

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL MODELO PARA ESTUDO DA COMBUSTÃO DE
BIOGÁS PRODUZIDO NA DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

por

FRANCIELE STAIL BORDIN

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, Novembro de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL MODELO PARA ESTUDO DA COMBUSTÃO DE
BIOGÁS PRODUZIDO NA DEGRADAÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

por

FRANCIELE STAIL BORDIN

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: **Ciências Térmicas**

Orientador: Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre, Novembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a toda equipe de professores e funcionários da UFRGS que contribuíram com a minha formação.

à minha professora orientadora, Thamy Cristina Hayashi, pelo excelente apoio e orientação.

ao técnico João Batista da Rosa e ao bolsista Renato Pedrotti, pelas inúmeras horas de apoio ao processo experimental.

aos professores Fernando Marcelo Pereira, Paulo Smith Schneider e Paulo Otto Beyer, pelo interesse e atenção ao projeto.

à empresa Air Liquide, especialmente ao Sr. Júlio Santos, pelo empréstimo do cilindro de gás e fornecimento do dióxido de carbono.

aos meus pais, Janecir Maria Stail Bordin e Derli Trentin Bordin, ao meu irmão, Matheus Stail Bordin, ao Rafael Lucchese Coitinho, e a todos amigos, por todo amor e carinho.

Muito obrigada!

BORDIN, F.S. **Desenvolvimento de combustível modelo para estudo da combustão de biogás produzido na degradação anaeróbia de resíduos sólidos urbanos**. 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização de um combustível modelo para suportar o desenvolvimento de dispositivos de queima visando ao aproveitamento energético de gases resultantes da degradação anaeróbia de resíduos domésticos (lixo). Como principal resultado, foi medido o poder calorífico de misturas preparadas para representar o biogás. As misturas utilizadas consistiram de metano e dióxido de carbono em proporções determinadas a partir de um estudo da literatura. As misturas de CH_4 e CO_2 foram testadas em um calorímetro tipo Junkers para a avaliação do seu poder calorífico. Foi necessário adaptar o queimador do calorímetro para conseguir estabilizar as chamas do combustível modelo. Foram realizados testes com misturas em que a fração volumétrica de metano variou de 56,8% a 77,8%, que representa a variação típica da composição do biogás de aterro sanitário. Pela comparação ao poder calorífico teórico, foi verificado que a composição e a vazão do gás modelo afetam a medição do poder calorífico.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, queimadores, poder calorífico, combustível sintético.

BORDIN, F.S. **Development of a model fuel to support the study of the combustion of biogas produced by anaerobic degradation of municipal solid waste.** 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This study aims to characterize a model fuel proposed to support the development of burning devices to improve the energetic use of gases resulting from the anaerobic degradation of domestic waste. As main result, the higher and lower heating values of mixtures prepared in order to represent the biogas were measured. The synthetic fuel used consisted of methane and carbon dioxide mixtures with composition determined from a literature survey. The mixtures of CH₄ and CO₂ were tested in a Junkers-type calorimeter for the evaluation of their higher and lower heating values. It was necessary to adjust the burner geometry to get stabilized flames of the model fuel. Tests were performed with mixtures with the methane volume fraction ranging from 56.8% to 77.8%, which represents the typical variation of the composition of biogas from landfill. From the comparison with the theoretic heating value, it was verified that the composition and the flow rate of the synthetic fuel affect the measurements.

KEYWORDS: Biogas, burners, heating value, synthetic fuel.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Biogás.....	2
2.2. Aproveitamento energético do biogás no Brasil	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1. Combustão e misturas gasosas	4
3.2. Calorímetro	6
3.3. Rotâmetros	7
4. METODOLOGIA	8
4.1. Bancada experimental	8
4.2. Incerteza e erro de medição.....	9
4.3. Procedimento experimental.....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. O Brasil possui grande potencial de aproveitamento energético do biogás, no tratamento de esgoto, suinocultura e deposição de resíduos sólidos (Pecora *et alli*, 2008).

De acordo com Azevedo (2000), os combustíveis fósseis exigem centenas de milhões de anos para se formarem. São, portanto, não renováveis (é impossível recompor suas reservas quando esgotadas). Já a biomassa, está sujeita às leis da termodinâmica e ao princípio de Lavoisier, portanto a conversão biológica dos resíduos sólidos em combustível é de improvável extinção.

A produção do metano ocorre na massa de lixo espontaneamente, bastando que sejam estabelecidas condições anaeróbias para a decomposição da matéria orgânica, o que ocorre em qualquer aterro de lixo onde haja compactação e cobertura (Leite *et alli*, 2005).

Assim, a produção do biogás é uma consequência inevitável. Uma grande vantagem do biogás situa-se no campo econômico, pois sendo subproduto ao tratamento de resíduos, seu custo é irrisório (Azevedo, 2000).

Na simples queima de biogás em aterros, o metano, cujo potencial de aquecimento global é 21 vezes maior que o dióxido de carbono, é transformado em dióxido de carbono, reduzindo o impacto de aquecimento global e permitindo a venda de créditos de carbono. (Valle, 2004)

No entanto, segundo Pecora (2006), é importante ressaltar que do ponto de vista energético, a queima do biogás em “*flare*” representa desperdício de energia, visto que o biogás poderia ser utilizado em um sistema de conversão energética para o aproveitamento/consumo da energia gerada.

“O aproveitamento energético do biogás, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, também traz benefícios para a sociedade, pois promove a utilização ou reaproveitamento de recursos “descartáveis” e/ou de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia fóssil, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia; aumenta a oferta de energia; possibilita a geração local de empregos; reduz os odores e as toxinas do ar, diminui a emissão de poluentes pela substituição de combustíveis fósseis, colabora para a viabilidade econômica dos aterros sanitários, e estações de tratamento de efluentes, otimiza a utilização local de recursos e aumenta a viabilidade do saneamento básico no país, permitindo o desenvolvimento tecnológico de empresas de saneamento e energéticas” (Pecora *et alli*, 2008).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma mistura combustível para suportar o estudo da combustão de gases resultantes da degradação anaeróbia de resíduos domésticos (lixo). Como principal resultado, espera-se dispor de uma metodologia para a criação de uma mistura combustível de propriedades conhecidas para aplicação no estudo experimental de queimadores de biogás.

A composição química do biogás proveniente da degradação anaeróbia do lixo depende de diversos fatores. Assim, cada aterro possui um gás com propriedades próprias, apesar de ser composto basicamente de metano e dióxido de carbono. De acordo com Lima (2004), isto dificulta o seu emprego direto, pois reduz o poder calorífico, e exige equipamentos de elevados custos para purificá-lo. Assim, um estudo sobre a combustão do biogás ajudará no projeto de um queimador otimizado para aproveitar a sua energia.

