

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA
EXPERIMENTAL PARA CALCULAR A VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR NA
QUEIMA DE PREMISTURAS DE AR / GÁS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA**

Autor: Laura Andrea Cortabarría Castañeda.

Orientador: Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade.

Itajubá, 2 de junho de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA
EXPERIMENTAL PARA CALCULAR A VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR NA
QUEIMA DE PREMISTURAS DE AR / GÁS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA**

Autor: Laura Andrea Cortabarría Castañeda.

Orientador: Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade.

Curso: Mestrado em Engenharia de Energia

Área de Concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia

Itajubá, 2 de junho de 2017

M.G - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROJEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA
EXPERIMENTAL PARA CALCULAR A VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR NA
QUEIMA DE PREMISTURAS DE AR / GÁS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA**

Autor: Laura Andrea Cortabarría Castañeda.

Orientador: Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade.

Composição da Banca Examinadora

Prof. Dra. Cristina Vilasboas - USP

Prof. Dra. Regina Mambeli – IRN/UNIFEI

Prof. Dr. Rubenildo Viera Andrade - NEST/UNIFEI

Agradecimentos

À Deus, por me dar força nos momentos difíceis.

À CAPES, por meio do programa de desenvolvimento social, pelo apoio financeiro.

À FAPEMIG, também pelo apoio financeiro para os desenvolvimentos experimentais.

À UNIFEI, e seu programa de pós-graduação de Engenharia de Energia, pela possibilidade de cursar o mestrado.

Ao Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade, definitivamente sem sua ajuda não teria terminado, obrigada pela oportunidade, nunca vou esquecer das inúmeras coisas que me ensinou nestes dois anos. Sinceramente muito obrigada.

A banca Avaliadora, Prof. Dr. Electo Silva, a Prof. Dra. Regina Mambelli, Prof. Doutora Cristina Vilas Boas por seu tempo, usado para revisar este trabalho, espero seja de seu interesse.

Ao NEST, por possibilitar a realização deste trabalho.

Aos meus parentes, pelo apoio desde casa nos momentos mais duros.

Ao Julián, sem você nunca tivesse sido possível.

Aos meus companheiros do laboratório Paulo, Luisão, Bruno e os orientados de TFG do Professor Rubenildo, pela sua ajuda para os testes. Valorizo muito seu aporte no meu trabalho.

Aos meus amigos queridos Germán, Michael, Lucho Tolucito, Pedro, Melissa e pelo apoio e acompanhamento.

Ao Professor Arnaldo e a Senhora Esther, pelo conselho e boa vontade para me ajudar em momentos difíceis.

Obrigada.

La fuerza más difícil de vencer, la resistencia al cambio.

El autor.

Resumo

CORTABARRIA, Laura Andrea, **Projeto e implementação de uma metodologia experimental para calcular a velocidade de chama laminar na queima de pré-misturas de ar / gás de gaseificação de biomassa**. 2017. 138p. Dissertação. (Mestrado em Ciências da Engenharia de Energias) - Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia – UERNE, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia que avalie a velocidade de chama por meio de um planejamento experimental usando o método do Bico de Bunsen e a metodologia de visualização “schlieren” em um gás produzido através da gaseificação de biomassa usando ar como agente de gaseificação.

A velocidade de chama é importante para prever o comportamento da combustão de acionadores mecânicos.

A avaliação foi dividida em dois cenários, o primeiro foi um planejamento experimental padrão com Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) a fim de validar a metodologia e os materiais necessários para executar a pesquisa. O segundo cenário, o objeto de estudo, gás de biomassa, sendo o parâmetro de avaliação a velocidade de chama em uma queima controlada mudando a razão de equivalência (ϕ) na mistura combustível, as amostras foram divididas em intervalos com ϕ parecidos usando uma análise de frequência estatístico, a velocidade chama máxima no intervalo mais próximo da estequiometria, de $0,94 < \phi < 1,16$ obtendo 0,30 m/s como média e apresentou o pico de velocidade de 0,33m/s no ponto ϕ 1,01.

