

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR DO GÁS PRODUTO DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

Laura Andrea Cortabarría Castañeda, cortabarrialaura@gmail.com¹

Diego Mauricio Yepes Maya, diegoyepes@unifei.edu.br¹

Paulo Sérgio Pedroso Corrêa Jr, paulocet@yahoo.com.br¹

Luís Roberto de Melo e Pinto, yogmello@yahoo.com²

Electo Eduardo Silva Lora, electo@unifei.edu.br¹

Cristina Aparecida Vilas Bôas de Sales Oliveira, cris.oliveira@yahoo.com.br³

Bruno Augusto Pinto, brunoaugp@hotmail.com¹

¹ Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG, CEP 37500-903

² UNA Pouso Alegre, Rua João Basílio, 420, centro, Pouso Alegre – MG.

³ Universidade Santo Amaro UNISA, Rua Humboldt, 29 Santo Amaro, SP, CEP 04746-000

Resumo: O artigo tem como objetivo a determinação da velocidade de chama laminar do gás pobre produto da gaseificação de biomassa. O gás é obtido através do processo de gaseificação em um reator de leito fixo do tipo co-corrente que fornece uma mistura gasosa constituída principalmente CO, H₂, e CH₄ que apresentam uma fração volumétrica de 20 %, 16 % e 1,8 %, respectivamente. O método de determinação da velocidade de chama utilizado é o do bico de Bunsen, sendo que para o registro de chama é realizado através da técnica denominada de “schlieren”. Diferentes autores têm realizado experimentos a fim de obter a velocidade de chama laminar do gás pobre, porém sempre utilizando misturas de gases sintéticos. Nesse trabalho o gás é proveniente diretamente de um gaseificador, ou seja, o gás utilizado mantém todas as características de um gás pobre real, o que torna também o controle das variáveis mais complexa. A maior velocidade obtida foi de 0,33 m/s, sendo que a sua variação com relação à razão de equivalência é correspondente a valores obtidos por outros autores.

Palavras-chave: Gaseificação, velocidade de chama, gás pobre, biomassa, “schlieren”

1. INTRODUÇÃO

A biomassa é uma fonte renovável de energia intensamente utilizada Brasil, que é um país com importante atividade agrícola. Esse fato pode ser verificado pelo significativo consumo de etanol pela frota de veículos nacional e pela utilização de bagaço de cana em geradores de vapor nas usinas produtoras de açúcar e álcool.

A biomassa pode ser usada em usinas termelétricas como combustível em fornalhas de geradores de vapor ou pode ser convertida em gás através de um processo de gaseificação e usada diretamente em câmaras de combustão de motores alternativos ou turbinas a gás, ou mesmo ser utilizada para produção de gás de síntese para conversão em combustíveis de segunda geração.

A gaseificação propicia a conversão da biomassa sólida em um gás combustível de baixo poder calorífico sendo que se o agente de gaseificação for o ar, o que é o mais comum, é possível obter um poder calorífico do gás da ordem de 5 MJ/Nm³ (Sales, 2017; Belgiorio, 2003; McKendry, 2002). O poder calorífico é apenas uma das propriedades de maior importância para se levar em conta quando se pretende manipular os combustíveis, principalmente quando se considera o dimensionamento e fabricação de determinados equipamento, como por exemplo: queimadores industriais, fornalhas, secadores.

A velocidade de chama laminar é um parâmetro fundamental para o estudo da estabilidade chama em queimadores de gases, para o cálculo do limite de inflamabilidade e para modelagem da combustão turbulenta (Munajat, 2012; Yan, 2011).

Denomina-se chama a região visível de um processo de deflagração, ou seja, uma reação de combustão que se processa a velocidade subsônica (Kuo, 2005; Coelho, 2007). Segundo Ragland (2011) a chama é uma rápida e exotérmica reação entre um combustível gasoso e um oxidante que ocorre a uma curta distância. Essa região caracteriza-se por apresentar combustão estequiométrica e tem espessura delgada da ordem de 1 mm (Coelho, 2007).

A combustão ocorre a partir de um combustível e um comburente. Quando esses componentes são misturados antes do processo de ignição, a chama se denomina pré-misturada, o que ocorre, por exemplo, na câmara de motores de combustão interna de ignição por centelha. Se os componentes de uma mistura de combustão entram em contato apenas

no momento da ignição essa chama produzida é denominada de chama de difusão ou difusiva. Um exemplo clássico desse tipo de chama é a produzida por uma vela.

Esses dois tipos de chama ainda podem ser classificadas em laminares e turbulentas, o que depende do tipo de escoamento. O trabalho a ser desenvolvido terá como referência o escoamento laminar, ou seja, para escoamento com número de Reynolds inferiores a 2300, no queimador.