A composição química do combustível modelo será determinada a partir da literatura. Uma mistura de CH₄ e CO₂ será feita e um teste em um calorímetro validará as suas concentrações.

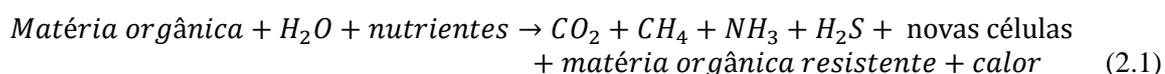
O uso de um combustível-modelo no lugar do combustível real apresenta diversas vantagens. A composição do biogás varia muito de acordo com a composição da matéria

orgânica e do seu tipo de processo de geração (biodigestores, aterros, etc.). Utilizando o gás de síntese é possível investigar a influência destas diferenças sobre os desempenhos dos equipamentos de queima, sem que seja necessário coletar amostras de fontes diferentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biogás

Segundo Tchobanoglous (1993), a parte biodegradável da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos pode ser convertida biologicamente, em condições anaeróbias, em um gás contendo dióxido de carbono e metano (biogás). Essa conversão pode ser representada pela seguinte equação:



Portanto, os principais produtos são dióxido de carbono, metano, amônia, ácido sulfídrico e matéria orgânica resistente. Segundo Azevedo, 2000, o biogás contém ainda pequenas quantidades de nitrogênio, hidrogênio, indol e mercaptanas. Tchobanoglous (1993) diz que na maior parte dos processos de conversão anaeróbia, mais de 99% do gás produzido é composto por dióxido de carbono e metano.

A produção de biogás é possível a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas (Pecora, 2006).

A geração de gás em aterros sanitários é afetada por diversas variáveis, entre as quais podem ser citadas: natureza dos resíduos, umidade presente nos resíduos, estado físico dos resíduos (tamanho das partículas), pH, temperatura, nutrientes e taxa de oxigenação. Estes fatores são os responsáveis pelo desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia de substratos orgânicos (Castilhos *et alli*, 2003).

A composição do biogás varia de um local para outro e mesmo de uma célula para outra no mesmo aterro sanitário (Fernandes, 2009). Devido a essas flutuações na sua composição, a queima do biogás pode apresentar instabilidade de chama. (Ensinas, 2003).

Pode-se assumir que, sendo o biogás, basicamente metano e gás carbônico, as discussões se restringem às propriedades físico-químicas dos dois, uma vez que os outros gases apresentam-se em quantidades muito pequenas, além de dependerem da composição do material digerido. Apesar disso, esses gases presentes em menores quantidades influenciam na escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão (Pecora, 2006).

O uso energético do biogás requer grandes volumes devido a sua baixa densidade, mas isso não chega a ser um problema, exceto no uso automotivo, onde o espaço e o peso do reservatório podem comprometer o desempenho do veículo. Felizmente, esta limitação é facilmente resolvida com um processo de purificação do biogás. Para várias outras aplicações do biogás, sua purificação não é necessária. (Azevedo, 2000).

Dependendo da aplicação do biogás, são necessários tratamentos diversos. Na utilização do biogás como combustível, por exemplo, em motores ciclo Otto ou em turbinas a gás, o tratamento mínimo requerido refere-se à retirada de umidade e do ácido sulfídrico (H_2S) presentes no biogás, evitando assim possíveis danos aos equipamentos pertencentes ao processo de conversão energética do mesmo. (Pecora *et alli*, 2008).

O gás metano queima com uma chama luminosa, quando puro. Para o biogás a chama não é tão luminosa. O biogás não é tóxico, mas atua sobre o organismo humano, diluindo o oxigênio e, como consequência, pode provocar a morte por asfixia. É um gás apolar, não solúvel em água (Pecora, 2006).

O Brasil possui grande potencial de aproveitamento energético do biogás, oriundo do tratamento de esgoto, da suinocultura e da deposição de resíduos sólidos. A conversão

energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos nas atividades agrícolas e pecuárias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, já que reduz o potencial tóxico de emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos. Além disso, o aproveitamento energético do biogás aumenta a oferta de energia e possibilita a geração descentralizada (Pecora *et alli*, 2008).

O metano possui um maior potencial de aquecimento global quando comparado ao dióxido de carbono. Isso ocorre devido ao alto coeficiente de absorção de radiação ultra-violeta e longa residência na atmosfera. A Figura 2.1 mostra as fontes antropogênicas de metano no ano de 2005 no Brasil.

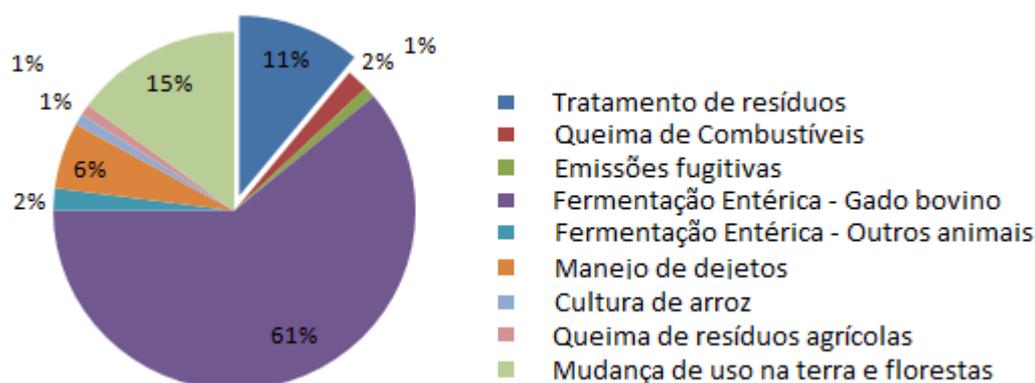


Figura 2.1 – Fontes antropogênicas de metano. Fonte: MCT (2009).

Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano, de 15% a 55% de dióxido de carbono e 5% de outros gases (Pecora, 2006). A Tabela 2.1 mostra a composição média do biogás de acordo com Tchobanoglous (1993).

Tabela 2.1 – Composição média do biogás. Fonte: Tchobanoglous (1993).

Composição	Porcentagem (base seca)
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

2.2. Aproveitamento energético do biogás no Brasil

De acordo com Pecora (2006), foi somente a partir de 1960 que a digestão anaeróbia passou a ser pesquisada com caráter científico, havendo então, grandes progressos na compreensão dos fundamentos do processo e em projetos de biodigestores e equipamentos auxiliares.