Além disso, foi feita uma análise de correlação entre a composição e velocidade de chama, mostrando uma relação linear negativa entre o conteúdo de CO e H₂, da ordem do 49,7%, o que levou a tomar em consideração o coeficiente de H₂/CO como um fator importante na velocidade de chama, assim, em testes com amostras selecionadas as misturas com maiores relações de H₂/CO (0,60 no estudo) maiores velocidades de chama, na ordem de 0,27 m/s

O desvio padrão destes testes teve um coeficiente de variabilidade de 2% entre os dados.

Palavras Chaves: Velocidade da chama, Biomassa, Combustão, Gaseificação com ar, Planejamento Experimental, Técnicas de visualização.

Abstract.

CORTABARRIA, Laura Andrea. **Design and Implementation of experimental methodology to calculate the flame speed from burned Biomass Gasification Gas/ Air premixtures.** 2017. 143f. Dissertation. Master in Science of Energy Engineering - Rational use of Natural Resources and Energy Exploration - UERNE, Itajubá Federal University, Itajubá.

This work aims to develop a methodology to evaluate flame velocity by means of a design of experiment using the Bunsen burner configuration and the “Schlieren” visualization technique in a gas produced through biomass gasification using air as a gasification agent, this is called as poor gas.

Flame velocity is an important parameter to predict the combustion performance in mechanical actuators.

The evaluation was divided into two stages, first a design of experiment with Liquefied Petroleum Gas (LPG), used as a reference to validate this method and the materials required for executing the research. Afterwards in the second stage, the method was replicated in the subject of study, biomass gas, which is the evaluative parameter used to measure the flame velocity in a controlled burning, changing the equivalence ratio (ϕ) on the combustible mixture. The samples were divided into intervals with similar ϕ , using a statistical analysis of frequency. The maximum flame velocity is in the nearest interval on the stoichiometric condition, of $0,94 < \phi < 1,16$, 0,30 m/s in average and presented a velocity peak of 0,33 m/s when ϕ 1,01.

The results showed a negative linear correlation between the amount of CO and H₂ of 49,7%, this is attributed to the relationship between the compounds of the reaction during the gasification process. This interaction shows how - the results with the highest concentration of H₂/CO (0,60 on this work), present faster flame velocities, above 0,27 m/s in selected samples. The standard deviation of these results had a variability coefficient of 2%.

Keywords: Flame velocity, Biomass, Combustion, Gasification with air, Design of experiments, Visualization techniques

SUMÁRIO

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos.	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos.	19
1.2 Justificativa.	20
1.3 Conteúdo do trabalho.	23
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Panorama atual das energias renováveis no Brasil.	24
2.2 Gaseificação de biomassa.	25
2.3 Conceitos Básicos de combustão.	30
2.3.1 Propriedades dos combustíveis gasosos.	33
2.4 Velocidade de Chama	36
2.4.1 Métodos para Calcular a Velocidade de Chama.	40
2.5 Métodos óticos para visualização de Imagens.	46
2.5.1 “Shadowgraph”.	46
2.5.2 “Schlieren”.....	47
2.6 Premissas derivadas da pesquisa do estado da arte.	48
CAPITULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 Metodologia Utilizada.	50
3.1.1 Aspectos gerais do projeto.....	50
3.1.2 Parâmetros iniciais para o experimento padrão.....	53
3.1.3 Parâmetros iniciais para o planejamento objeto de estudo.....	56