Durante um processo de combustão é de interesse que se tenha um escoamento turbulento para se obter uma melhor mistura dos reagentes, caracterizando uma chama dita turbulenta, todavia o estudo de chamas laminares são importantes devido ao fato de que podem designar uma referência para a determinação, por exemplo, dos limites de inflamabilidade de um determinado combustível.

Define-se a velocidade de chama laminar como a velocidade da mistura reagente que se move em direção normal a superfície da chama (Kuo, 2005).

Ao longo dos últimos anos alguns autores realizaram estudos relacionados à velocidade de chama de gás produto da gaseificação de biomassa. Todavia, o que se tem feito é preparar misturas a partir de gases industrializados para obter uma mistura correspondente ao de um gás pobre, conforme pode ser verificado nos trabalhos de Song (2011); Natarajan (2008), Burbano (2011).

Nesta pesquisa foram realizados testes para determinação de velocidade de chama do gás pobre utilizando-se um gás obtido a partir da gaseificação realizada em um gaseificador de leito fixo, dessa forma esse gás terá componentes como alcatrão e outros compostos que podem apresentar resultados que podem diferir com relação aos resultados obtidos através da mistura de gases manufaturados.

O gás produto da gaseificação de biomassa (gás pobre) é composto por CO (monóxido de carbono), H₂ (hidrogênio), CH₄ (metano) e gases que podem ser considerados inertes como o CO₂ (dióxido de carbono) e o N₂ (Nitrogênio), além de H₂O, particulado e alcatrão estes dois últimos são considerados contaminantes que são indesejáveis para utilização do gás em aplicações como em motores de combustão interna devendo ser reduzidos ao máximo através da utilização em algum processo de limpeza.

Considerando-se a velocidade de chama laminar (S_L), estudos realizados por Munajat (2012) permitiram estabelecer uma relação com a quantidade de alcatrão e H₂O presente no gás pobre, onde se verificou que quanto maior a presença de água na mistura menor será a velocidade de chama e que a presença de alcatrão em determinados percentuais pode aumentar ou diminuir a velocidade. Neste trabalho foi possível a verificação do aumento da velocidade de chama para o gás pobre linearmente com o aumento da fração volumétrica de H₂.

A temperatura e a pressão da mistura não foram monitoradas, sendo consideradas a pressão e temperatura ambiente, esses parâmetros foram estudados no trabalho desenvolvido por Ouimette (2009), que observou que o aumento da temperatura da mistura sugere um aumento da velocidade de chama, enquanto que com o aumento da pressão a velocidade de chama diminui.

Nesse artigo é apresentado e discutido os resultados obtidos para o estudo desenvolvido no intuito de medir a velocidade de chama laminar do gás pobre. Seu objetivo foi alcançado utilizando o método do bico de Bunsen e a técnica do “schlieren” para visualização e registro do formato da chama. O gás usado nos testes foi obtido a partir da utilização de um gaseificador co-corrente de duplo estágio e tendo sido usado eucalipto como combustível.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Biomassa Utilizada nos Testes

A biomassa utilizada nos testes foi pedaços de eucalipto cuja composição elementar e imediata pode ser verificada na Tab. 1 (Cortez, 2009).

Tabela 1 – Composição elementar e imediata do eucalipto

Elemento	Composição
C	49,00
H	5,87
O	43,97
S	0,01
N	0,30
Análise imediata [%]	
F	17,82
V	81,42
A	0,79
Poder calorífico [MJ/kg]	19,42

2.2. Sistema de Gaseificação

O gaseificador é do tipo co-corrente de duplo estágio de gaseificação, sendo construído em aço carbono 1020 e revestido internamente com material refratário, para minimizar as perdas térmicas, tendo diâmetro interno de 0,3 m. Trata-se de um gaseificador autotérmico, pois não utiliza calor externo para manter as reações de gaseificação. Tem potência nominal térmica de 45 kW e consumo de 12 kg/h. Foi construído pela empresa Termoquip energia alternativa Ltda que já encerrou suas atividades.

O agente de gaseificação utilizado é o ar, que é fornecido ao reator por um compressor centrífugo, sendo conduzido por uma tubulação schedule 40 e inserido no reator através de bicos injetores distribuídos radialmente ao longo de sua seção.

O gás produzido passa através de um ciclone para retirada de material particulado, sendo que o mesmo pode ser encaminhado para um queimador, o que é realizado durante o processo de partida, até que se atinja a concentração adequada a sua utilização. Posteriormente, segue para o reator catalítico passando, em seguida, por um trocador de calor que propicia o aquecimento do ar que será utilizado no processo.