Segundo Muylaert (2000), foi implementado nos anos 1970 um projeto de coleta de biogás no aterro sanitário do Caju. Em dez anos de operação, o sistema recuperou 20 milhões de metros cúbicos de biogás, que foram adicionados ao gás produzido pela planta da Companhia Estadual de Gás, sem nenhum tipo de tratamento especial, a custos operacionais significativamente baixos.

Em 1986, a administração de Natal implementou um projeto para uso do biogás em uma cozinha comunitária para moradores de baixa renda.

Contudo, de acordo com Muylaert (2000), com a estabilidade do preço do petróleo e com a crise da dívida, esses empreendimentos acabaram por ser abandonados.

Segundo Ensinas (2003), alguns projetos recentes foram implantados, utilizando financiamentos externos através do mercado de créditos de carbono do chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto no protocolo de Kyoto.

De acordo com Azevedo (2006), o Novagerar foi o primeiro empreendimento do mundo a ser oficialmente inscrito como projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Tratado de Kyoto. O gás é utilizado como insumo energético no sistema de tratamento do chorume do próprio aterro.

A usina termelétrica Bandeirantes (São Paulo) gera energia elétrica a partir do biogás proveniente de aterro sanitário, com uma potência instalada de 22MW. Em Salvador, o projeto VEGA comercializa créditos de carbono a partir da queima do biogás de aterro. Esse projeto ainda prevê a instalação de uma usina termelétrica para geração de energia (Valle, 2004).

A empresa Sulgás, em sua página na internet, noticia o desenvolvimento de um projeto pela Companhia de Gás do Estado (Sulgás), em parceria com a SIL Soluções Ambientais e o Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre (DMLU). Um termo de cooperação foi firmado para a implantação de um sistema de purificação do biogás no aterro sanitário de Minas do Leão, a partir do qual se espera atingir uma composição química semelhante à do gás natural. A destinação, segundo o diretor da Sulgás, será a mesma do atual consumo do gás natural: geração térmica, indústria e combustível veicular (Sulgás, 2011).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Combustão e misturas gasosas

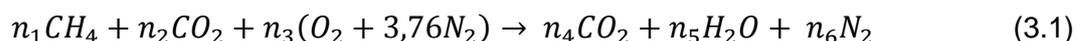
A Tabela 3.1 apresenta a composição do biogás coletado em diversas fontes.

Tabela 3.1 – Composição do biogás de diversas fontes.

Componente	Ensinas, 2003: Aterro Delta	Pecora, 2006: Esgoto USP	Castilhos, 2003: Aterro Califórnia	Azevedo, 2000: Aterro Extrema	Azevedo, 2000: Aterro Zona Norte	Azevedo, 2000: Biodigestor DMAE	Azevedo, 2000: Biodigestor Cervejaria	Lima, 2004: Projeto COMGÁS
CH ₄	55,1%	75,8%	44,03%	69,3%	56,7%	84,3%	85,6%	61%
CO ₂	44,2%	4,8%	34,2%	28,0%	41,5%	5,5%	10,6%	36,7%
H ₂	0,7%	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ S	0,0%	649 ppm	-	0,0%	-	0,0%	0,0%	0,001%
O ₂	-	1,2%	0,52%	0,7%	0,6%	0,5%	0,3%	0,30%
N ₂	-	15,5%	20,81%	2,0%	1,2%	9,6%	3,5%	1,10%
H ₂ O	-	2,6%	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-
NH ₃	-	-	2,8 ppm	-	-	-	-	-

De acordo com as composições apresentadas acima, pode-se concluir que uma mistura de metano e dióxido de carbono poderá representar satisfatoriamente o biogás. Como ambos, nitrogênio e dióxido de carbono, são gases inertes, naquelas amostras em que se encontra grande quantidade de nitrogênio, esta será substituída por dióxido de carbono. Esta troca não alterará o poder calorífico do combustível, sendo então, adequada para o propósito deste trabalho. Já no caso de um estudo sobre as emissões causadas pela queima do biogás, como NO_x por exemplo, este combustível-modelo não tem validade.

A equação química para a combustão completa do gás modelo é:



onde n_1, n_2, \dots, n_6 são os números de moles de cada componente.

A relação ar-combustível é definida pela Equação 3.2,

$$AC_{massa} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{n_{ar}MW_{ar}}{n_{comb}MW_{comb}} \quad (3.2)$$

onde AC_{massa} é a relação ar-combustível, m_{ar} a massa do ar, m_{comb} a massa do combustível, n_{ar} o número de moles do ar, n_{comb} o número de moles do combustível e MW_{ar} e MW_{comb} as massas moleculares do ar e do combustível, respectivamente.

De acordo com Turns (2000), dois importantes conceitos usados para caracterizar a composição de uma mistura são a fração molar e a fração mássica das espécies, apresentadas nas Equações 3.3 e 3.4.

$$\chi_i \equiv \frac{n_i}{n_{tot}} \quad (3.3)$$

$$Y_i \equiv \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (3.4)$$

onde χ_i é a fração molar, n_i o número de moles da espécie em questão, n_{tot} o número de moles total da mistura, Y_i a fração mássica, m_i a massa da espécie em questão e m_{tot} a massa total da mistura.

O peso molecular da mistura é calculado pela Equação 3.5 ou 3.6.

$$MW_{mist} = \sum_i \chi_i MW_i \quad (3.5)$$

$$MW_{mist} = \frac{1}{\sum_i (Y_i / MW_i)} \quad (3.6)$$

onde MW_{mist} é o peso molecular da mistura e MW_i o peso molecular da espécie i na mistura. A pressão parcial pode ser relacionada com a fração molar através da Equação 3.7.

$$P_i = \chi_i P \quad (3.7)$$

onde P_i é a pressão parcial da espécie i na mistura e P a pressão total.

Como a composição química do biogás varia muito de acordo com a fonte, será proposta uma metodologia em que se possa mudar com facilidade as quantidades de metano e dióxido de carbono de acordo com a necessidade. Por conta disso, o combustível-modelo não será armazenado; a mistura será feita enquanto está sendo utilizada (no caso desse trabalho, enquanto é queimada em um calorímetro de fluxo contínuo de água). A melhor maneira encontrada para realizar isso, foi utilizar rotâmetros para medir, e controlar, a vazão dos combustíveis padrões e do ar.

Os princípios de funcionamento desses instrumentos estão descritos na próxima seção.

