

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIOGRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR DE PRÉ-MISTURA PARA QUEIMA  
DE MISTURAS POBRES EM COMBUSTÍVEL

por

Tomás Eichholz Hartfelder

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012.

DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR DE PRÉ-MISTURA PARA QUEIMA  
DE MISTURAS POBRES EM COMBUSTÍVEL

por

Tomás Eichholz Hartfelder

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

M. Eng. Cristiano Frandalozo Maidana

Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2011.

Hartfelder, T. E. DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR DE PRÉ-MISTURA PARA QUEIMA DE MISTURAS POBRES EM COMBUSTÍVEL. 2012. 18folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

O presente trabalho consiste no projeto e teste de um novo queimador para um calorímetro tipo Junkers, com o intuito de possibilitar a determinação dos poderes caloríficos Superior e inferior de combustíveis gasosos pobres. Inicialmente foram verificadas as condições de operação do calorímetro, e confeccionada uma bancada para testes, seguido da construção e instalação do novo queimador. Verificou-se a faixa de funcionamento desse queimador com uma mistura metano/ar. A partir da análise das variações das temperaturas da água de refrigeração, da massa de gás queimado e da massa de água proveniente da combustão que condensou durante os testes, foi calculado um valor experimental para o poder calorífico do gás metano, comparado então com o valor da literatura, buscando validar o novo formato de queimador instalado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poder calorífico, queimador, combustíveis gasosos pobres, calorímetro.

## **ABSTRACT**

This work consists in the design and test of a new burner for a Junkers calorimeter, in order to enable the determination of the higher and lower heating values considering lean gases. Firstly the operational conditions of the calorimeter were verified, and a test bench was assembled, followed by the construction and installation of the new burner. The working range of the new burner was verified, using a methane/air mixture. By the analysis of the variations of the cooling water temperatures, the mass of burnt gas and the mass of water condensed from the combustion during the tests, we calculate an experimental value for the heating value of methane, then compared it with literature's value from the order to validate the new burner.

**KEYWORDS:** Heating value, burner, lean gases, calorimeter.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 Combustão.....	2
3.2 Poder calorífico.....	3
3.3 Calorímetro.....	3
4. METODOLOGIA .....	5
4.1 Queimador.....	5
4.2 Bancada.....	6
4.3 Procedimento experimental.....	8
4.4 Avaliação das incertezas .....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
6. CONCLUSÕES.....	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	12
ANEXO I.....	14

## 1. INTRODUÇÃO

A combustão é o principal processo de produção de energia utilizado atualmente, sendo mais de 70 % de toda energia produzida no mundo proveniente da queima de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos [World Energy Outlook, 2011]. Dada a escassez natural de recursos, e a crescente preocupação com a redução das emissões de poluentes, é imperativa a busca por um incremento constante na eficiência da combustão, o que só pode ser atingido através da crescente compreensão de como ocorre a queima dos combustíveis em suas diversas aplicações.

Em uma época de grande consciência ambiental e em que o custo da energia se eleva é natural a idéia do aproveitamento de toda fonte de energia. O interesse na utilização de gases pobres, outrora considerados rejeito, tem aumentando consideravelmente devido à possibilidade de serem obtidos em diversas fontes, sendo a mais notória a do Biogás, que pode ser extraído de lixões ou biodigestores, e outras fontes como: gaseificação de biomassa, síntese de carvão mineral, coqueria, biodigestão de esgoto, entre outras. Vale destacar que a combustão do metano, apesar de liberar dióxido de carbono na atmosfera, é menos danosa ao meio ambiente que sua liberação direta, pois ele contribui de forma ainda mais expressiva para o efeito estufa [Wuebbles e Hayhoe, 2002].

Para o melhor aproveitamento de um combustível é essencial quantificar suas características, para a geração, o transporte, o armazenamento e o projeto de queimadores e fornos, sendo a energia liberada durante a queima, um fator determinante na sua aplicação. Para denominar a energia de determinado gás utiliza-se o termo poder calorífico, que consiste na energia por unidade de massa que é liberada na oxidação de um determinado combustível.

Nesse contexto o poder calorífico é uma característica fundamental dos gases pobres, pois permite o cálculo da quantidade de combustível necessária para gerar uma determinada quantidade de calor, possibilitando a comparação dos custos do processo e dos poluentes emitidos para diferentes combustíveis.

Neste contexto é apresentado o desenvolvimento de um queimador para combustíveis de misturas pobres em combustível. A estabilização de chama de misturas pobres apresenta as mesmas dificuldades que da estabilização de chamas de combustíveis de baixo poder calorífico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é construir e testar um queimador para misturas pobres em combustível visando a utilização na caracterização de combustíveis de baixo poder calorífico.