Após fornecer calor ao ar de entrada o gás segue para outro trocador de calor a água, sendo que a sua temperatura é reduzida ainda mais a fim de condensar boa parte da umidade presente. Após esse último trocador o gás é encaminhado para um dispositivo que tem como objetivo retirar a umidade ainda remanescente no escoamento seguindo posteriormente para um filtro antes de ser direcionado para a um reservatório e partir daí é encaminhado para processo.

A composição do gás é obtida através de analisadores contínuos de gases que podem informar a fração volumétrica de CO , H_2 e CH_4 .

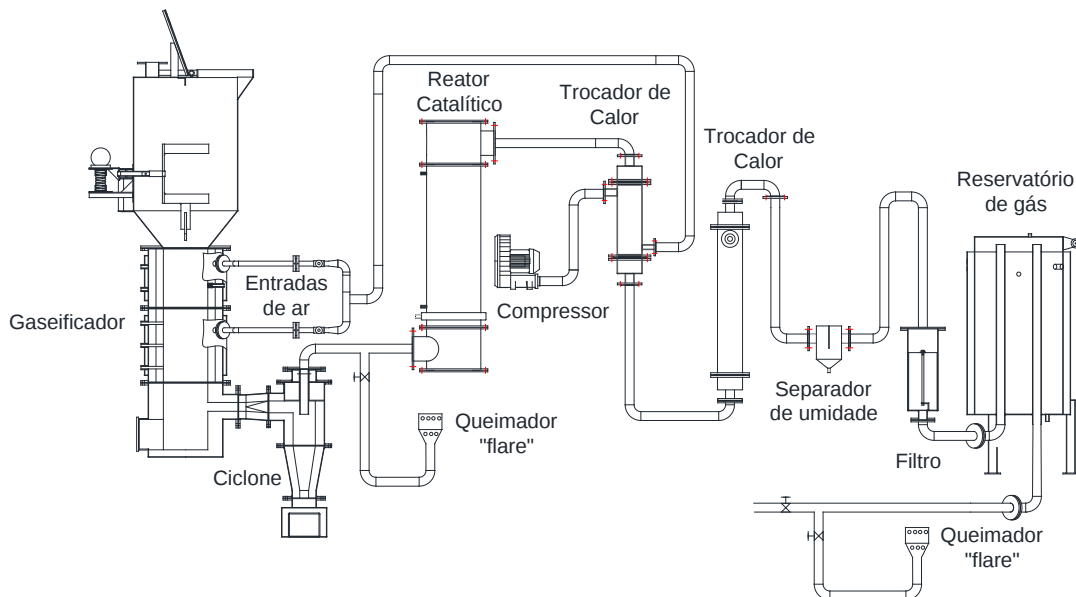


Figura 1. Sistema de gaseificação

2.3. Bancada de Testes

A bancada de testes para determinação da velocidade de chama é composta, principalmente, por: queimador, câmara fotográfica NIKON DSLR D5300 com lentes de 18-55 mm, rotâmetros, fonte de luz primária (é usado um led), espelho cilíndrico parabólico newtoniano. A bancada montada para os testes utilizando a técnica do “schlieren” é apresentada esquematicamente na Fig. 2.

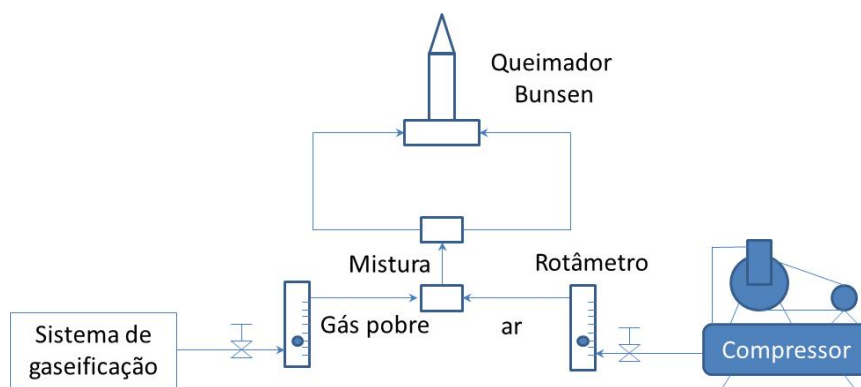


Figura 2. Diagrama da bancada de testes

2.4. Queimador

O queimador usado nos testes é construído em aço inox 306 e uma foto é apresentada na Fig. 3. No seu projeto procurou-se manter uma altura de 50 vezes o diâmetro para o desenvolvimento do escoamento e deixar o fluxo perfeitamente desenvolvido (Bouvet, 2011).