3.2. Calorímetro

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de calor liberada na sua reação de oxidação completa por unidade de massa. Ele é definido pela Equação 3.8:

$$PC = h_R - h_P \quad (3.8)$$

onde PC é o poder calorífico, h_R é a entalpia dos reagentes e h_P a entalpia dos produtos de combustão, ambas definidas tomando uma unidade de massa de combustível como referência. A combustão deve ser completa, ou seja, todo o combustível deve ser oxidado, e os produtos devem estar na mesma temperatura dos reagentes. O ar é considerado um gás perfeito composto por 21% de O_2 e 79% de N_2 (em base volumétrica). Não será considerada a umidade do ar. Para o cálculo do poder calorífico superior, é considerado que toda a água presente no produto da combustão está condensada. Já para o poder calorífico inferior, toda a água é considerada na forma de vapor.

Um calorímetro tipo Junkers é utilizado para medir o poder calorífico dos combustíveis gasosos. O combustível é queimado em queimador tipo bico de Bunsen na câmara interna do calorímetro, transferindo calor para o escoamento de água que percorre as paredes externas desta câmara. A vazão de água é regulada para que todo o calor gerado pela combustão seja transferido para a água, de modo que os produtos saiam na mesma temperatura em que o combustível entra e que todo o vapor d'água se condense. A Figura 3.1 mostra o esquema do calorímetro utilizado, com suas entradas e saídas e propriedades medidas.

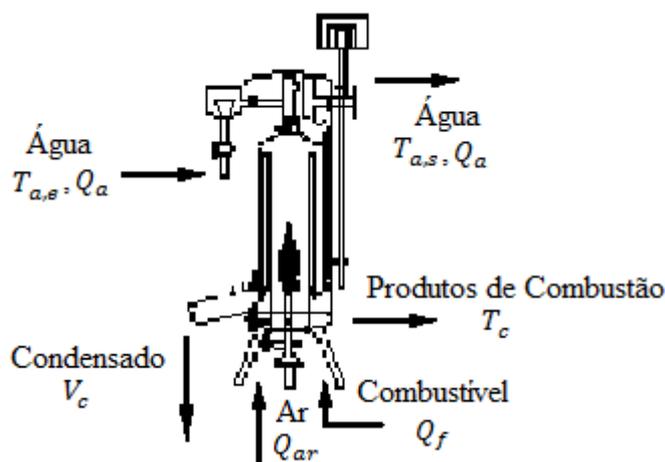


Figura 3.1 – Esquema do calorímetro tipo Junkers.

Na Figura 3.1, $T_{a,e}$ é a temperatura de entrada da água, $T_{a,s}$ a temperatura de saída da água, T_c a temperatura dos produtos de combustão, V_c o volume de condensado, Q_{ar} a vazão de ar e Q_f a vazão volumétrica de combustível.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle, considerando regime permanente, troca de calor com o ambiente e trabalho nulos e variações de energias cinética e potencial desprezíveis, tem-se a Equação 3.9:

$$\sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (3.9)$$

onde \dot{m}_e é uma vazão mássica de entrada, \dot{m}_s de saída, h_e é a entalpia de entrada e h_s de saída. Expandindo a equação e já considerando que a temperatura dos produtos de combustão é a de referência, tem-se:

$$\dot{m}_f (h_R - h_P) = \dot{m}_a (h_{a,s} - h_{a,e}) + h_{fg} \dot{m}_c \quad (3.10)$$

onde \dot{m}_f é a vazão mássica do combustível, \dot{m}_a a vazão da água, $h_{a,s}$ a entalpia de entrada da água, $h_{a,e}$ a entalpia de saída da água, h_{fg} a entalpia de condensação da água e \dot{m}_c a vazão do condensado.

Para processos envolvendo líquidos, pode-se admitir que o calor específico é constante e utilizar a Equação 3.11,

$$h_{a,s} - h_{a,e} = c_{p,a}(T_{a,s} - T_{a,e}) \quad (3.11)$$

onde $c_{p,a}$ é o calor específico da água a pressão constante. Utilizando a Equação 3.11 e a definição de poder calorífico dada pela Equação 3.8, tem-se:

$$PCS = \frac{c_{p,a}(T_{a,s}-T_{a,e}) + h_{fg}\dot{m}_c}{\dot{m}_f} \quad (3.12)$$

$$PCI = \frac{c_{p,a}(T_{a,s}-T_{a,e})}{\dot{m}_f} \quad (3.13)$$

onde PCS e PCI são o poder calorífico superior e inferior, respectivamente.

3.3. Rotâmetros

A Figura 3.2 mostra os rotâmetros utilizados neste trabalho e um desenho esquemático do seu funcionamento.

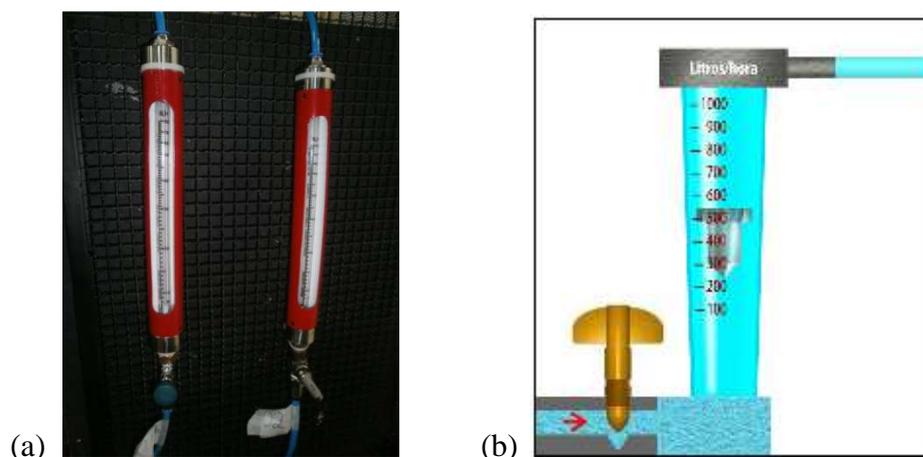


Figura 3.2 – (a) Rotâmetros utilizados no experimento. (b) Representação esquemática.

O escoamento cuja vazão se pretende medir entra pela parte de baixo do tubo cônico vertical e faz com que o flutuador se mova para cima. O flutuador irá subir até um ponto em que as forças de arrasto estejam balanceadas pelo peso e força de empuxo. A posição do flutuador é então utilizada para indicar a vazão volumétrica do escoamento. A elevação do flutuador depende da área anular entre o flutuador e o vidro do tubo.

O balanço de forças no flutuador é dado pela Equação 3.14:

$$F_d + \rho_f \frac{g}{g_c} = \rho_b V_b \frac{g}{g_c} \quad (3.14)$$

onde ρ_f e ρ_b são as massas específicas do fluido e do flutuador, respectivamente, V_b é o volume total do flutuador, g é a aceleração da gravidade, e F_d é a força de arrasto, dada pela Equação 3.15:

$$F_d = C_d A_b \frac{\rho_f u_m^2}{2g_c} \quad (3.15)$$

Na Equação 3.15, C_d é o coeficiente de arrasto, A_b é a área frontal do flutuador e u_m é a velocidade média do escoamento no espaço anular entre o flutuador e a parede interna do tubo.

