



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

Marcello Araújo Dantas, marcello_1984@hotmail.com¹
Marcelo Dantas de Oliveira, mdoliveir@gmail.com¹
Francisco de Assis Oliveira Fontes, francisconfontes@uol.com.br¹
Cleiton Rubens Formiga Barbosa, cleiton@ufrnet.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Laboratório de Energia, NTI, S/N, Natal-RN

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 híbrida 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. 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 gás GLP, aumentando o fornecimento de calor para a placa. Conforme os dados obtidos, observou-se que houve uma melhora na eficiência de 1ª Lei do queimador infravermelho conforme o aumento de adição de glicerina.

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

1. INTRODUÇÃO

Para uma melhor análise das reações envolvidas na combustão, se faz necessário o estudo dos balanços de massa e térmico. No balanço de massa, o que se considera são as quantidades de ar e combustível necessários para a combustão ocorrer. No balanço térmico, são analisadas as quantidades de calor liberadas e perdidas, e as temperaturas envolvidas. O intuito da realização dos balanços é desenvolver uma mistura dos elementos da combustão de modo satisfatório, estável e sem agredir ao meio ambiente.

Visando obter dados conclusivos sobre a utilização da glicerina como combustível de baixo valor agregado, através da avaliação da eficiência termodinâmica, 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. Isso é explicado por Howell (1996), que disse que a inserção de 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.

Através do acoplamento de um sistema de aquisição de dados do tipo *field logger* para monitoramento das temperaturas e um sistema modulador de controle (fogo alto/fogo baixo), foi realizada pela 1ª lei da Termodinâmica a análise do desempenho de um queimador infravermelho operando com o combustível dual (GLP/glicerina). Para esta análise, foi utilizada uma placa de alumínio localizada à jusante dos gases de combustão como dissipador de carga da energia transferida (por convecção e radiação).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada nos experimentos realizada no núcleo de máquinas e sistemas térmicos do laboratório de energia da UFRN e o esquema resumido do queimador infravermelho funcionando a partir do combustível dual, objeto deste trabalho.

O calor proveniente dos gases de saída do queimador infravermelho, a partir da queima conjunta de GLP com glicerina, foi utilizado para aquecer uma placa metálica de alumínio contendo termopares para determinação posterior das potências e eficiências geradas pela combustão mediante monitoramento das temperaturas a partir de um sistema de aquisição de dados contendo um *software* específico. Foi utilizada uma pipeta calibrada para medição da vazão de glicerina e uma balança digital com cartucho de gás 190g para medição da vazão de gás GLP a fim de determinar e analisar o consumo de combustível total *dual*. Um sistema de monitoramento de temperatura foi empregado para acionar o controle automático para modulação de chama (alta e baixa) visando à proteção do conjunto contra altas temperaturas. A Fig. (1) ilustra o queimador infravermelho juntamente com os equipamentos e instrumentos utilizados durante os ensaios e suas respectivas localizações. A seguir a descrição dos mesmos:

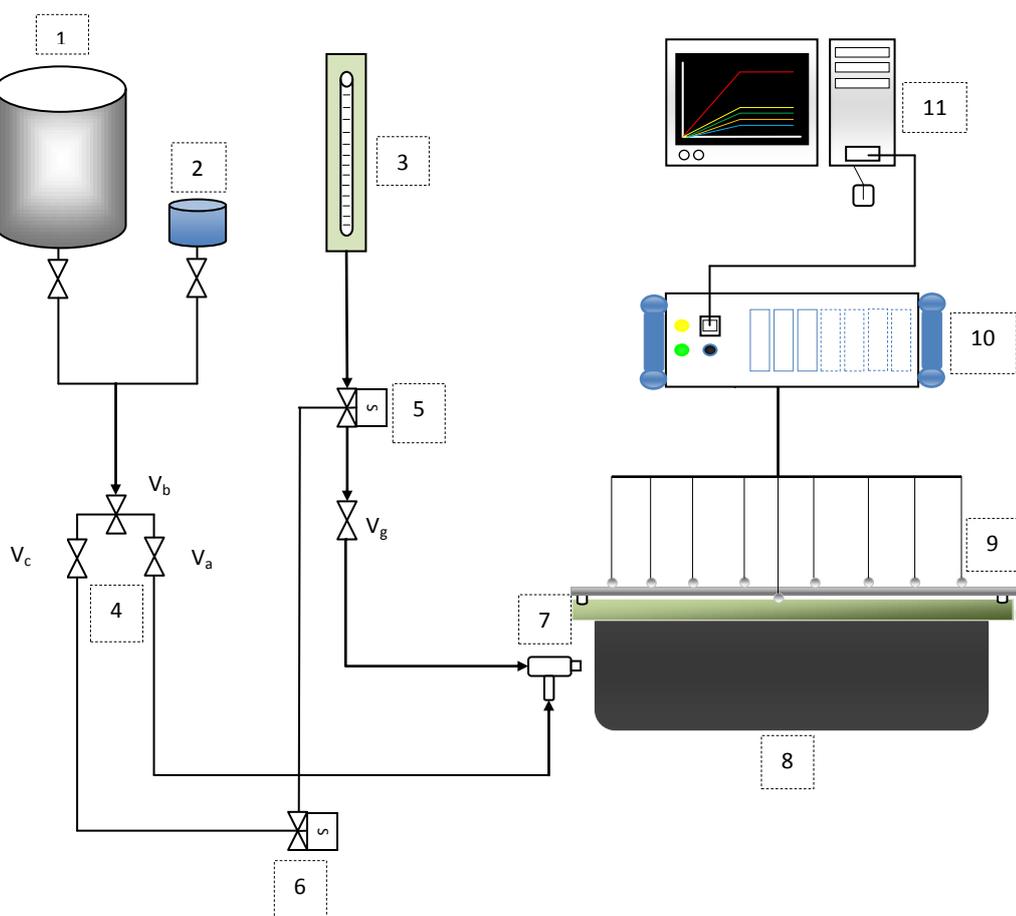


Figura 1. Esquema dos equipamentos utilizados para a realização da queima do combustível *dual*.

Legenda:

1. Fonte de calor - botijão de gás GLP comercial de 13 Kg;
2. Fonte de calor - ampola de gás GLP comercial de 190g utilizada para medição de consumo de gás;
3. Coluna líquida de glicerina com alturas pré-definidas (120cm, 140cm e 160 cm) em relação ao ejetor, 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. Válvula solenóide que atua no sistema de alimentação da glicerina;
6. Válvula solenóide que atua no sistema de alimentação de gás GLP
7. Ejetor - equipamento responsável por misturar e inserir o gás GLP/glicerina na câmara de combustão do queimador;

8. Queimador infravermelho;
9. Termopares instalados em placa de alumínio localizada na saída dos gases de combustão para o mapeamento do perfil térmico do queimador;
10. Sistema de aquisição de dados de temperatura - *Field logger*
11. CPU - Microcomputador contendo software *VI Logger*[®] instalado para visualização e registro dos dados de temperatura.

Foram seguidos procedimentos de segurança padrão, com o objetivo de prevenir algum tipo de incidente e garantir a integridade física do operador do ensaio em caso de ocorrer algum imprevisto.

A norma NBR 12313:2000 serviu de referência para o atendimento dos requisitos mínimos de sistemas de combustão, no que diz respeito à segurança para as condições de partida, operação e parada de equipamentos que utilizam gás. As medidas de segurança tomadas foram:

- Utilização de equipamentos de proteção individual (EPI): máscara contra gases de vapores orgânicos;
- Instalação de um extintor de incêndio específico para classe de incêndio B e C próximo à bancada experimental;
- Colocação do botijão de gás GLP em área apropriada e segura antes do início do ensaio;
- Aplicação de teste de estanqueidade para detecção de vazamento de gás GLP e glicerina em todo o sistema.

Após a conclusão da montagem da bancada experimental e a tomada dos procedimentos de segurança, inicia-se o teste de aquecimento do queimador infravermelho para avaliação do seu desempenho preliminar.