Figura 3 – Queimador utilizado nos testes

2.5. Metodologia de Testes

2.5.1. Operação do gaseificador

Procurou-se operar o gaseificador em uma condição de melhor qualidade do gás o que foi obtido para uma razão de equivalência de 0,27, que forneceu um poder calorífico da ordem de $4,9 \text{ MJ/Nm}^3$, com percentuais de 20% CO , 16% H_2 e 1,8% de CH_4 .

2.5.2. Técnica de visualização da chama “Schlieren”

A técnica consiste, basicamente, em uma fonte luminosa que emite luz que ilumina o objeto a ser observado, que é então refletida em um espelho parabólico para o foco onde uma lamina delgada impede que parte dela passe para a câmera que irá registrar o fenômeno desejado. Na Figura 4 é apresentado um esquema do arranjo que é montado para obtenção da imagem pela técnica do “schlieren” e a Fig. 5 apresenta uma imagem obtida para o gás pobre através da utilização dessa técnica, nela pode-se observar perfeitamente o cone de chama que se encontra bem definido o que é uma característica da chama laminar.

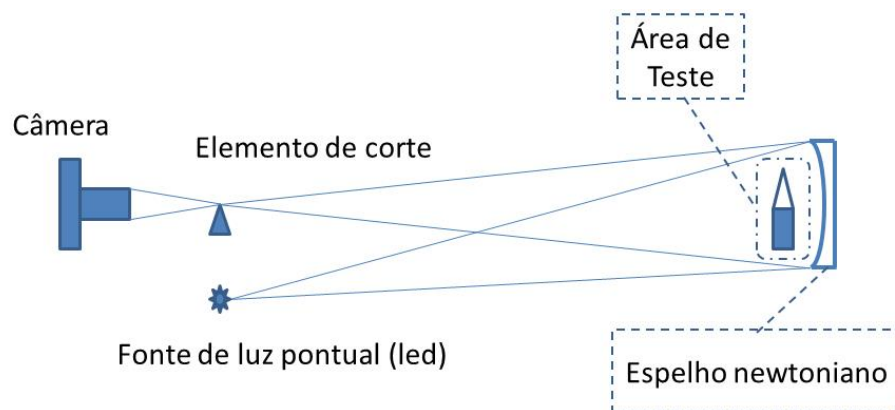


Figura 4. Diagrama da técnica do “Schlieren” (adaptado de Vieira 2005)



Figura 5. Imagem usando a técnica do “schlieren” para a chama do gás pobre.

2.5.3. Método do bico de Bunsen

A Figura 6 apresenta um esquema de um queimador tipo Bunsen, onde é possível identificar duas regiões: a chama de pré-mistura e a de difusão. A zona de pré-mistura é caracterizada por apresentar um cone bem visível que é estudado para determinar a velocidade de chama laminar, na Figura 6 é possível ver uma representação desse método. Componentes não queimados, resultantes da chama de pré-mistura, reagem com o ar do meio circundante e produzem uma forma que envolve o cone de chama, apresentando características de uma chama de difusão.

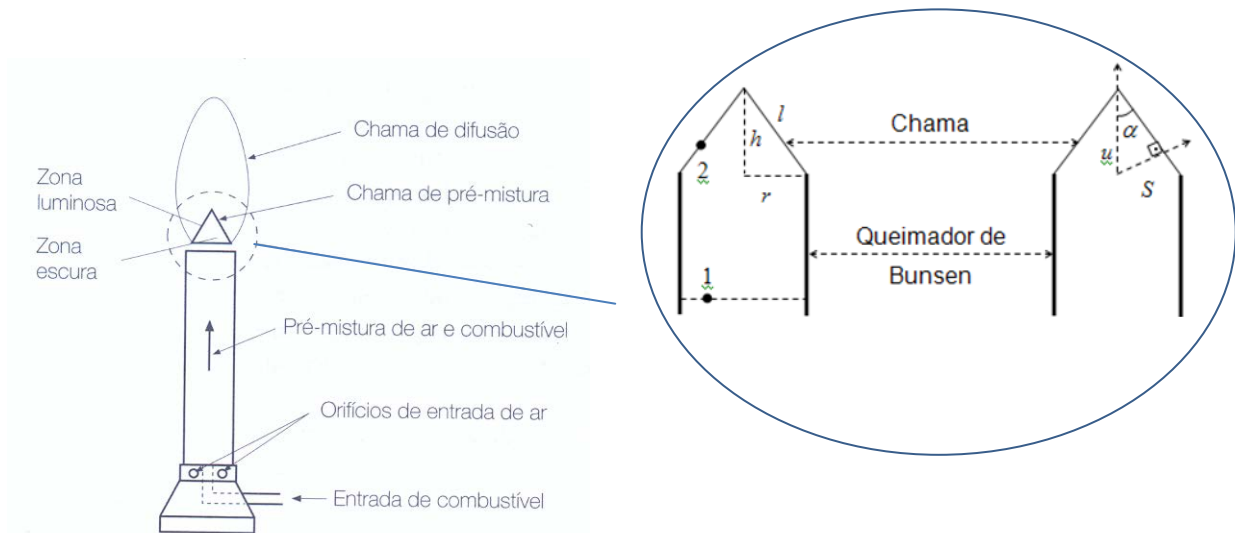


Figura 6. Esquema de um queimador de Bunsen e desenho esquemático para análise do método de determinação da velocidade de chama laminar (Coelho, 2007; Ariello, 2011.)