Combinando as Equações 3.14 e 3.15 tem-se:

$$u_m = \left[\frac{1}{C_d} \frac{2gV_b}{A_b} \left(\frac{\rho_b}{\rho_f} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

ou

$$Q = Au_m = A \left[\frac{1}{C_d} \frac{2gV_b}{A_b} \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_f} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

onde A é a área anular, dada pela Equação 3.18:

$$A = \frac{\pi}{4} [(D + ay)^2 - d^2] \quad (3.18)$$

Na Equação 3.18, D é o diâmetro do tubo na entrada, d é o diâmetro máximo do flutuador, y é a cota vertical do rotâmetro, e a é uma constante indicando a conicidade do tubo.

4. METODOLOGIA

4.1. Bancada experimental

Os instrumentos utilizados para realizar o experimento são:

Calorímetro tipo Junkers: Mede os poderes caloríficos dos combustíveis.

Termopares tipo J: Mede as temperaturas de entrada e saída da água e de saída dos gases produtos da combustão. Incerteza de medição: +/-2,2°C ou 0,75% (o que for maior). Faixa de operação: 0°C a 750°C. Os termopares foram calibrados em banho térmico, nas temperaturas entre 25°C e 50°C, tendo como referência termômetros de mercúrio.

Sistema de aquisição de dados HP 34970A: Conectado aos termopares para a aquisição das temperaturas medidas. Equipamento disponibilizado pelo Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos – LETA.

Rotâmetros: Serão utilizados três rotâmetros, para medir as vazões de metano, gás carbônico e ar. Cada um desses foi calibrado para uso na temperatura de 21°C e pressão de 760mmhg. A pressão máxima suportada é de 10 bar. Precisão: +/- 2%. Faixa de utilização: Metano e Gás Carbônico: 80 – 800 L/h. AR: 1.200 – 12.000 L/h.

Becker graduado: Utilizado para medir a vazão da água. Sua incerteza é desconhecida, será utilizada a distribuição t-Student para calculá-la.

Proveta graduada: Utilizada para medir a vazão do condensado. Sua incerteza é desconhecida, será utilizada a distribuição t-Student para calculá-la.

Cronômetro: Utilizado para calcular os tempos de coleta de água e de condensado, a fim de calcular as suas vazões. Incertezas: +/- 0,01s.

Cilindro contendo metano: pureza de 99,99995%. Fornecedor: Linde.

Cilindro contendo dióxido de carbono: pureza de 95%. Fornecedor: Air Liquide.

Conexões, válvulas de agulha e reguladoras de pressão.

A Figura 4.1 mostra um esquema da configuração do experimento.

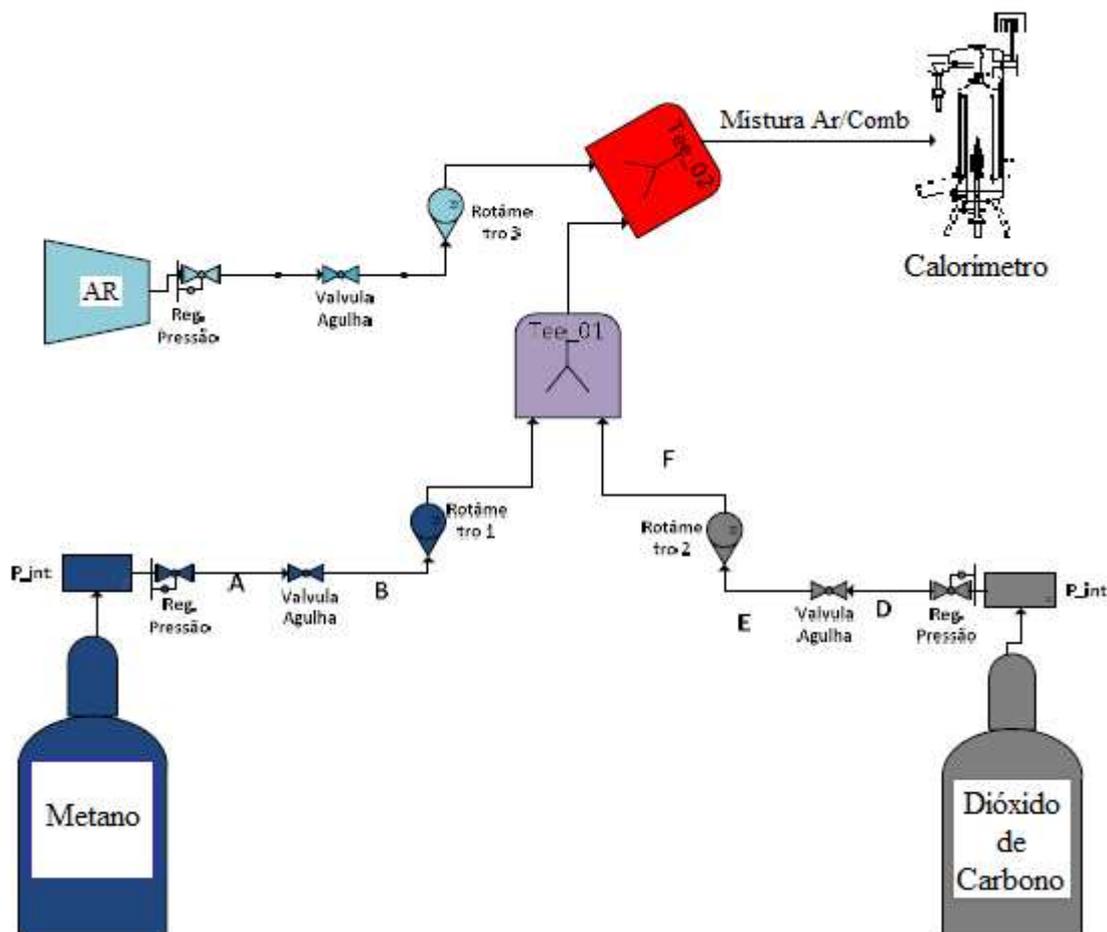


Figura 4.1 – Configuração do experimento.

4.2. Incerteza e erro de medição

Para avaliar a incerteza no valor do poder calorífico, será utilizado o método Kline e McClintock (Holman, 2001). Esse método combina todas as incertezas presentes nas medidas primárias para calcular a incerteza final. Para isso se deve encontrar a equação matemática que represente o resultado final em função das variáveis independentes, conforme Equação 4.1.