### 2.2 Objetivos específicos

- Construir um queimador.
- Medir o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) de dois gases conhecidos.
- Medir a relação mássica de ar/combustível suportada no queimador.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Combustão

Em condições de pressão ou volume constante, a variação de energia resultante de uma reação química depende apenas do estado inicial e do estado final do sistema. Quando os produtos e reagentes estão no mesmo estado de referencia a primeira lei da termodinâmica permite dizer que a energia liberada na reação química é igual a variação de entalpia da mistura. A entalpia de combustão por unidade de massa de mistura, ou entalpia específica é dada por:

$$\Delta h_R(T) = h_{\text{prod}}(T) - h_{\text{reag}}(T) \quad (3.1)$$

onde  $\Delta h_R$  é entalpia de combustão por unidade de massa de mistura,  $h_{\text{prod}}$  entalpia de combustão por unidade de massa dos produtos,  $h_{\text{reag}}$  é a entalpia de combustão por unidade de massa de mistura e T é a temperatura.

Segundo Coelho e Costa 2002, numa combustão o número total de átomos permanece constante e o combustível é geralmente um hidrocarboneto, o oxidante mais comum é o ar que pode ser aproximado por uma mistura ideal com 21% de O<sub>2</sub> e 79% de N<sub>2</sub>. Uma mistura designa-se estequiométrica quando a quantidade de oxidante é suficiente para queimar completamente todo o combustível num processo de combustão ideal, pelo que a reação estequiométrica para queima do metano pode se escrever do seguinte modo:



Assumindo a composição do GLP como 70% Propano e 30%Butano.



Portanto, para uma queima completa de metano, deve ser fornecido o dobro de moléculas de oxigênio, ou 9,52 vezes sua quantidade em ar. No estudo em questão utiliza-se chama pobre, ou seja, com comburente em excesso. Parte da energia gerada é absorvida pelos gases não queimados que são expelidos numa temperatura mais alta que a ambiente.

A razão estequiométrica é definida como a razão de oxigênio e combustível em uma reação. Uma mistura com razão estequiométrica maior que um, ou seja, mais oxidante que o necessário para queimar o combustível é considerada uma mistura pobre enquanto uma mistura com razão estequiométrica menor que um é rica. A velocidade de chama depende fortemente da proporção da mistura e é máxima em uma mistura levemente rica.

Quando uma mistura combustível/oxigênio flui por um queimador aceso seu comportamento varia dependendo da magnitude da velocidade dos gases em relação a velocidade adiabática de chama. Se a velocidade do escoamento é maior que a velocidade adiabática de chama, essa tende a ser assoprada do queimador “blow off”, pois a chama não é capaz de consumir a mistura rápido o suficiente para permanecer no queimador. Se a velocidade de escoamento é menor que a velocidade de chama, essa tende a se aproximar do queimador e começa a perder calor para ele. Devido a perda de calor e decréscimo de temperatura, a reação é desacelerada e existe uma situação de equilíbrio, quando a chama estabiliza na mesma posição. Quando a velocidade dos gases é muito baixa a chama pode perder tanto calor para o queimador que a reação não se sustenta, e se extingue, ou ainda pode ocorrer a entrada da chama no queimador “flash back”. Situações como extinção da chama, “blow off” e “flash back” claramente devem ser evitadas nos queimadores. Como

podemos ver a taxa de mistura é um parâmetro importante no comportamento da chama [Bosschaart, K.J. 2002].

### 3.2 Poder calorífico

O poder calorífico consiste na energia por unidade de massa que é liberada na oxidação de um determinado combustível. Devido ao fato de combustíveis que contém Hidrogênio em sua composição liberarem vapor de água durante sua queima, foram estabelecidos os termos Poder calorífico superior e poder calorífico inferior, segundo Coelho, P. 2002, a diferença entre o poder calorífico superior e inferior é o produto da massa de água ( fase líquida ou gasosa) nos produtos de combustão, por unidade de massa do combustível, pelo calor latente de vaporização , ou seja, o primeiro é dado pela soma da energia liberada na forma de calor durante a queima e da energia liberada pelo vapor da água ao ser condensado, e o segundo apenas a energia térmica liberada durante a queima do combustível. Portanto, o valor do PCS é sempre igual ou superior ao PCI.

### 3.3 Calorímetro

O calorímetro é uma ferramenta utilizada para mensurar experimentalmente a energia térmica trocada numa mudança de estado de um sistema, podendo esta mudança consistir numa mudança de fase, de temperatura, de pressão, de volume ou de composição química, sendo a última a estudada neste trabalho.

