentação do combustível dual quando a temperatura da placa de alumínio atingia uma temperatura pré-definida, exatamente no ponto quando o sistema operava em regime permanente.

Como se sabe, o aumento da concentração de NO_x em um processo de combustão está intimamente ligado com a temperatura da reação e a presença de nitrogênio no combustível dual utilizado (lembrando que a glicerina e o GLP são combustíveis isentos de compostos nitrogenados na sua estrutura molecular).

Apesar da não-presença de nitrogênio na composição molecular do combustível dual, sabe-se que pode ocorrer a formação de NO_x, já que o ar atmosférico contém nitrogênio em abundância e pode influir de maneira significativa na reação de combustão, principalmente quando a reação de combustão ocorre a temperaturas muito altas.

Tabela 6. Resultados referentes às emissões de NO_x

Óxido de Nitrogênio (NO _x)	Ensaio 01 (mg/Nm ³)	Ensaio 02 (mg/Nm ³)	Ensaio 03 (mg/Nm ³)	Ensaio 04 (mg/Nm ³)	Valor máximo CONAMA 382/2006 (mg/Nm ³)
1	22,51	21,92	23,41	21,90	320
2	22,33	23,44	23,62	23,63	
3	23,45	22,76	23,03	23,96	
4	23,47	22,58	23,94	23,49	
5	23,49	21,81	23,65	22,31	
6	22,52	23,03	22,56	23,14	
Média	22,94	22,55	23,37	23,07	

Verificou-se para todos os ensaios que os valores obtidos de NO_x não puderam ser correlacionados com a variação de combustível dual utilizado. Talvez se as temperaturas empregadas fossem maiores, os valores de NO_x seriam mais representativos para uma análise mais acurada e completa.

Dióxido de enxofre

Em relação ao dióxido de enxofre (SO₂), observa-se pela tabela 7 que há uma tendência de diminuição na concentração de SO₂ emitido pelo queimador infravermelho a medida que se introduzia mais glicerina na câmara de combustão. O ensaio 04 foi o que apresentou a menor concentração média, com valor igual a 137,22 mg/Nm³.

Tabela 7. Resultados referentes às emissões de SO₂

Dióxido de enxofre (SO ₂)	Ensaio 01 (mg/Nm ³)	Ensaio 02 (mg/Nm ³)	Ensaio 03 (mg/Nm ³)	Ensaio 04 (mg/Nm ³)	Valor máximo CONAMA 382/2006 (mg/Nm ³)
1	234,81	168,95	153,90	125,00	2700
2	211,91	160,84	154,69	122,52	
3	210,05	182,56	167,86	134,10	
4	217,47	192,78	172,02	127,22	
5	242,78	175,69	170,26	133,56	
6	235,66	173,80	152,38	128,70	
Média	225,45	175,77	161,85	137,22	

A estrutura cerâmica porosa utilizada pelo queimador infravermelho favoreceu uma maior oxidação das moléculas de enxofre, promovendo uma reação química do combustível dual mais eficiente.

O queimador infravermelho apresentou um resultado bastante satisfatório, pois as emissões apresentadas alcançaram níveis muito abaixo do que estipulado pela resolução CONAMA.

Do ponto de vista químico, as emissões de SO₂ foram baixas devido ao GLP possuir pouco enxofre em sua composição (devido à obrigatoriedade da adição de mercaptanas nas refinarias de petróleo para conferirem o odor característico desse produto) e a glicerina utilizada não conter enxofre em sua composição.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação às eficiências de 1ª Lei, verificou-se que o queimador infravermelho obteve seu melhor desempenho no ensaio tipo 04 (GLP + 25% de glicerina). Esse resultado pode ser explicado pelas potências térmicas obtidas pelo combustível dual, que tiveram seus valores aumentados em função do aumento percentual de glicerina. Apesar desse resultado positivo, sabe-se que maiores percentuais de glicerina poderiam resultar num declínio das eficiências, já que a dinâmica de combustão da glicerina líquida ocorre com mais dificuldade que a do GLP; além da glicerina apresentar um poder calórico menor que o GLP, podendo induzir um declínio no valor da potência térmica do combustível dual.

Em relação às emissões, o queimador infravermelho emitiu concentrações de poluentes (CO, SO₂ e NO_x) muito baixas se comparados com os valores máximos determinados pela resolução CONAMA nº 382/2006. O único valor acima do estabelecido foi em relação ao CO emitido quando o queimador funcionou com GLP + 25% de glicerina. Os outros ensaios para determinação do CO atenderam a resolução.

REFERÊNCIAS

ASTM E-230 (American Society for Testing and Materials); Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples, 2003.

BARCELLOS, W. M.; SOUZA, L. C. O.; FILHO, J. J. H.; BANANEIRA, E. L. Q.; BEZERRA, I. H. V.; Combustão do Gás Natural em Protótipo de Caldeira Não-Convencional de Queimador Poroso. 4º PDPETRO, 21-24 de Outubro de 2007, Campinas, SP.

BIZZO, W. A.; Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. Capítulo 3: Queimadores. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP3.pdf>> - coletado em 30/07/2008.

CARVALHO Jr., J. A.; LACAVALA, P. T.; Emissões em processos de combustão. Edit. Unesp, São Paulo, 2003.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente); Resolução nº382: Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Ministério do Meio Ambiente – República Federativa do Brasil, 2006.

ESPINOZA, F. R. M.; Ensaio para avaliar a potência nominal do protótipo de um queimador infravermelho de ar forçado da marca Etin. SENAI, Esteio/RS, 2004.

EPA (Environmental Protection Agency); Toxicological Review of Acrolein. CAS Nº 107-02-8, EPA/635/R-03/003, 2003.

GARCIA, Roberto.; Combustíveis e Combustão Industrial. Edit. Interciência, Brasil, 2002.

HOWELL, J. R.; Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. Prog. Energy Combustion Science, v. 22, p. 121-145, 1996.

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A. S.; Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6ª. edição, Edit. LTC, cap. 1, 2008.

MAHALLAWY, F. E.; HABIK, S. E.; Fundamentals and Technology of Combustion. Ed Elsevier Science Ltd, UK, 2002.

METZGER, Brian.; Glycerol Combustion. North Caroline University, USA, 2007.

MORAN, M. S.; SHAPIRO, H. N.; Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5ª Edição, Edit. John Wiley & Sons. New York, 2006.

NBR12313 - Sistema de combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura.

PETROBRÁS. Disponível em: <www.petrobras.com.br> Acesso em: Dez/2009.

VLAŠSOV, D.; Combustíveis, combustão e câmaras de combustão. Edit. UFPR, Curitiba, 2001.