3.1.4	Planejamento do experimento padrão.	58
3.1.5	Considerações sobre o gás pobre.....	61
3.2	Descrição dos Equipamentos.	65
3.2.1	Queimador.	65
3.2.2	Fornecimento de ar.....	71
3.2.3	Fornecimento de gás GLP e biomassa.....	72
3.2.4	Composição da Bancada de testes.	77
3.2.5	Sistema de medição de vazão.....	78
3.2.6	Sistema de aquisição de imagens.	79
CAPITULO 4: RESULTADOS.....		81
4.1	Testes com o experimento Padrão.	81
4.1.1	Prova de conceito.	81
4.1.2	Resultados dos Testes com Planejamento Padrão.	83
4.2	Testes com o experimento objeto de estudo.	89
4.2.1	Prova de conceito com o gás objeto de estudo.	89
4.2.2	Resultados dos Testes com o Gás Objeto de Estudo.....	94
CAPITULO 5: DISCUSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.		98
5.1	Análise de Incerteza	98
5.1.1	Planejamento padrão.....	98
5.1.2	Planejamento com o gás objeto de estudo.....	100
5.2	Validações e Discussão dos Resultados.	105
5.2.1	Comparação dos resultados com a literatura e análise de sensibilidade para o gás padrão.....	105
5.2.2	Comparação dos resultados com a literatura e análise de sensibilidade para o gás objeto de estudo.....	110
CAPITULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		119
6.1	Conclusões.	119

6.2	Recomendações para trabalhos futuros.	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	ANEXOS.....	130
8.1	ANEXO A: COMPARACÃO DAS TECNOLOGIAS DE AQUISICAO DE IMAGENS.	130
8.2	ANEXO B: RESUMO DO ESTADO DA ARTE.	132
8.3	Anexo C: Planos dos queimadores de pré – mistura.	139
8.3.1	Queimador Horizontal com rasgo retangular de 1/2”	139
8.3.2	Queimador Vertical de 1/2” de diâmetro externo de 9 mm de diâmetro interno.	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Total de Energia Primária Subministrada ao Nível Mundial desde 1990 – 2015 segundo do tipo de Combustível (Mtep).....	24
Figura 2-2 Produtos da Conversão Térmica de Biomassa.	27
Figura 2-3 Gaseificador de Leito Fixo a. Contracorrente b. Co-corrente.	29
Figura 2-4 Chama Laminar de Pré-mistura.....	32
Figura 2-5. Diagrama esquemático de uma chama de pré-mistura laminar estabilizada.....	37
Figura 2-6 Diagrama de Estabilidade do gás produzido por gaseificação de biomassa com ar.	39
Figura 2-7 Cone da chama gerada por um queimador de Pré-mistura Laminar tipo Bunsen adaptado com entradas de ar e gás reguladas.	40
Figura 2-8 Imagens da frente de chama de uma mistura de H ₂ e ar se propagando em um queimador esférico à pressão constante, sendo em (a) a frente de chama após 1ms, (b) após 2 ms e (c) após 3 ms.....	43
Figura 2-9 Método do Tubo do Vidro.....	44
Figura 2-10 Montagem de Shadowgraph Básico.	46
Figura 2-11 Plano Esquemático para Captura e visualização de objetos, baseado em Schlieren.	47
Figura 3-1 Metodologia do Trabalho.....	52
Figura 3-2 Planos do queimador de Ø 3/8”.....	66
Figura 3-3 – Planos do queimador de Ø 1/2”.....	66
Figura 3-4 – planos dos queimadores com câmara de refrigeração.....	67
Figura 3-5 – Chama não laminar vista desde o queimador horizontal.	68
Figura 3-6 - Prova de conceito com queimador de diâmetro interno de 6mm e 400 mm de comprimento. (a). Chama difusiva (b) Deslocamento de chama.	68
Figura 3-7 - Vista em corte do queimador com câmara de pré-mistura e sistema de refrigeração.....	69
Figura 3-8 - Vistas da câmara de pré-mistura (peça 1).	69
Figura 3-9 - Chapa com orifício roscado NPT de 1/4" para acoplamento de niple para entrada de ar e gás (peça 2).	70
Figura 3-10 - Tubulação externa de 400 mm de comprimento e diâmetro externo de 1/2”. (Peça 3).....	70