A velocidade e chama (S_L) pode ser obtida através da Eq. (1), e a velocidade da mistura gasosa (u) através da Eq. (2), sendo a razão entre a vazão volumétrica da mistura ($\dot{V}$) e a área do orifício do bico de Bunsen (A_q). O ângulo α é determinado utilizando-se um software comercial para desenho usando-se a imagem obtida através do registro com a técnica do “schlieren”. A vazão volumétrica da mistura é determinada somando-se os valores das vazões de ar e gás pobre.

$$S_L = u \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$u = \frac{\dot{V}}{A_q} \quad (2)$$

2.5.4. Teste com gás pobre

Para realização dos testes com o bico de Bunsen foi montado um sistema onde a vazão de gás combustível e ar pudesse ser determinada para o qual foram utilizados rotâmetros com válvulas reguladoras de vazão. Procurou-se manter a vazão de gás fixa e variar a de ar a fim de se poder obter a velocidade para uma ampla faixa de razão de equivalência (ϕ). O ar é fornecido através da utilização de um compressor de ar.

O gás pobre proveniente de um gaseificador foi utilizado para os testes no queimador Bunsen. Parte dele era enviado ao sistema de teste de chama e a outra era incinerado em um “flare”.

A chama produzida pelo queimador é registrada através de uma câmara fotográfica, sendo utilizado o registro pela técnica do “schlieren”. Após o registro, a imagem é tratada em um software comercial de desenho para determinação do ângulo do cone.

2.5.4.1. Determinação do ar necessário à queima do gás de biomassa:

O cálculo do volume de ar necessário para a queima do gás de biomassa pode ser obtido através da Eq. (3).

$$V_{O_2}^0 = 0,5([CO] + [H_2]) + \sum_i \left(m_i + \frac{n_i}{4} \right) [C_{m_i} H_{n_i}] \quad (3)$$

Como o gás é composto em média por 20% de CO, 16% de H₂ e 1,8 % de CH₄, o volume de ar teórico pode então ser calculado:

$$V_{O_2}^0 = 0,5([0,20] + [0,16]) + \left(1 + \frac{4}{4} \right) [0,018]$$

$$V_{O_2}^0 = 0,216 [Nm^3/Nm^3_{comb}]$$

O volume de ar será:

$$V_{ar}^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0,21} \quad (4)$$

$$V_{ar}^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0,21} = \frac{0,216}{0,21} = 1,03 [Nm^3ar/Nm^3comb]$$

3. RESULTADOS:

A Figura 7 apresenta a composição do gás fornecido pelo gaseificador durante os testes realizados. Nele é possível observar que a fração de CO tem um comportamento não tão contínuo ao longo do período, porém apresenta valores, em sua maior parte, acima de 20 %, como era esperado. Os valores de H₂ e CH₄ tiveram comportamento mais constante ao longo do teste e valores da ordem de 16% H₂ e 1,8 de CH₄. Usando esses valores de frações volumétricas, pode-se calcular o poder calorífico que foi de 4,9 MJ/Nm³ calculado a partir da Eq. (5).

$$PCI_g = 12,630 \cdot CO + 10,790 \cdot H_2 + 35,800 \cdot CH_4 \quad (5)$$

Na Figura 8 são apresentados os resultados obtidos para os valores da velocidade de chama para o gás pobre (SL) utilizando a técnica do “schlieren” para as diferentes vazões do gás. Nele se observa que SL assume valores desde 0,19 m/s a 0,33 m/s em função da razão de equivalência (ϕ). Também se mostra uma relação direta entre o aumento da vazão de combustível e o aumento da velocidade de chama.