Para combustíveis gasosos pode ser utilizado o calorímetro tipo Junkers, que consiste num vaso tubular vertical, dentro do qual o gás é queimado em um bico de Bunsen e os produtos de combustão passam através do tubo e descem pelo espaço anular, saindo para o ambiente. Desta forma, a energia térmica dos gases é transferida para o fluido de resfriamento (geralmente água) que circula numa vazão conhecida pela camisa que circunda a câmara de combustão, e pela mudança de suas propriedades medidas no calorímetro correlaciona-se à troca térmica. [F. J. BRISLEE, 1912]

A figura 3.1 representa o diagrama de calorímetro modelo Junkers.

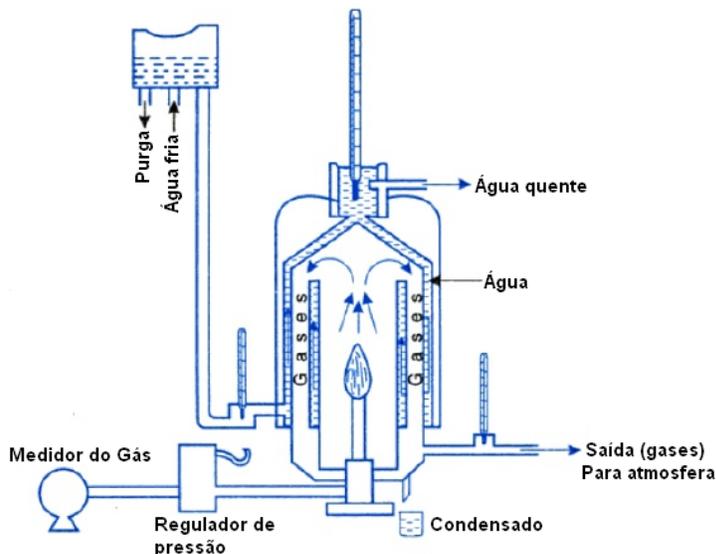


Figura 3.1 –Diagrama de calorímetro modelo Junkers (adaptado de Brislee, 1912).

Analisando o comportamento das temperaturas do calorímetro, pela primeira lei da termodinâmica, considerando o calorímetro como o volume de controle:

$$\sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (3.4)$$

onde  $\dot{m}_e$  representa a vazão mássica que entra no volume de controle,  $\dot{m}_s$  a vazão em massa que sai do volume de controle,  $h_e$  a entalpia de entrada e  $h_s$  a entalpia de saída do volume de controle.

Portanto,

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{Q}_{agua} + \dot{Q}_{ar} - \dot{Q}_{cond} \quad (3.5)$$

onde  $\dot{Q}_{gas}$  representa a taxa de energia térmica cedida pela queima do gás,  $\dot{Q}_{ar}$  e  $\dot{Q}_{agua}$  representam a energia térmica absorvida em função do tempo pelo ar e água que de entrada no calorímetro, respectivamente e  $\dot{Q}_{cond}$  representa a potência térmica absorvida pela água proveniente da combustão ao condensar no calorímetro.

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{m}_{agua} \times c_{p,agua} \times \Delta T_{agua} + \dot{m}_{ar} \times c_{p,ar} \times \Delta T_{ar} - \dot{m}_{cond} \times L_{agua} \quad (3.6)$$

onde  $\dot{m}_{agua}$ ,  $\dot{m}_{ar}$  e  $\dot{m}_{cond}$  representam as vazões mássicas da água de refrigeração, do ar e da água de condensação,  $\Delta T_{agua}$  e  $\Delta T_{ar}$  representam as variações de temperatura da água de refrigeração e do ar  $c_{p,agua}$  é o calor específico da água,  $c_{p,ar}$  o calor específico do ar e  $L_{agua}$  o calor latente de condensação da água.

O poder calorífico superior do combustível é obtido considerando toda a energia entregue aos fluídos de trabalho (Equação 3.7). O poder calorífico inferior considera o vapor de água não condensado nos produtos.

$$PCS_{gas} = \frac{\dot{m}_{agua} \times c_{p,agua} \times \Delta T_{agua} + \dot{m}_{ar} \times c_{p,ar} \times \Delta T_{ar} + \dot{m}_{cond} \times L_{agua}}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.7)$$

$$PCI_{gas} = \frac{\dot{m}_{agua} \times c_{p,agua} \times \Delta T_{agua} + \dot{m}_{ar} \times c_{p,ar} \times \Delta T_{ar}}{\dot{m}_{gas}} \quad (3.8)$$

onde  $\dot{m}_{gas}$  representa a vazão mássica de gás,  $PCS_{gas}$  seu poder calorífico superior e  $PCI_{gas}$  seu poder calorífico inferior.

Portanto, a determinação do poder calorífico requer a medição das vazões e temperaturas de ar e água alimentados no calorímetro, bem como a vazão de combustível, além da temperatura de saída da água e dos produtos da combustão, e ainda o volume de água condensada.