Num primeiro momento opta-se por trabalhar somente com gás GLP para verificação do perfeito estado dos instrumentos de medição e do sistema de bloqueio desse combustível. Num segundo momento, com o queimador infravermelho em funcionamento, abre-se a válvula manual da glicerina para permitir que esta substância seja pulverizada na câmara de combustão. Essa operação tem por objetivo a verificação da perfeita pulverização da glicerina efetuada pelo bico ejetor e do funcionamento do sistema de bloqueio da glicerina quando a temperatura na placa de alumínio atinge 250 °C.

Antes de dar início aos ensaios, foi estabelecido que a mudança da vazão de glicerina injetada no queimador seria em função da altura da coluna líquida de glicerina instalada na bancada experimental. Para cada altura estabelecida (120 cm, 140 cm e 160cm – em relação ao ejetor) haveria uma vazão diferente da glicerina. Quanto maior a altura, maior a vazão desse combustível.

O teste é iniciado ligando-se o queimador infravermelho através de uma centelha no bico ejetor de entrada do gás GLP. Os gases de exaustão submetem a placa de alumínio a uma irradiação térmica, conforme ilustrado na Fig. (2).

Após alguns minutos a temperatura da placa de alumínio atinge 200°C. Nesse momento, a temperatura nas placas cerâmicas que estão dentro do queimador gira ao redor dos 700°C. Essa temperatura garante que haja uma oxidação completa da glicerina e impede teoricamente a formação de acroleína (que é uma substância gerada pela oxidação parcial da glicerina aos 280°C).

Deste momento da centelha, o sistema de aquisição e registro *NI-DAQmx* monitora e armazena as temperaturas a cada segundo na CPU. Através da tela do monitor, é possível acompanhar o perfil gráfico “*in moment*” das temperaturas da placa de alumínio com seus oito (08) pontos de medição estrategicamente posicionados, hum (01) ponto da temperatura de saída dos gases de combustão e hum (01) ponto da temperatura ambiente.

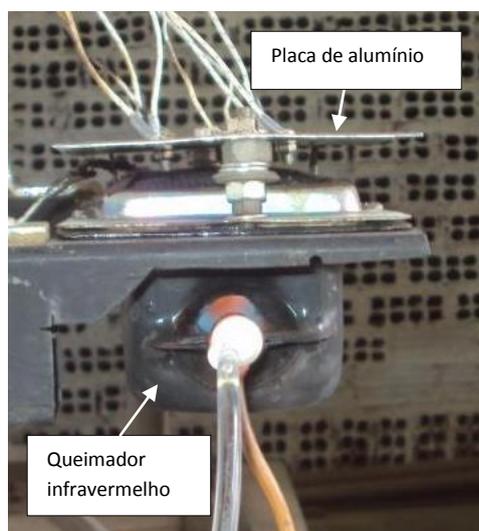


Figura 2. Queimador infravermelho em processo de combustão

Quando o sistema entrava em regime estacionário, dava-se o início das medições simultâneas de consumo de gás GLP (kg/min) e de consumo de glicerina (mL/min).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para realização da análise da eficiência energética η , faz-se necessário calcular a relação entre a fonte emissora e a fonte absorvedora, que são definidas, respectivamente, como a potência térmica do combustível P_c e a potência térmica transferida para a placa de alumínio P_u , como mostrado na Eq. (1).

$$\eta = \frac{P_u}{P_c} \times 100 \quad (1)$$

Desta forma, na determinação da potência térmica do combustível sem adição da glicerina P_{c-GLP} , utilizou-se a Eq. (2), onde considera-se a vazão mássica do gás m_{GLP} e o poder calorífico inferior do gás PCI_{GLP} .

$$P_{c-GLP} = m_{GLP} \times PCI_{GLP} \quad (2)$$

Já para o uso do combustível *dual* com adição de glicerina, é preciso aplicar a conservação de massa no sistema, assim a vazão mássica total m_T será igual a soma das vazões mássicas do GLP m_{GLP} com a da glicerina $m_{\%glicerina}$, conforme apresentado na Eq. (3). Assim para as porcentagens de 15%, 20% e 25% na adição da glicerina, ocorre um incremento no valor da vazão mássica total.