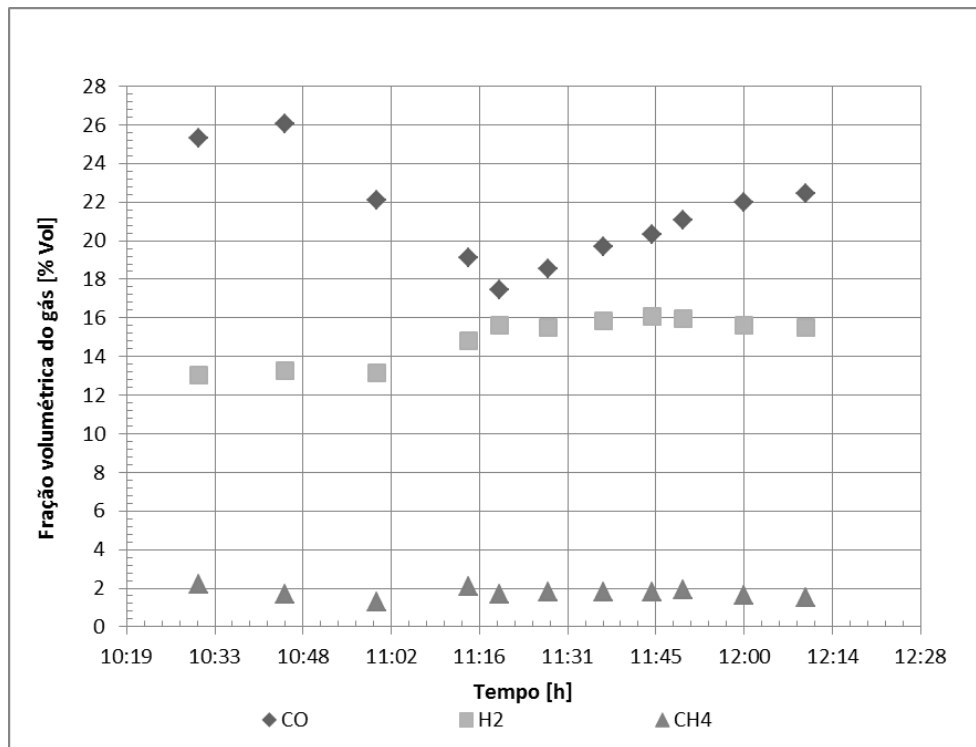


Figura 7. Fração volumétrica do gás pobre ao longo do período de testes.

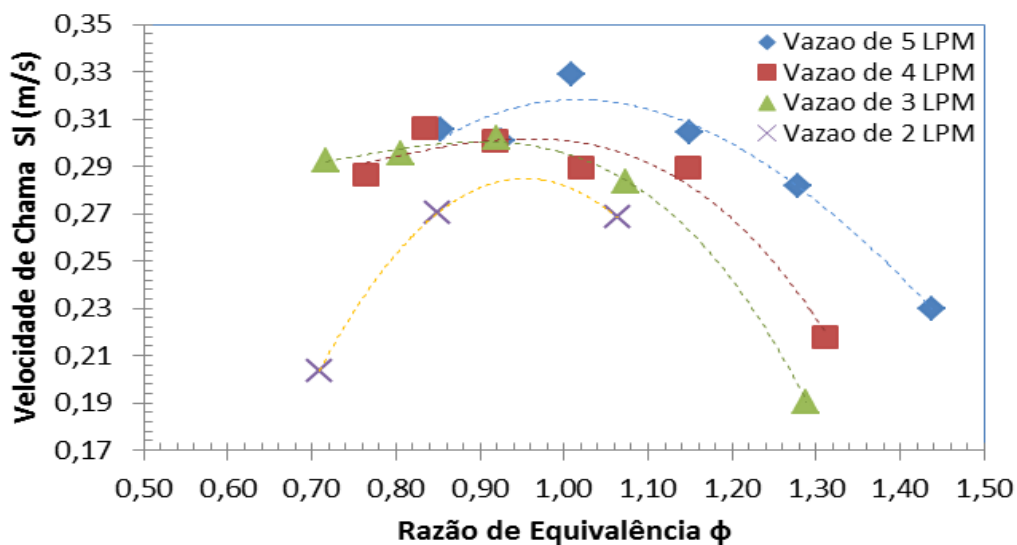


Figura 8. Velocidade chama laminar para diferentes vazões de combustíveis com relação à razão de equivalência.

Comparando os resultados obtidos com a pesquisa de Hernandez (2011), Yan (2011) e Ouimette (2009), mostrado na Fig. 9, pode-se observar que os valores de S_L , para este trabalho, são maiores, o que pode ser justificado pela composição do gás utilizado, principalmente relacionado à fração de hidrogênio, que neste trabalho é de aproximadamente 16% e no trabalho de Hernandez (2011) é de 11%, no de Yan (2011) é 12% e 10,7% no trabalho de Ouimette (2009) como pode ser verificado na Tab. 2.

Os resultados obtidos por Yan (2011) são os que mais se aproximam dos obtidos nesse trabalho devido à proximidade da composição do gás (Tab. 2).