## 4.METODOLOGIA

### 4.1 Queimador

Inicialmente foi construído um novo queimador, que permitisse controlar a entrada de ar no calorímetro, garantindo a queima completa do combustível adicionado e permitindo a queima de maior quantidade de gás, conseqüentemente permitindo que a queima de gases mais pobres gere uma diferença de temperatura perceptível na água que escoar através do trocador de calor. A figura 4.1 representa um desenho esquemático do queimador desenvolvido.

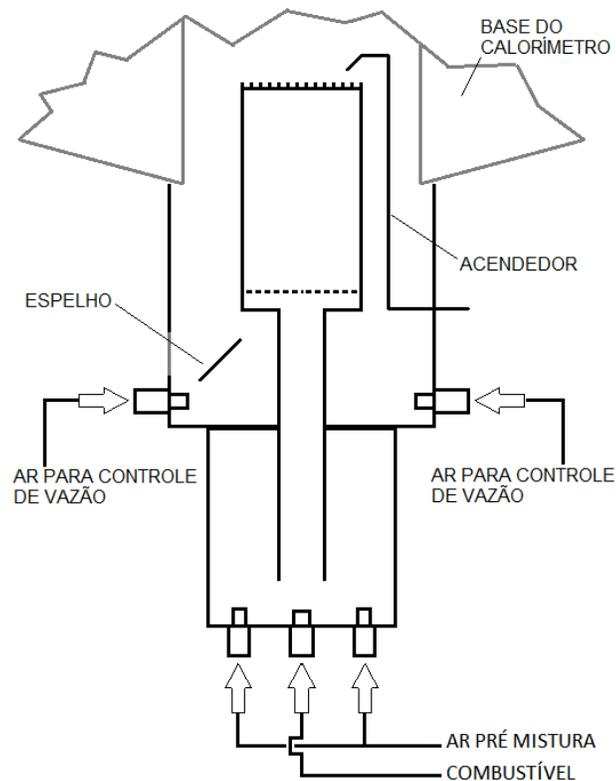


Figura 4.1 - Esquema do queimador desenvolvido.

O dispositivo consiste em dois cilindros concêntricos e um queimador. Na câmara inferior ocorre a pré-mistura do combustível e o ar para queima, ela consiste de um cilindro metálico estanque com uma entrada de combustível central, duas entradas de ar e uma saída para o queimador. Na câmara superior adiciona-se o ar para controle do fluxo e completar a queima caso essa não tenha sido completa, é composta por um cilindro com duas entradas de ar e uma haste metálica em contato com um fio, isolados por um cilindro cerâmico, para a conexão com um acendedor elétrico para ignição da chama. Na câmara superior ainda há um espelho que pode ser visualizado por uma janela transparente para controle da chama. A Figura 4.2 mostra uma foto do queimador desenvolvido, junto com o acendedor.



Figura 4.2 – Centelhador e queimador.

Foram feitas doze medidas com metano no queimador para verificar as relações ar/combustível que podem ser utilizadas no equipamento e verificar as vazões em que ocorre o início do descolamento e a extinção da chama. A Figura 4.3 mostra o início do descolamento e o momento em que a chama está prestes a se extinguir.

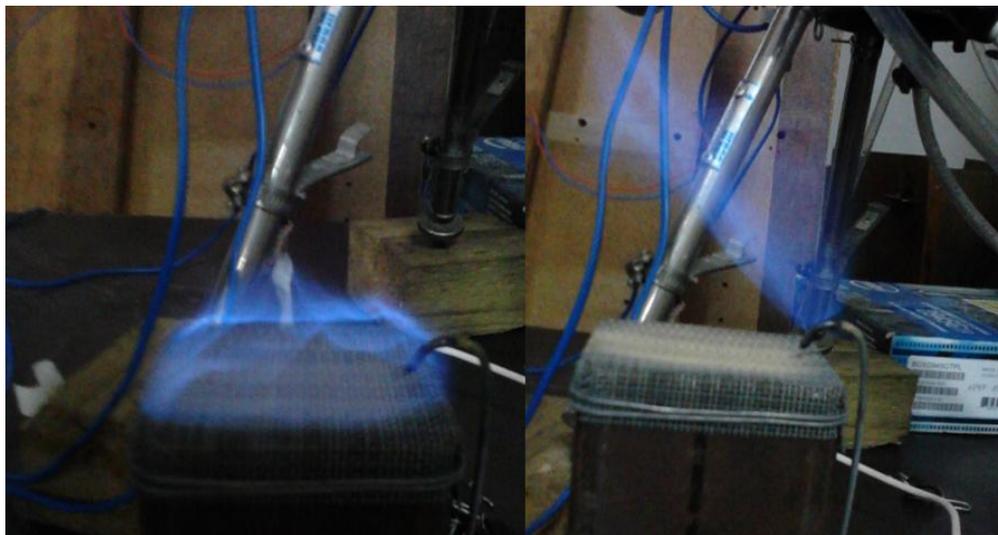


Figura 4.3 – Chama descolando e chama prestes a se extinguir.