$$m_T = m_{GLP} + m_{\%glicerina} \quad (3)$$

Considerando 1 kg de combustível *dual*, efetuou-se o cálculo do poder calorífico da mistura PCI_{dual} através da Eq. (4) que soma o poder calorífico do gás PCI_{GLP} proporcional na mistura com o poder calorífico da glicerina $PCI_{glicerina}$ proporcional na mistura.

$$PCI_{dual} = \% \times PCI_{GLP} + \% \times PCI_{glicerina} \quad (4)$$

Assim pode-se encontrar a potência térmica do combustível *dual* com as diferentes porcentagem de adição de glicerina $P_{c-GLP+\%glicerina}$, utilizando os resultados das Eq (3) e Eq. (4), como mostrado na Eq. (5).

$$P_{c-GLP+\%glicerina} = m_T \times PCI_{dual} \quad (5)$$

Para a determinação da potência térmica transferida para a placa de alumínio, é essencial a definição de algumas considerações na modelagem da combustão e de como ocorre à transferência de calor no sistema definido conforme apresentado a seguir:

1. Condições de fluxo em regime permanente;
2. Transferência de calor por condução é desconsiderado devido as característica do queimador;
3. Fator de emissividade do leito cerâmico igual a 0,8;
4. Área da superfície emissora igual 0,0358 m²;
5. Os cálculos levam em consideração o calor da combustão transferido para a placa de alumínio.

Assim a potencia térmica transferida para a placa de alumínio P_u , pode ser calculada pela Eq (6). que corresponde a soma do calor transferido por convecção q_{conv} e do calor transferido por irradiação q_{rad} .

$$P_u = q_{conv} + q_{rad} \quad (6)$$

Onde o calor transferido por convecção é dado pela Eq. (7) que expressa a relação entre o coeficiente convectivo h_c , a área da superfície da placa cerâmica emissora A e o gradiente de temperatura entre de saída dos gases T_{gases} (fonte emissora) e da placa de alumínio T_{placa} (fonte absorvedora).

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_{gases} - T_{placa}) \cdot A \quad (7)$$

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 a 500 K, 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. Assim, a partir do balanço de energia, obteve-se a seguinte expressão representado na Eq. (8).

$$h_c = \frac{m \times c_p}{A \times (T_{gases} - T_{placa})} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

O calor transferido por irradiação é dado pela Eq. (9) que expressa a relação entre a fator de emissividade ε , a constante de Stefan-Boltzmann σ , a área da superfície da placa cerâmica emissora A e o gradiente de temperatura entre a saída dos gases T_{gases} e da placa de alumínio T_{placa} elevadas a quarta potência.

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{cer}^4 - T_{Al}^4) \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas registradas no sistema de aquisição de dados, ilustradas na fig. (3), mostraram que a medida que se injetava 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*.

Considerando a metodologia empregada e constatando que o poder calórico do combustível *dual* diminuiu com o aumento do percentual de glicerina adicionado, observou-se também que as temperaturas aumentaram com o aumento da inserção de combustível *dual*.

O ensaio 01 foi o que apresentou os menores gradientes 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 apresentou o maior transiente 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 do transiente de temperatura quando se compararam esses dois ensaios.