Figura 3-11 - Barra chata do aço para diminuir a velocidade dos fluidos e facilitar o fluxo laminar da mistura (peça 4).....	71
Figura 3-12 Peça 6: Fechadura do sistema de refrigeração para queimador de 1/2”	71
Figura 3-13 Compressor de Ar para a Bancada.....	72
Figura 3-14 Botijão de gás de 13 kg para os testes padrão.	73
Figura 3-15 Gaseificador de Leito Fixo Co-Corrente.....	74
Figura 3-16 Sistema de Limpeza de Gases na Saída do Gaseificador.....	75
Figura 3-17 Calomat 6 e Ultramat 23. Instrumentos de medição de Teor de Gases na Saída do Gaseificador.....	75
Figura 3-18 Montagem do processo de gaseificação - Tanque de armazenagem de gás e gaseificador de leito fixo.....	76
Figura 3-19 Montagem de Schlieren Direito e Shadowgraph.....	77
Figura 3-20 Montagem com bancada e Schlieren.	78
Figura 3-21 Rotômetros Usados para o Experimento	78
Figura 3-22 Montagem Schlieren direto.	80
Figura 4-1 Comparativo observação direta, shadowgraph, schlieren.....	81
Figura 4-2 - Valores de velocidade de chama laminar para o GLP.....	82
Figura 4-3 - Velocidades de chama usando observação direta	85
Figura 4-4 Velocidade de Chama Usando Shadowgraph	87
Figura 4-5 Velocidade de chama calculada através da tecnica“Schlieren”	88
Figura 4-6 – Fração volumétrica do gás para os testes realizados.....	90
Figura 4-7 – Temperatura no leito próximo a parede interna do reator.....	91
Figura 4-8 – Gráfico com valores de S_L para diferentes valores de vazão de gás pobre.....	94
Figura 4-9 – Gráfico com valores de S_L para diferentes valores de vazão de gás pobre método “schlieren”	95
Figura 4-10 Velocidade de chama média para o planejamento com gás de biomassa.	97
Figura 5-1 Comparação dos três métodos de aquisição de imagens para o GLP.....	98
Figura 5-2 Mediana e desvio padrão dos intervalos de frequência da velocidade de chama.	102
Figura 5-3 - Comparação do método Schlieren com os resultados da literatura.....	106
Figura 5-4 Gráfico de tornado para o gás padrão.	108
Figura 5-5 Diagrama spider da influência dos parâmetros escolhidos na velocidade de chama.	109

Figura 5-6 Aumento da velocidade de chama quando a pressão de entrada do ar no queimador varia.....	110
Figura 5-7 Comparação dos resultados dos testes do gás de biomassa com a literatura.	111
Figura 5-8 Análise de tornado das variáveis associadas ao gás de biomassa.	112
Figura 5-9 Correlação entre o CO e H ₂	115
Figura 5-10 Efeito da temperatura de reação na composição do gás combustível utilizando um modelo heterogêneo. Reproduzida de Cousins (1978). A theoretical study of wood gasification processes. New Zealand Journal of Science, 21(2):175-183.....	117

LISTA DE TABELAS.