Na Figura 4.3 temos as fotos de uma medida realizada onde podemos verificar o início do descolamento da chama que inicia com as vazões de 300 L/h para metano e 2520 L/h para ar e o momento em que a chama está prestes a se extinguir com vazões de 300 L/h para metano e 2880 L/h para ar.

## 4.2 Bancada

Foi então montada a bancada para testes, adicionando oito termopares tipo J na admissão e saída da água, no bocal de escape dos gases provenientes da combustão, no corpo do calorímetro e para medir a temperatura do ar exterior, conforme visualizado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Foto da bancada de testes em operação.

## 4.3 Componentes da Bancada Experimental

**Sistema de aquisição de dados HP 34970A:** Equipamento utilizado para obtenção das temperaturas a partir de oito termopares dispostos no calorímetro.

**Calorímetro:** Utilizado para obtenção do PCI e PCS do metano e GLP.

**Termopares:** Oito termopares tipo J utilizados para medir as temperaturas.

**Rotâmetros:** Utilizados para medir a vazão de metano e ar.

Rotâmetro para ar com escala 0 à 10 l/min com resolução de 0,5 l/min.

Rotâmetro para ar com escala 10 à 100 l/min com resolução de 2 l/min.

O ar foi fornecido por linha com pressão estabilizada em 4 bar para os rotâmetros utilizados:

Rotâmetro para metano com escala 0 à 1,4 l/min com resolução de 0,1 l/min.

Rotâmetro para metano com escala 0,5 à 5 l/min com resolução de 0,2 l/min.

O metano foi fornecido por um cilindro com pressão estabilizada em 1 bar.

**Cilindro de metano:** Cilindro tipo T, capacidade 10m<sup>3</sup>, com pureza de 99,99995%.

**Cilindro de GLP:** Cilindro P-2 com 2kg de peso líquido com mistura estimada em 70% propano e 30% butano.

**Centelhador:** Utilizado para realizar a ignição dos gases.

**Balança:** Utilizada para medir o GLP consumido, a vazão mássica da água no calorímetro e a massa do condensado.

### 4.3 Procedimento experimental

Sistema de aquisição de dados HP 34970A:

Foi criado um arquivo de configuração para leitura dos termopares de números 1 à 8 com intervalos de três segundos. Ao realizar as medidas conferem-se o posicionamento dos termopares, liga-se o computador, com o software do equipamento, carrega-se o arquivo de configuração, inicia-se a leitura dos termopares. Com o intervalo de tempo desejado encerra-se a leitura, é criado um arquivo no formato excel com os dados das leituras, temperaturas, intervalo das leituras e data que são utilizados para os cálculos.

Calorímetro:

Foi conectada a tubulação de água e conferidas as conexões a procura de vazamentos, regulou-se a válvula para manter um fluxo adequado na purga. Para as medida abriram-se as válvulas dos rotâmetros de gás e ar (no caso do queimador), acionou-se o queimador ou o bico de Bunsen, aguardando o início do gotejamento da condensação e a estabilização das temperaturas para começar então a leitura das temperaturas.

A vazão da água é controlada por uma válvula. A pressão da água é mantida constante devido à diferença das alturas de entrada e saída de água no calorímetro. O volume de combustível é medido por um rotâmetro(para o metano) e por diferença de peso (para o GLP). A massa total de água condensada no interior do trocador de calor durante a queima do combustível é pesada. Para o queimador desenvolvido neste trabalho, a vazão de ar é controlada por um rotâmetro. As temperaturas de entrada e saída da água, bem como as temperaturas do ar são monitoradas por termopares tipo j.

Posto que na configuração original do calorímetro, tendo como queimador um bico de bunsen, não é possível o controlada quantidade de ar que entra no calorímetro, não há como calcular a energia térmica transportada pelos gases em circulação, nem como garantir que a mistura ar/combustível seja suficiente para uma queima completa do combustível. A fim de sanar estes problemas foi elaborado um novo queimador.

Balança:

Utilizou-se uma balança para medir a vazão de água no calorímetro. Foram realizadas três medidas de peso da água em um intervalo de três minutos obtendo-se uma vazão média de 2320 kg/min.

As massas de condensado foram pesadas para o cálculo do PCI.

A quantidade de GLP utilizada nos testes foi medida pela diferença de peso do cilindro antes e depois de cada teste, sendo que os valores utilizados foram a média de três medidas.