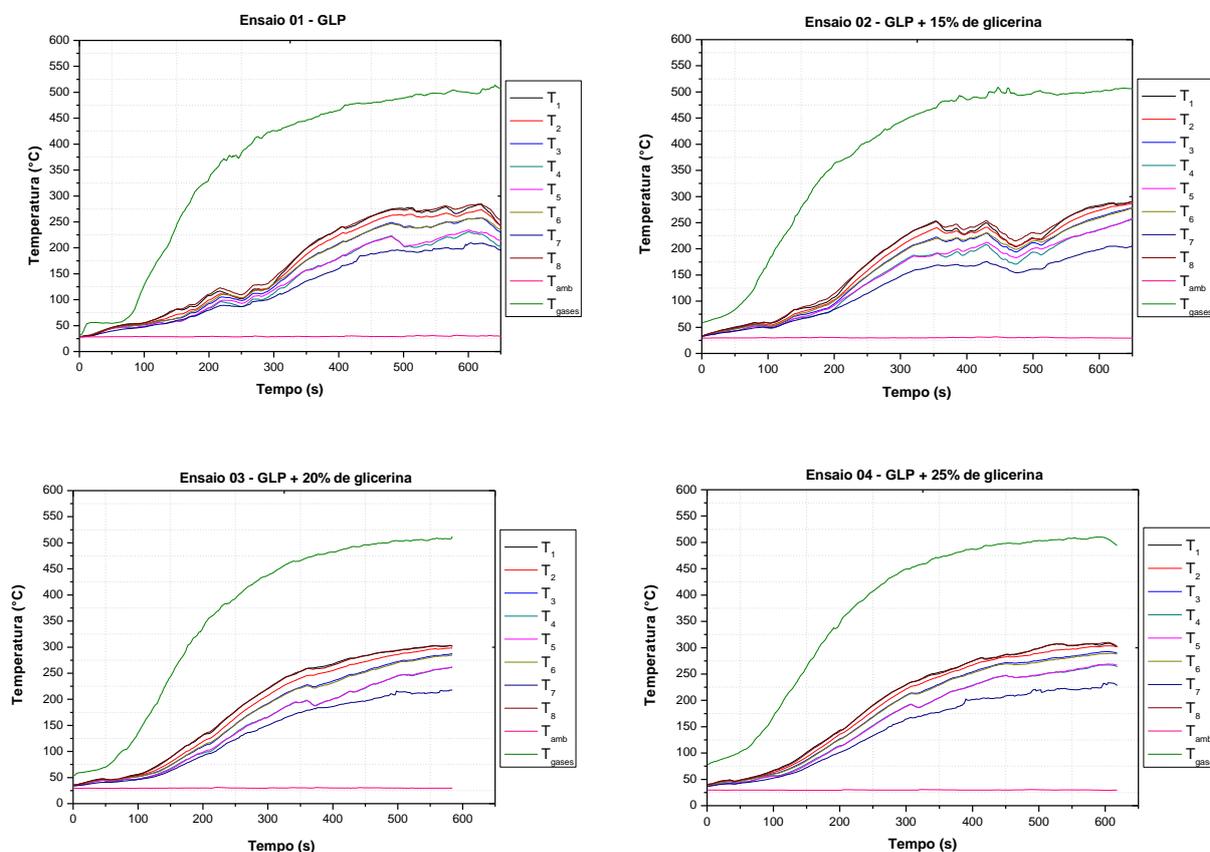


Figura 3. Gráficos dos transientes de temperatura

A tab. 1 ilustra o resultado das medições de consumo de combustível *dual* para cada ensaio realizado. Observa-se que para todas as condições não houve variação no consumo de gás GLP. A vazão da glicerina aumentou em função do aumento da altura da coluna líquida proposta.

Tabela 1. Registro das vazões do combustível *dual*.

Parâmetro	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03	Ensaio 04	Condições
	Sem glicerina	+15% glicerina	+20% glicerina	+25% glicerina	
Vazão do gás 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)	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$7,62 \cdot 10^{-5}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	

A tab. 2 mostra os valores 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.

Verifica-se que o poder calorífico diminui em função do aumento percentual de glicerina adicionada na vazão mássica do combustível *dual*. Os coeficientes convectivos teóricos calculados praticamente se mantiveram constantes em todas as condições. A taxa de aquecimento da placa corresponde do momento do início do funcionamento do queimador até quando o sistema entra em regime permanente.