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

onde R é o resultado final R e x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis independentes. A incerteza final é dada pela Equação 4.2.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

onde w_R é a incerteza do resultado final, n é o número de variáveis envolvidas e w_1, w_2, \dots, w_n são as incertezas das variáveis independentes.

A incerteza da maioria dos instrumentos de medições já são conhecidas, informadas pelo fabricante. As incertezas desconhecidas (volume da água para calcular a sua vazão e o volume do condensado) serão calculadas utilizando a distribuição t-Student com 4 medições.

O erro de medição é a diferença entre o valor lido e o valor verdadeiro, representado pela Equação 4.3.

$$Erro = \frac{\text{valor medido} - \text{valor verdadeiro}}{\text{valor verdadeiro}} \quad (4.3)$$

4.3. Procedimento experimental

A Tabela 4.1 descreve o procedimento para a realização dos testes.

Tabela 4.1 – Procedimento experimental.

Abrem-se as válvulas dos cilindros de gases;
Regula-se a pressão de saída dos gases através das válvulas reguladoras de pressão;
Realizam-se testes de estanqueidade nas válvulas e conexões com espuma de sabão;
◆ Abre-se o fluxo de água no calorímetro;
Liga-se o computador e o sistema de aquisição de dados;
◆ Começa-se a gravar as temperaturas dos termopares no sistema de aquisição de dados;
◆ Com o queimador fora do calorímetro, deixa-se o isqueiro aceso próximo da saída de gás;
◆ Abre-se a válvula agulha do metano para acender a chama do queimador;
◆ Regula-se a vazão de metano desejada, com o cuidado de fechar a sua linha rapidamente caso a chama se extinga;
◆ Espera-se a chama estabilizar;
☼ Abre-se a válvula agulha do gás carbônico;
☼ Regula-se a vazão de gás carbônico desejada, com o cuidado de fechar a linha de metano rapidamente caso a chama se extinga;
◆ Insere-se o queimador no calorímetro;
◆ Verifica-se com um espelho pequeno se a chama está realmente acesa dentro do mesmo;
◆ Verifica-se a temperatura de saída da água, pois uma diminuição da mesma indica a extinção da chama;
◆ Verifica-se a temperatura dos gases de exaustão (uma temperatura muito alta indica grande perda de calor para o ambiente);
◆ Verifica-se o momento em que a primeira gota de água condensa e ativa-se o cronômetro;
◆ Após 10 minutos de medição, desliga-se a gravação de dados e salvam-se os mesmos;
◆ Fecha-se a válvula agulha de metano;
☼ Fecha-se a válvula agulha de gás carbônico;
◆ Espera-se até que a temperatura da água de saída seja igual a de entrada e desliga-se a água;
◆ Espera-se o calorímetro esfriar;
◆ Mede-se o condensado (após parar de pingar) em uma proveta graduada;
◆ Retira-se o queimador de dentro do calorímetro;
◆ Calculam-se os poderes caloríficos inferior e superior.
<p>Frequência do procedimento:</p> <p># Diariamente ◆ Antes de Cada Teste ☼ Antes de Cada Teste com CO₂</p>

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro teste realizado no calorímetro foi utilizado GLP (gás liquefeito de petróleo) e um medidor de vazão de fluxo positivo. Mas, como com este dispositivo não permite ajustar as

vazões em valores desejados, para o experimento com a mistura modelo foram utilizados rotâmetros. As vazões necessárias de metano e dióxido de carbono para o funcionamento do calorímetro foram dimensionadas, utilizando como parâmetro a potência da chama do GLP.

Algumas mudanças foram feitas no calorímetro, para que fosse possível controlar a quantidade de ar presente na combustão. Para isso, a parte inferior do bico de Bunsen (onde entra o ar de pré-mistura) e a parte inferior do calorímetro (por onde entra o ar secundário) foram fechadas. Assim seria possível, utilizando um terceiro rotâmetro, medir a vazão do ar e determinar a razão ar-combustível e a vazão de gases de exaustão. Uma conexão tipo “T” é utilizada para misturar os dois combustíveis padrões (metano e gás carbônico) e outra para misturar o gás de síntese com o ar.

Para iniciar o queimador manteve-se a abertura inferior do bico de Bunsen aberta. Em seguida, foi aberta a linha de ar para o misturador com metano e pretendia-se, assim, gradativamente, substituir o ar de pré-mistura fechando-se a abertura e aumentando a vazão de ar.

Contudo, não foi possível estabilizar nenhuma chama de pré-mistura no queimador tipo Bunsen (a chama sempre se extinguiu) e, como resultado, optou-se por realizar os experimentos sem injeção de ar de pré-mistura.

Primeiramente foi realizado um teste no calorímetro somente com o gás metano, para testar o seu funcionamento com este combustível e quantificar os erros de medição, já que o seu poder calorífico é conhecido. A Tabela 5.1 apresenta os resultados deste teste.

Tabela 5.1 – Resultados do teste do poder calorífico do metano.

Queimador	PCI teórico	PCI	Incertezas	Erro	PCS teórico	PCS	Incertezas	Incertezas
Bunsen	50018,77	50561,68	11305,67	-1,09%	55505,55	56316,66	11316,70	-1,46%

Verifica-se que o poder calorífico medido apresenta menos de 2% de diferença com o poder calorífico teórico, confirmando o bom funcionamento do equipamento.

Fora do calorímetro foi feito ainda um teste para obter a faixa de vazões de metano com operação estável no queimador. Com o aumento da vazão, a chama inicialmente descolou da borda do bico de Bunsen, como mostra a Figura 5.1. Para uma vazão de 370L/h de metano ocorreu a extinção da chama (“blow off”).



FIGURA 5.1 – Descolamento de chama no bico de Bunsen (vazão de metano de 350L/h).

O segundo passo foi adicionar o dióxido de carbono no combustível e avaliar a sua queima. Com o bico de Bunsen fora do calorímetro, estabilizou-se a chama com metano e começou-se a abrir a válvula de agulha que controla a vazão do dióxido de carbono. Verifica-se que para qualquer quantidade mínima de CO_2 adicionada ao combustível, a chama se extinguiu.

Foi observado que a razão da velocidade da mistura combustível e o seu poder calorífico é muito alta para qualquer fração de metano, e que assim, não era possível estabilizar uma chama. Desenvolveu-se então um novo queimador que pudesse suportar essa queima e que, além disso, coubesse no calorímetro. O diâmetro de entrada do calorímetro mede 6,5cm. O diâmetro da seção de saída do Bico de Bunsen mede 2,2cm.