Cálculos do PCI e PCS:

Foi criado um arquivo que lê os dados fornecidos pelo sistema de aquisição de dados HP 34970A e calcula o PCI e PCS e compara com os valores teóricos.

### 4.4 Avaliação das incertezas

Segundo Olivieri, 2011, incerteza é a consequência de efeitos aleatórios desconhecidos e limites de correção para efeitos sistemáticos e é, portanto expressa como uma quantidade, isto é um intervalo em torno do resultado. Ela é avaliada pela combinação de um número de componentes de incertezas. Os componentes são quantificados pela avaliação dos resultados de diversas medições repetidas ou por estimativa baseada em dados de registros, medições prévias, conhecimento do equipamento e experiência na medição. As incertezas neste trabalho

foram obtidas dos fabricantes dos equipamentos de medição e da propagação destas incertezas nos cálculos realizados, conforme a equação geral da propagação de incertezas.

Com os valores das incertezas definidos, pode-se utilizar a equação geral de propagação de incertezas [TAYLOR, 1997]:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \Delta z\right)^2} \quad (4.1)$$

Sendo  $\Delta q$  a incerteza que está em função das variáveis  $(x, \dots, z)$ , que são independentes e aleatórias. O erros dos equipamentos de medição encontram-se no Anexo I.

O erro de medição é a diferença entre os PCI e PCS medidos e respectivos valores teóricos:

$$Erro = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor da literatura}}{\text{Valor da literatura}} \quad (4.2)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram feitas doze medidas com metano no queimador para verificar as relações ar/combustível que podem ser utilizadas no equipamento.

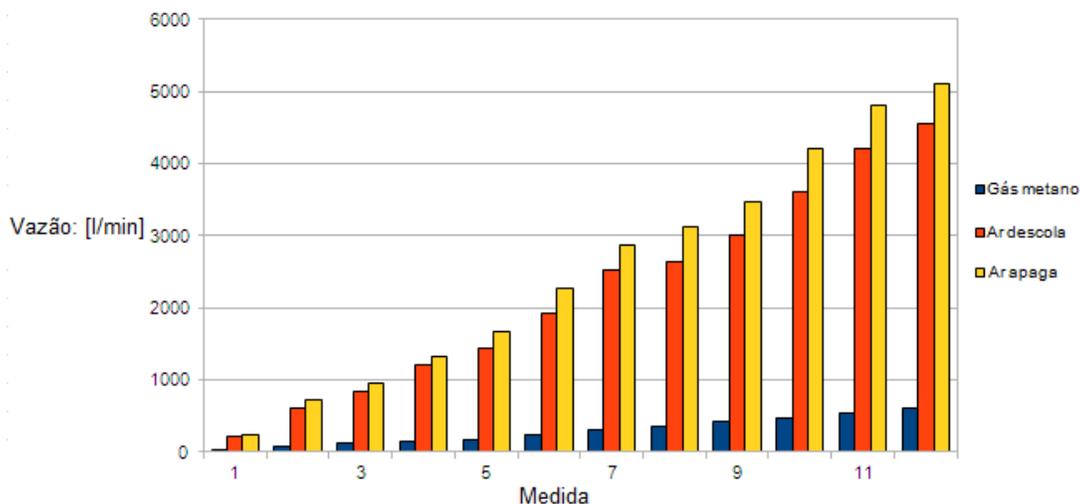


Figura 5.1 - Vazões de ar e metano para descolamento e extinção da chama [L/h]

A Figura 5.2 mostra a razão mássica para doze medidas realizadas no queimador com metano e ar.