Tabela 2. Valores calculados para a análise do desempenho do queimador infravermelho

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
Área placa de alumínio (m ²)	0,0358	0,0358	0,0358	0,0358	
Massa placa de alumínio (kg)	0,12	0,12	0,12	0,12	
Calor específico do alumínio C _p a 500K (J/kg.K)	997	997	997	997	
Coefficiente convectivo h _c (W/m ² .K)	11,131	11,139	11,129	11,138	
Gradiente de temperatura ΔT (K)	262,39	272,71	275,06	277,82	
Taxa de aquecimento da placa de alumínio ∂T/∂t (K/s)	0,874	0,909	0,916	0,926	

^a Considerando 1 kg de combustível

A potência térmica do combustível sem glicerina obtida foi de 3,00 kW, conforme ilustrado na fig. (4). Quando se introduziu glicerina para o ensaio 02, na razão mássica de gás GLP, a potência térmica saltou para 3,127 kW, ou seja, um acréscimo de 4,1% na potência térmica. No ensaio 03, obteve-se o valor 3,173 kW, resultando em um incremento de 5,4% na potência térmica em relação ao ensaio 01. Para o ensaio 04, o valor obtido foi de 3,219 kW, resultando num acréscimo de potência de 6,8% em relação ao ensaio 01.

De uma forma geral, observou-se um aumento da potência térmica do combustível *dual*, em função do aumento da vazão da glicerina.

As eficiências térmicas se elevaram em função do aumento da potência térmica do combustível *dual* conforme ilustrado na fig. (4). Essa melhora da eficiência foi mais acentuada a partir do ensaio 02.

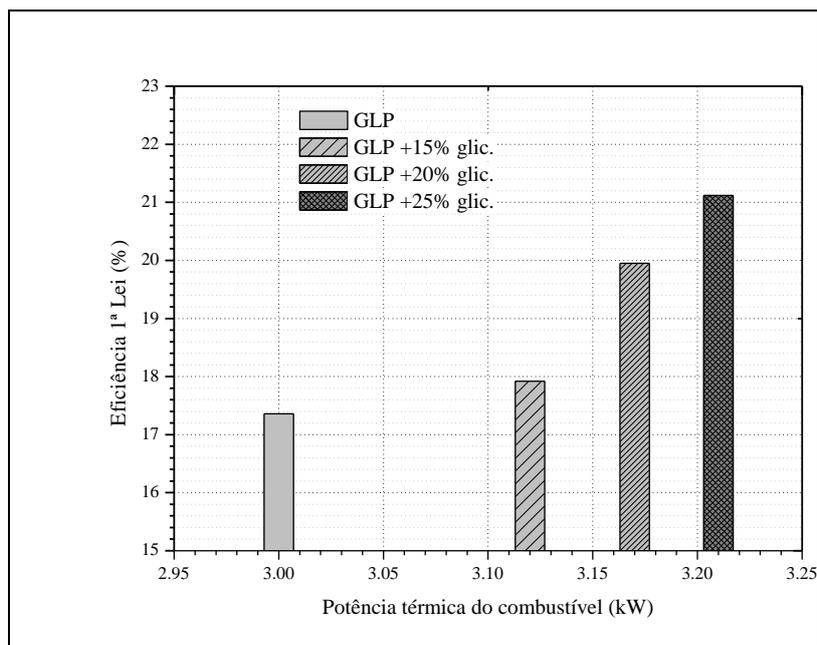


Figura 4. Eficiência térmica (%) vs Potência térmica (kW)

Considerando as mesmas eficiências da figura anterior, observou-se que o valor obtido para o balanço de energia (calor transferido por convecção e radiação para a placa de alumínio) aumentou conforme o aumento da vazão de combustível *dual*.

Isso pode ser explicado, porque esse aumento da vazão de combustível *dual* provocou um aumento da taxa de aquecimento e do gradiente de temperatura entre a placa de alumínio e os gases de combustão, conforme ilustrado na fig. (5) e na tab. 2, porém esse aumento da eficiência se comportou de uma forma mais linear quando comparado com a potência térmica do combustível *dual*.