Para obter uma diminuição da velocidade do escoamento da mistura combustível e estabilizar a chama, foram testados três queimadores obtidos a partir de adaptações do bico de Bunsen, conforme mostrado na Figura 5.2.

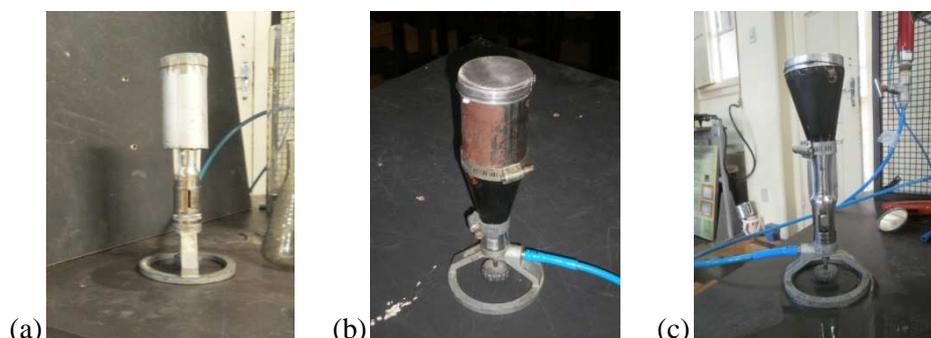


FIGURA 5.2 – Queimadores testados para combustão da mistura de baixo poder calorífico. (a) Queimador tubo. (b) Queimador cone-tubo. (c) Queimador Bunsen-cone.

O modelo da Figura 5.2(a), batizado “queimador tubo”, baseou-se na geometria de um maçarico de média potência para GLP disponível no LETA, com a diferença de se ter utilizado uma tela na seção de saída para melhor ancoragem da chama.

Este queimador apresenta um diâmetro interno de 4,5cm na seção de saída, o que resulta na diminuição da velocidade da mistura ar-combustível em 4,18 vezes em comparação ao bico de Bunsen sem adaptação. Com isso, foi possível estabilizar a chama para diversas composições da mistura modelo. Entretanto, os valores de poder calorífico medidos apresentaram erros de 16%, pelo que se optou pela busca de um outro queimador.

No modelo apresentado na Figura 5.2(b), batizado “queimador cone-tubo”, foi utilizado apenas a base do bico de Bunsen, para alimentação da mistura. O objetivo do uso do cone difusor na parte inferior do queimador foi o de diminuir gradativamente a velocidade do escoamento e garantir uma melhor distribuição do combustível na seção de saída do queimador.

Com este queimador foi possível obter chamas estáveis da mistura modelo, mas a colocação do mesmo no interior do calorímetro resultava numa diminuição excessiva da área de passagem de ar secundário, levando à extinção da chama no interior do calorímetro, em vários testes. Além disso, o teste do queimador com metano puro resultou em um erro de 32% na medição do poder calorífico, pelo que o seu uso também foi descartado.

O modelo da Figura 5.2(c), batizado “queimador Bunsen-cone”, foi proposto com o intuito de deixar uma maior área de passagem do ar secundário quando o queimador era operado dentro do calorímetro. Com este modelo, que foi o utilizado nos testes, foi possível obter chamas estáveis da mistura modelo dentro do calorímetro para uma faixa aceitável de condições de operação. O teste do poder calorífico do metano puro com este queimador foi satisfatório.

Com este queimador operando fora do calorímetro, foi possível obter chamas estáveis de metano puro para vazões de até 800L/h do combustível, máxima vazão medida pelo rotâmetro. Contudo, para vazões de metano superiores 250L/h, não foi possível manter uma chama estável no interior do calorímetro.

No caso de misturas, conseguiu-se operar o queimador de forma estável, fora do calorímetro, até a vazão de 580L/h, com vazão de metano correspondente de 350L/h. No interior do calorímetro, a máxima vazão para a qual se obteve operação estável do queimador foi de 530L/h, com vazão correspondente de metano de 340L/h.

A Figura 5.2 apresenta a comparação do poder calorífico do metano puro, medido em função da vazão, utilizando cada um dos modelos de queimadores. Para referência, o poder calorífico inferior do metano é de 50.018,77kJ/kg e o superior é de 55.505,55kJ/kg.

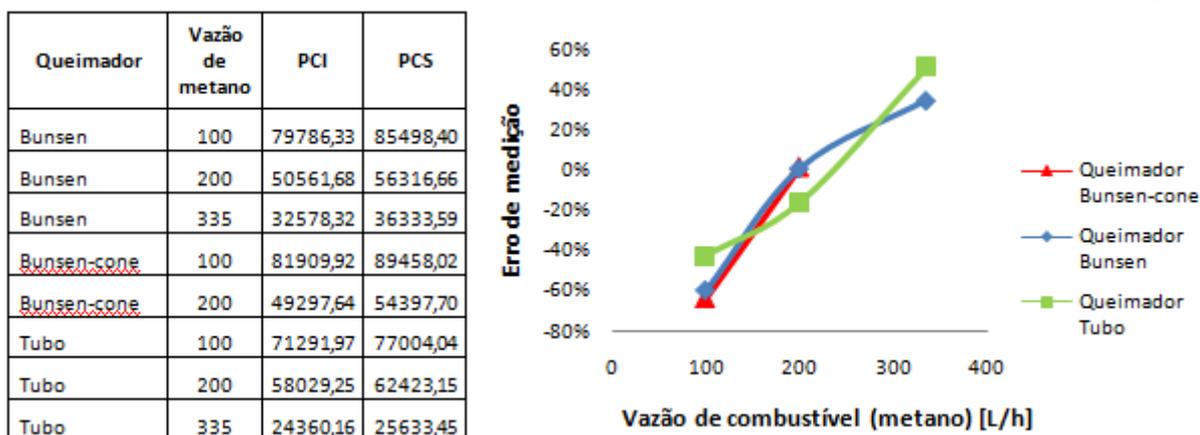


Figura 5.2 – Comparação entre as medições dos três queimadores em diversas vazões.

Verifica-se através da Figura 5.2 que o poder calorífico medido variou com a vazão do combustível. Como os menores erros encontrados com os três queimadores ocorrem para a mesma vazão, se entende que o calorímetro deve ter uma condição ótima de operação.

Foram realizados testes, utilizando o queimador Bunsen-cone, para três composições diferentes de mistura, cada um deles repetidos três vezes. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos testes no calorímetro utilizando o queimador Bunsen-cone.