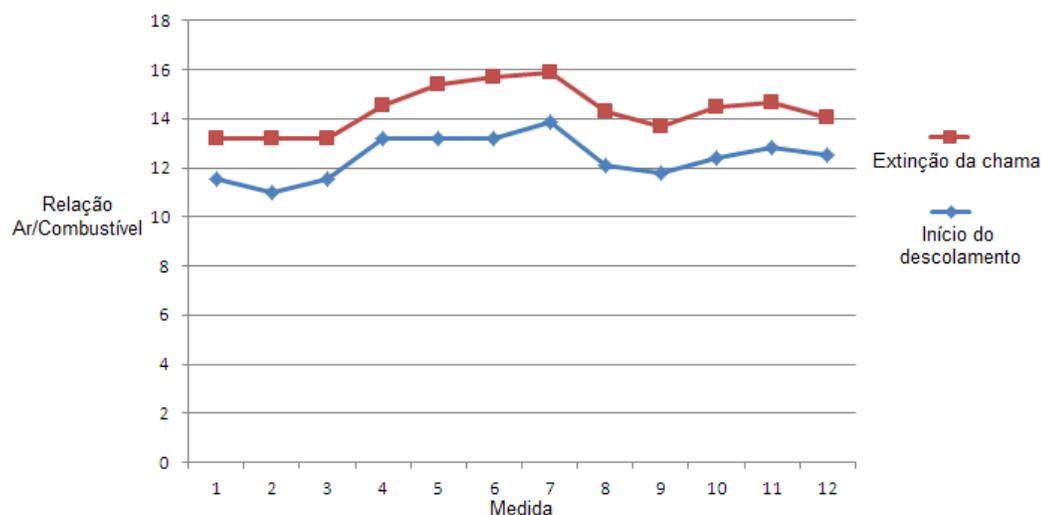


Figura 5.2 - Relação Ar/Metano

A razão mássica média para início do descolamento foi de 12,44 partes de ar para uma de metano, e a extinção da chama deu-se com uma razão média de 14,35 partes de ar para uma de metano.

As incertezas de medição foram calculadas utilizando a Equação 4.1 e os valores dos erros dos equipamentos de medição conforme Anexo I.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 abaixo mostram os resultados obtidos na operação do calorímetro com metano. As diferenças são em comparação com valores de 50016 kJ/kg para PCI e 55528 kJ/kg para PCS encontrados na literatura [Coelho e Costa, 2002]. Nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 são apresentados os resultados dos testes com GLP (gás liquefeito de petróleo).

Tabela 5.3 - PCI e PCS obtidos e respectivos erros para chama de metano

Medida	Vazão gás [L/h]	PCS [kJ/KG]	PCI [kJ/KG]	Diferença PCS [kJ/Kg]		Diferença PCI [kJ/KG]	
				Númerica	Percentual	Númerica	Percentual
1	54	49360	45860	-6160	-11,10%	-4150	-8,31%
2	168	50220	47980	-5300	-9,55%	-2040	-4,08%
3	48	52880	48940	-2650	-4,78%	-1060	-2,13%
4	78	53780	52160	-1740	-3,14%	-2150	-4,30%

Tabela 5.4 - PCI e PCS obtidos e respectivas incertezas de medição para chama de metano

Medida	Vazão gás [L/h]	PCS [kJ/KG]	PCI [kJ/KG]	Incerteza PCS [kJ/Kg]		Incerteza PCI [kJ/KG]	
				Númerica	Percentual	Númerica	Percentual
1	54	49360	45860	±5868	±11,89%	±5401	±11,78%
2	168	50220	47980	±3838	±7,64%	±3633	±7,57%
3	48	52880	48940	±7072	±13,37%	±6484	±13,25%
4	78	53780	52160	±4426	±8,23%	±4253	±8,15%

Tabela 5.5 - Temperaturas medidas para chama de metano

Medida	Vazão gás [L/h]	$T_{e,agua}$ [°C]	$\Delta T_{agua}$ [°C]	$T_{e,ar}$ [°C]	$\Delta T_{ar}$ [°C]	$\bar{T}_{corpo}$ [°C]
1	54	28,47	3,05	27,80	1,13	30,50
2	168	28,51	9,89	27,81	6,55	31,40
3	48	28,52	2,89	28,06	1,17	29,77
4	78	26,76	5,00	25,82	3,86	30,83

Tabela 5.6 - PCI e PCS obtidos e respectivos erros para chama de GLP

Medida	Vazão gás [g/h]	PCS [kJ/KG]	PCI [kJ/KG]	Diferença PCS [kJ/Kg]		Diferença PCI [kJ/KG]	
				Numérica	Percentual	Numérica	Percentual
1	79,8	44138	43873	-5660	11,37%	-2151	4,68%
2	30	49684	47902	-108	0,21%	-1883	4,08%

Tabela 5.7 - PCI e PCS obtidos e respectivas incertezas de medição para chama de GLP

Medida	Vazão gás [g/h]	PCS [kJ/KG]	PCI [kJ/KG]	Incerteza PCS [kJ/Kg]		Incerteza PCI [kJ/KG]	
				Numérica	Percentual	Numérica	Percentual
1	79,8	44138	43873	±1203	±2,73%	±1189	±2,71%
2	30	49684	47902	±3610	±7,27	±3462	±7,23%

Os valores obtidos para o poder calorífico do metano se encontram dentro das incertezas de medição, até 13%. Pode-se atribuir esta incerteza principalmente à leitura dos rotômetros para gás, visto que em um rotômetro com escala de 0,1 l/min medindo 0,8 l/min se está sujeito a erros significativos de leitura. No caso do GLP, os poderes caloríficos foram medidos e uma medidaficou fora da faixa de incertezas de medição, o que podemos atribuir à troca de calor do calorímetro com o ambiente já que o corpo do calorímetro estava com temperatura maior que a ambiente, como podemos ver na tabela 5.8. Todos os valores de poder calorífico ficaram abaixo do valor teórico.