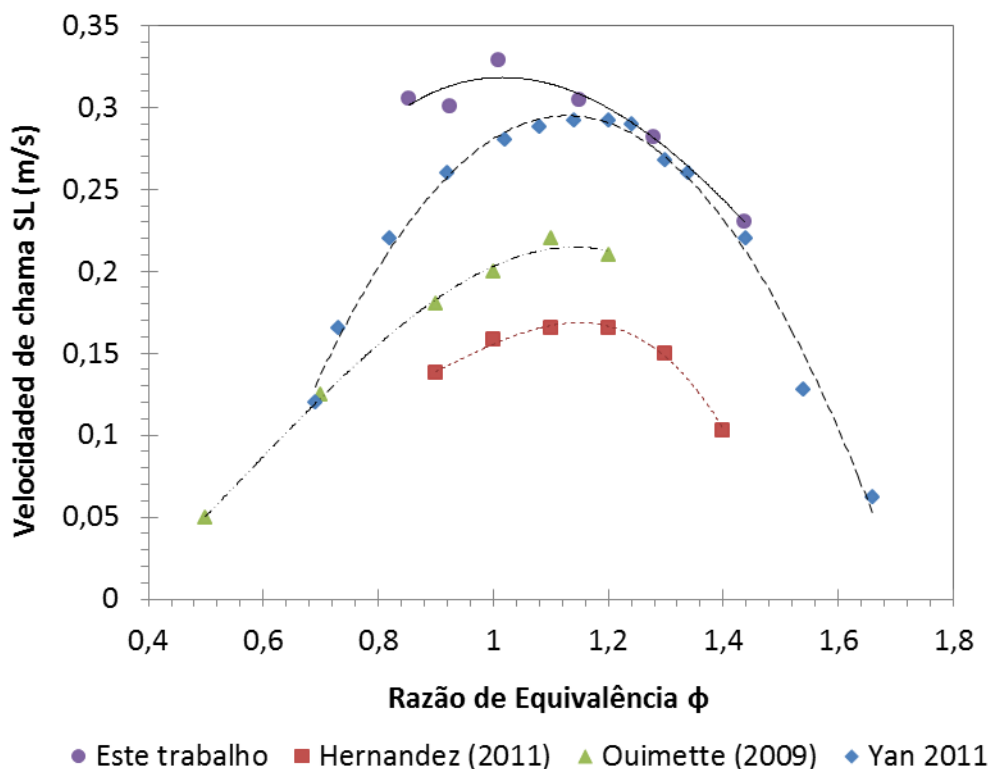


Figura 9. Velocidade de chama do gás de biomassa (comparação com trabalhos de outros autores).

Tabela 2. Comparação da composição do gás utilizado nos testes com os trabalhos de Ouimette (2009), Hernandez (2011) e Yan (2011).

Ouimette 2009		Hernandez (2011)		Yan (2011)		Este trabalho	
CO	14,2	CO	16	CO	19	CO	20
H ₂	10,7	H ₂	11	H ₂	12	H ₂	16
CH ₄	3,5	CH ₄	3	CH ₄	5,8	CH ₄	1,8
PCI [MJ/kg]	4,20	PCI [MJ/kg]	4,28	PCI [MJ/Nm ³]	5,77	PCI [MJ/kg]	4,90

4. CONCLUSÕES

A velocidade de chama laminar é uma propriedade que permite estudar os limites de inflamabilidade dos combustíveis como o gás pobre, fornecendo informações para sua manipulação segura podendo ser utilizado para projeto do mesmo e referência para o estudo em regime turbulento, que é o regime em quem se processa, realmente, a combustão.

Diferentes métodos são utilizados para o estudo determinação da velocidade de chama laminar, sendo o mais empregado o método do bico de Bunsen, por sua facilidade de implementação.

A maior dificuldade com relação ao método do bico de Bunsen está relacionada à determinação o ângulo do cone, sendo as imagens obtidas através da técnica do “schlieren” as mais adequadas por apresentar menores distorções.

As velocidades obtidas durante os testes variaram entre 0,19 a 0,33 m/s apresentando comportamento semelhante à obtidos por outros autores, porém com valores ligeiramente superior aos que realizaram testes com gás de misturas sintéticas, devido principalmente à diferença na composição em termos da fração de hidrogênio.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro e a UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá pelo fornecimento do espaço laboratorial.