Porcentagem de Metano	Vazão total [L/h]	PCI medido [kJ/kg]	Incertezas	PCS medido [kJ/kg]	Incertezas
56,82%	440	19094,67	2991,59	20797,35	2996,18
56,82%	440	20934,2	3102,65	22679,81	3107,61
56,82%	440	20845,7	3102,29	22644,21	3107,38
64,15%	530	19019,73	2779,58	20740,84	2784,56
64,15%	530	19283,89	2780,69	20989,21	2785,68
64,15%	530	18931,67	2779,22	20826,47	2784,7
77,78%	450	24366,72	3826,85	26204,58	3831,75
77,78%	450	25872,94	3832,87	27996,68	3838,9
77,78%	450	25022,65	3829,43	27473,13	3836,22

Pode-se verificar que as incertezas para cada caso são praticamente as mesmas. O resultado médio das três medições e os seus erros estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Poder calorífico medido das misturas combustíveis.

Porcentagem de Metano	PCI [kJ/kg]	Erro	PCS [kJ/kg]	Erro
56,82%	20291,52 ± 3065,51	25,16%	22040,72 ± 3070,39	22,51%
64,15%	19078,43 ± 2779,83	-3,37%	20852,17 ± 2784,98	-4,83%
77,78%	25087,43 ± 3829,72	-10,51%	27224,8 ± 3835,62	-12,48%

Para as misturas com 64,15% e 77,78% de metano, os resultados são satisfatórios e o valor teórico está dentro da faixa medida. Já para a mistura com 56,82% de metano, os resultados não foram satisfatórios, e o valor teórico está fora da faixa medida.

As incertezas de medição são significativas, da ordem de 15% do valor medido, o que indica que o resultado do poder calorífico é muito sensível, já que com qualquer pequena mudança nos parâmetros lidos, ele varia consideravelmente. Além disso, para pequenas vazões, a leitura dos rotômetros não é muito exata, o que pode representar parte dos erros encontrados.

A mistura modelo que apresenta o melhor resultado representa um biogás típico. Isto sugere que o método proposto para desenvolver o gás modelo é acertado, mas é preciso estudar melhor a operação do calorímetro com a mudança de combustíveis.

Quando se utiliza um combustível pobre em um queimador projetado para um combustível mais rico, é preciso aumentar as vazões. Isto afeta as taxas de transferência de calor do sistema e conseqüentemente, o desempenho do mesmo. O calorímetro utilizado apresenta uma vazão de água máxima de aproximadamente 2L/min. Para o caso estudado neste trabalho, seria desejável operar um calorímetro em que a vazão de água pudesse ser maior. Além disto, seria interessante que o aparelho possibilitasse o uso de um queimador maior, que suportasse vazões maiores de combustíveis pobres.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o poder calorífico de misturas de metano e dióxido de carbono com o intuito de se desenvolver um combustível modelo para suportar o desenvolvimento de dispositivos de queima, visando ao aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário. O uso do biogás tem despertado interesse, já que o mesmo apresenta potencial para contribuir para a diminuição da dependência de combustíveis não renováveis e para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos.

Para medição dos poderes caloríficos inferior e superior foi utilizado um calorímetro tipo Junkers. A medição das vazões de metano e gás carbônico foi realizada utilizando-se rotômetros, a fim de se conhecer a composição da mistura. Para se obter chamas estáveis do combustível pobre, o queimador do calorímetro foi adaptado a fim de se obter menores velocidades no bocal de saída. Três modelos de queimador foram propostos e testados na medição do poder calorífico do metano puro. Este ensaio permitiu a seleção do queimador utilizado nos testes da mistura de baixo poder calorífico.

Foram realizados testes com misturas de 56,82%, 64,15% e 77,78% de metano. Foi verificado que o erro dos poderes caloríficos medidos, em comparação com os valores teóricos, varia com a composição da mistura. A maior discrepância foi obtida para a mistura mais pobre em metano. A mistura modelo que apresentou os melhores resultados foi a de 64% de metano e 36% de gás carbônico.

Embora esta composição corresponda à de um biogás de aterro típico, este resultado sugere que é preciso aprofundar o estudo do calorímetro a fim de se determinar a condição operacional correta em que o aparelho deve ser operado para uma faixa razoável de composições do combustível modelo. Assim, embora o teste possa ser considerado válido para desenvolver a mistura modelo, o uso do calorímetro com combustíveis de baixo poder calorífico deve ser melhor avaliado, para que então seja possível comprovar a metodologia em todas as faixas de composição do biogás encontradas na literatura.

Este trabalho exemplifica como a variação da condição de operação de um queimador pode alterar significativamente os resultados, o que comprova a importância do estudo de dispositivos de queima projetados especialmente para o biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. H.; **“Características, Produção e Utilização do Biogás Produzido a Partir de Resíduos Orgânicos”**, Dissertação de Mestrado, Promec, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

AZEVEDO, L. P.; LANDIM A. L. P. F.; “**O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**”, Trabalho de conclusão de curso, MBE/Coppe, Rio de Janeiro, 2006.

CASTILHOS JÚNIOR, A.B.; “**Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**”, PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Florianópolis, 2003.

ENSINAS, A.V.; “**Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**”, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2003.

FERNANDES, J.G.; “**Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**”, Dissertação de Pós-Graduação, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

HOLMAN, J.P.; “**Experimental methods for engineers**”, MacGraw-Hill, 2rd edition, 2001.

LEITE, L.E.H.B.C.; MAHLER, C.F.; BRITTO FILHO, L.F.; “**Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás de aterros**”, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 2005.

LIMA, L. M. Q.; “**Lixo – Tratamento e Biorremediação**”, Hemus, 3^a Edição, São Paulo, 2004.

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. “**Inventário Brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: Informações gerais e valores preliminares**”. Novembro, 2009.

MUYLAERT, M. S.; AMBRAM, R; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L. B.; PEREIRA, A. S.; REIS, M. M.; “**Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta – Análise do Mecanismo de desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Casos**”, Editora da COPPE, Rio de Janeiro, 2000.

PECORA, V.; “**Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**”, Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; “**Nota técnica VIII – Biogás e o mercado de crédito de carbono**”, CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2008.

SULGÁS; “**Lixo vira biogás em aterro**”. Disponível em: <http://www.sulgas.rs.gov.br/index.asp?SECAO=8&SUBSECAO=36&EDITORIA=1691>. Acessado em 13/11/2011.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S.; “**Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues**”, Irwin MacGraw-Hill, 978p., 1993.

URNS, S.R.; “**An introduction to combustion: Concepts and Applications**”, MacGraw-Hill, 2rd edition, 2000.

VALLE, C.; “**Prospecção Tecnológica, Mudança do Clima: ESTUDO 4 - Oportunidades de negócios em segmentos produtivos nacionais - estudo consolidado**”, CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Rio de Janeiro, 2004.