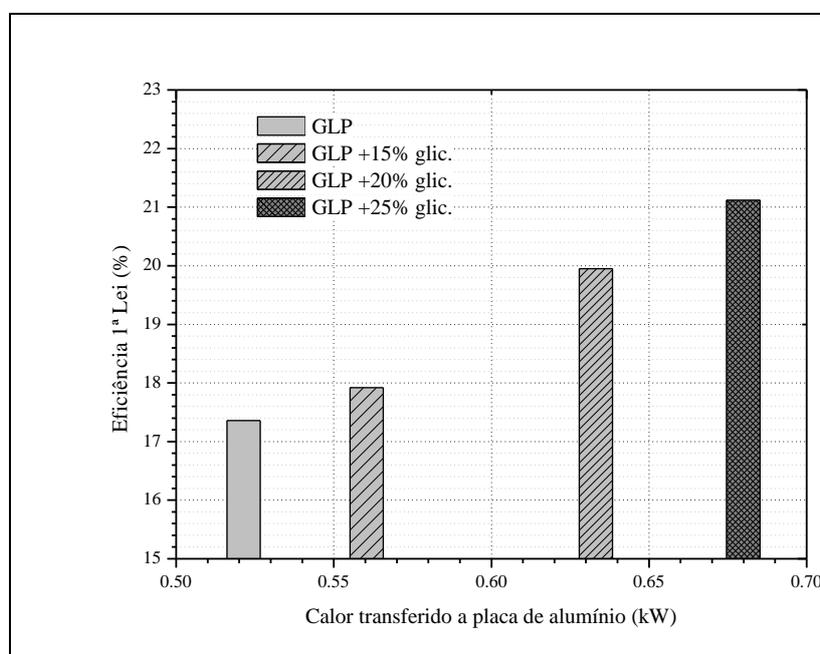


Figura 5. Eficiência térmica (%) vs Potência útil (kW)

5. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que as eficiências do queimador infravermelho no ensaio 01 foi de 17,36%, para o ensaio 02 foi 17,92%, para o ensaio 03 foi 19,95% e finalmente para o ensaio 04 foi 21,12%.

Esses resultados, considerando a metodologia adotada, nos levam a considerar que a glicerina adicionada melhorou o desempenho do queimador infravermelho. Apesar dessa melhora, sabe-se que maiores percentuais de glicerina tornariam o desempenho do queimador mais ineficiente, devido a dinâmica de combustão dos líquidos ser mais difícil em relação aos gases.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UFRN, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo e Gás Natural (PPGCEP) e a FINEP/PRH-ANP 14 pela bolsa concedida a Marcello Araújo Dantas.

7. REFERÊNCIAS

- Garcia, Roberto. *Combustíveis e Combustão Industrial*. Ed. Interciência, Brasil, 2002.
- Mahallawy, Fawzy El; Habik, Saad El-Din; *Fundamentals and Technology of Combustion*. Ed Elsevier Science Ltd, UK, 2002
- Moran & Shapiro. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5º edition, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- Metzger, Brian. *Glycerol Combustion*. North Caroline University, USA, 2007.
- Wylen, Gordon Van; et al. *Fundamentos de Termodinâmica Clássica*. 4 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 589 p.
- Vlassov, Dmitri. *Combustíveis, combustão e câmaras de combustão*. Ed. UFPR, Curitiba, 2001.
- NBR12313 - *Sistema de combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura*.
- Malico, I.; *Modelação de Queimadores Porosos para Aquecimento Doméstico*. Universidade de Évora, Departamento de Física, 2001.
- ASTM E-230 (American Society for Testing and Materials); *Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples*, 2003.
- 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.
- Espinoza, F. R. M.; *Ensaio para avaliar a potência nominal do protótipo de um queimador infravermelho de ar forçado da Etin*. SENAI, Esteio/RS, 2004.
- Guo, B.; Ghalambor, A.; *Natural Gas Engineers Handbook*. Edit. GPC, Louisiana, Texas; USA, 2005.
- 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.

ABSTRACT

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

Marcello Araújo Dantas, marcello_1984@hotmail.com¹

Marcelo Dantas de Oliveira, mdoliveir@gmail.com¹

Francisco de Assis Oliveira Fontes, franciscofontes@uol.com.br¹

Cleiton Rubens Formiga Barbosa, cleiton@ufrnet.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Laboratório de Energia, NTI, S/N, Natal-RN

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 hybrid 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. 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.

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