Tabela 5.8 - Temperaturas medidas para chama de GLP

Medida	Vazão gás [g/h]	$T_{e,agua}$ [°C]	$\Delta T_{agua}$ [°C]	$T_{e,ar}$ [°C]	$\Delta T_{ar}$ [°C]	$\bar{T}_{corpo}$ [°C]
1	79,8	28,61	6,04	28,23	1,74	30,02
2	30	28,58	2,49	28,98	1,41	30,01

Como se pode observar na tabela 5.5 e 5.8, o corpo do calorímetro opera com uma temperatura acima da ambiente ( $\bar{T}_{corpo} > T_{e,ar}$ ), caracterizando uma troca de calor por convecção, que aumenta o erro. Isso se deve ao fato da diferença da temperatura entre a água e os gases na entrada do calorímetro ser muito pequena nos dias em que foram realizadas as medições, menores que 1° C e inclusive com temperaturas de água acima da do ar, o que dificulta a troca de calor no interior do calorímetro.

Foi feita uma comparação da parcela da energia do combustível transferida para a água e para o ar, a fim de analisar o impacto da energia absorvida pelo ar de entrada sobre o total, conforme mostrado na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Potências do ar e da água

Medida	Vazão de gás [L/h]	Potência dos gases da combustão [kJ/h]	Potência da água de refrigeração [kJ/h]	Razão das potências
1	54	2,4	1773	0,14%
2	168	22,8	5755	0,41%
3	48	1,2	1682	0,10%
4	78	5,4	2912	0,19%

Observamos que os valores do PCI e PCS variam significativamente com qualquer variação na quantidade de gás que é quociente na equação para obtenção do PCs, tendo portanto grande influência no resultado final. Porém, ao adicionarmos os valores da energia que é carregada pelos gases, esses não se mostraram relevantes comparados ao erro total, todos na ordem de menos de 0,5%.

## 6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi desenvolvido e testado um queimador para a determinação da faixa de estabilidade da queima de metano e para determinar o poder calorífico de metano e GLP.

Os valores de temperatura coletados foram estáveis ao longo do tempo. Os valores calculados para o PC ficaram abaixo do valor teórico, tendo-se verificado que a perda de calor para o ambiente pode ter influenciado o resultado.

A instrumentação mostrou-se inadequada pois foram encontrados incertezas acima de 13% nas medidas dos poderes caloríficos.

Contudo, tendo em vista a dificuldade de estabilização das chamas de baixo poder calorífico, a substituição do queimador, com provisão de medição de vazão de gás se mostra acertado. É necessário, entretanto, utilizar sistemas de medição mais sensíveis.

Principais conclusões:

O queimador funcionou adequadamente.  
Foi possível medir o PCI e PCS do metano e do GLP.

Sugestões para continuação do trabalho:

Melhorar a instrumentação.  
Testar gases de baixo poder calorífico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

F.j Brislee, “An Introduction to the Study of Fuel”, 1ª Edição, 1912.

Olivieri. J.C, “Procedimento Geral para Cálculo de Incerteza de Medição”, 2012.

URL <http://jcolivieri.sites.uol.com.br/incerteza.htm#1> Acessado em novembro de 2012.

Coelho, P., Costa, M., "**Combustão**", 1ª Edição, 2007.

Wuebbles, D. J., Hayhoe, K., "**Atmospheric Methane and Global Change**" Earth Science Reviews, 57, 2002.

Bosschaart, K.J., "**Analysis of the Heat Flux Method for Measuring Burning Velocities**" Eindhoven University Press, 2002.

Ribeiro, M. A., "**Medição de vazão, fundamentos e aplicações**" 6ª Edição, 2004, Tek treinamento & consultoria LTDA.

International Energy Agency, "**World Energy Outlook**", 1ª Edição, 2011.

## ANEXO I

## Caracterização dos equipamentos de medição

- Termopares tipo J:  $\pm 0,75\%$  da temperatura medida. Calibrados em banho térmico nas temperaturas entre  $25^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  tendo como referência termômetros de mercúrio.
- Rotâmetro para ar com escala 1 à 10 l/min com resolução de 0,5 l/min, erro de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. [Ribeiro, M. A, 2004].
- Rotâmetro para ar com escala 10 à 100 l/min com resolução de 2 l/min, erro de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. [Ribeiro, M. A, 2004].
- Rotâmetro para metano com escala 0,1 à 1,4 l/min com resolução de 0,1 l/min, erro de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. [Ribeiro, M. A, 2004].
- Rotâmetro para metano com escala 0,5 à 5 l/min com resolução de 0,2 l/min, erro de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. [Ribeiro, M. A, 2004].
- Balança digital, com capacidade mínima de 5g, máxima de 10Kg divisão de 0,1g e erro de  $\pm 1\text{g}$ , informado pelo fabricante.