6. REFERÊNCIAS

- Ariello, A. F., 2011, “Simulação de auto-ignição e propagação de chamas laminares de etanol, n-heptano e isoctano com modelos cinéticos detalhados”, Dissertação de mestrado, Paraná: UFPR.
- Belgiorno, V.; Feo, G. DE; Rocca, C. D.; Napoli, R. M. A., 2003, “Energy from gasification of solid waste”, *Waste Management*, Vol. 23, pp. 1-15.
- Bouvet, N.; Chauveau, C.; Gökalp, I.; Lee, S. Y.; Santoro, R. J., 2011, “Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen burner configuration. *International Journal of hydrogen energy*”, Vol. 36, pp. 992-1005.
- Burbano, H. J.; Pareja, J.; Amell, A. A., 2011, “Laminar velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures”. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 36, pp 3243 – 3252.
- Coelho, P.; Costa, M., 2007, “Combustão”, Edições Orion.
- Cortez, L. A B.; Lora, E. E. S.; Gómez, E. O., “Biomassa para energia”, 2009, Editora Unicamp, Campinas –SP.
- Hernandez, J.; Barba, J.; Aranda, G, 8 -10 de 2011, “Combustion characterization of producer gas from biomass gasification”, *Proceedings of the 12 th - International conference on environmental science and technology*, Rhodes, pp A729-A736, Greece.
- Kuo, K.K., 2005, “Principles of combustion”, Second edition, John Wiley & Sons inc.
- Mckendry, P., 2002, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies”, *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp 55-63.
- Munajat, N. F.; Erlich, C.; Fakhrai, R.; Fransson, T. H., 2012, “Influence of water vapour and tar compound on laminar flame speed”, *Applied Energy*. Vol. 98, pp. 114-121.
- Natarajan, J., 2008, “Experimental and numerical investigation of laminar flame speed of H₂/CO/CO₂/N₂ mixtures”. Tese de doutorado, Georgia Institute of technology.
- Ouimette, P.; Seers, P., 2009, “Numerical comparison of premixed laminar flame velocity of methane and wood syngas”, *Fuel*, Vol. 88, pp. 528-533.
- Ragland, K. W.; Brynden, K. M., 2011, “Combustion Engineering”, Second edition, CRC Press.
- Sales, C. A. V. B.; Maya, D. M. Y.; Lora, E. E. S.; Jaén, R. L.; Reyes, A. M. M. Gonzalez, A. M. Andrade, R. V.; Martinez, J. D., 2017, “Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two stage downdraft reactor by using of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents”, *Energy conversion and Management*, Vol. 145, pp 314 – 323.
- Song, W. S.; Vu, T. M.; Park, J.; Kwon, O. B.; You, H. S.; Yun, J. H., 2011, “Measurements of laminar burning velocities and flame stability analysis of biomass derived gas-air premixed flames”, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia Italy.
- Vieira, M. M., 2005, “Estudo experimental da evaporação de jatos de isso-octanos superaquecido”, Tese de doutorado, São Paulo: EPUSP.
- Yan, B.; Wu, Y.; Liu, C.; Yu, J. F.; Li, B.; Li Z. S.; Chen, G.; Bai, X . S.; Alde'n, M.; Konnov, A. A., 2011, “Experimental and modeling study of laminar burning velocity of biomass derived gases/air mixtures”, *International journal of hydrogen energy*, Vol. 36, pp. 3769 – 3777.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LAMINAR FLAME VELOCITY ANALYSIS OF POOR GAS FROM BIOMASS GASIFICATION.

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

Laura Andrea Cortabarría Castañeda, cortabarrialaura@gmail.com¹

Diego Mauricio Yepes Maya, diegoyepes@unifei.edu.br¹

Paulo Sérgio Pedrosa Corrêa Jr, paulocet@yahoo.com.br¹

Luís Roberto de Melo e Pinto, yogmello@yahoo.com¹

Electo Eduardo Silva Lora, electo@unifei.edu.br¹

Cristina Aparecida Vilas Bôas de Sales Oliveira, cris.oliveira@yahoo.com.br²

Bruno Augusto Pinto, brunoaugp@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG, CEP 37500-903

² UNA Pouso Alegre, Rua João Basílio, 420, centro, Pouso Alegre – MG.

³Universidade Santo Amaro UNISA, Rua Humboldt, 29 Santo Amaro, SP, CEP 04746-000

Abstract. *The poor gas it is a renewable fuel that may be used as substitute to fossil fuels in different applications. Obtained from gasification process this combustible can be applied in spark engines, gas turbines or some kinds of burns. The characteristics the producer gas has been studied for different authors, however generally they used mixtures of synthetic gases. In this paper is present a study of a laminar flame velocity of a poor gas obtained from a gasification process of the eucalyptus used a downdraft gasifier. The method studied was the Bunsen burner and the visualization technic that has been use to register the flame was the schlieren. The Laminar flame velocity obtained for better conditions was 0,33 m/s.*

Keywords: *gasification, flame velocity, poor gas, biomass, schilieren*