Tabela 2-1 Adaptação da Distribuição da Oferta Interna de Energia do Brasil.....	25
Tabela 2-2 Composição dos Combustíveis de Baixo poder Calorífico de acordo com sua fonte geradora segundo diferentes autores na literatura (% Vol.).....	26
Tabela 2-3 Critérios de caracterização do gás de biomassa produto de gaseificação	29
Tabela 2-4 Aspectos de maior relevância da metodologia do Bico de Bunsen	41
Tabela 2-5 Aspectos de maior relevância da metodologia da chama esférica.....	42
Tabela 2-6 Aspectos de maior relevância da metodologia da bolha de sabão.....	44
Tabela 2-7 Resumo das Metodologias de Cálculo de Velocidade de Chama Laminar.....	45
Tabela 3-1 Componentes metodológicos da pesquisa do planejamento padrão	51
Tabela 3-2 Componentes metodológicos da pesquisa do planejamento com o gás de biomassa	51
Tabela 3-3 - Padrões de composição da mistura	55
Tabela 3-4 Composição das amostras para a queima controlada do gás objeto de estudo.....	56
Tabela 3-5 - Níveis projetados do Planejamento Experimental para o GLP	58
Tabela 3-6 vazão de entrada do ar das amostras.	59
Tabela 3-7 - Casos do planejamento experimental.....	59
Tabela 3-8 – Parâmetros operacionais.	60
Tabela 3-9 Níveis projetados do planejamento experimental do gás de biomassa	61
Tabela 3-10 Casos do Planejamento do Gás Objeto de Estudo.....	62
Tabela 3-11 Teor de CO, H ₂ e CH ₄ da Amostra 1.	63
Tabela 3-12 Teor de CO, H ₂ e CH ₄ da Amostra dfa 2.	64
Tabela 3-13 Especificações dos compressores.....	72
Tabela 3-14 Análise elementar, composição imediata e PCS da biomassa de eucalipto	73
Tabela 3-15 Parâmetros Nominais do Gaseificador	74
Tabela 3-16 Composição volumétrica do gás obtido.....	76
Tabela 3-17 Parâmetros Operacionais dos Rotômetros	79
Tabela 3-18 Equipamentos Precisos para Montagem de Schlieren Direto, Shadowgraph Básico e Observação direta.	80
Tabela 4-1 – Dados da prova de conceito	82
Tabela 4-2 Análise de correlação linear entre a velocidade de chama e o ângulo do cone	83
Tabela 4-3 Velocidade de Chama Calculada com Observação Direta	84
Tabela 4-4 Velocidade de chama calculada com “shadowgraph”	86

Tabela 4-5 Velocidade de chama calculada pelo método Schlieren.....	87
Tabela 4-6 Resultado a partir do registro direto da prova de conceito.	92
Tabela 4-7 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 2,11 l/min de gás. 92	
Tabela 4-8 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 3,18 l/min de gás. 93	
Tabela 4-9 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 4,24 l/min de gás. 93	
Tabela 4-10 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 5,30 l/min de gás	94
Tabela 4-11 Resultados médios obtidos para o gás pobre a partir da utilização do método “schlieren”	96
Tabela 5-1 Resultados de toma de amostras com “shadowgraph”	99
Tabela 5-2 Resultados da aplicação do método da observação direta	99
Tabela 5-3 Resultados do desvio padrão pelo método “Schlieren”	100
Tabela 5-4 Medidas de tendência central e de dispersão da amostragem.....	101
Tabela 5-5 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,73.....	103
Tabela 5-6 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,84.....	103
Tabela 5-7 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,92.....	103
Tabela 5-8 Características do segundo intervalo para amostras com ϕ média de 1,04.	104
Tabela 5-9 Características do segundo intervalo para amostras com ϕ média de 1,15.	104
Tabela 5-10 Características do terceiro intervalo para amostras com ϕ média de 1,28.	104
Tabela 5-11 Características do terceiro intervalo para amostras com ϕ média de 1,37.	104
Tabela 5-12 Características do quarto intervalo para amostras com ϕ média de 1,53.	105
Tabela 5-13 Composições dos Gases com Maiores Velocidades de Chama em Razoes de Equivalência superiores a 1.....	106
Tabela 5-14 Cenários propostos para a análise de sensibilidade de gás padrão.....	109
Tabela 5-15 Fração volumétrica de compostos principais no combustível.	111
Tabela 5-16 Evolução da fração volumétrica dos compostos no processo de gaseificação classificada por hora.	113
Tabela 5-17 Medidas de dispersão e tendência central das amostras do gás de biomassa. ...	114
Tabela 5-18 Avaliação de correlação linear dos compostos do gás de biomassa usando SPSS.	114
Tabela 5-19Análise de correlação incluída os percentuais de inertes e oxigênio no gás de biomassa.	116

Tabela 5-20 Comparação da composição do gás de biomassa vs. a velocidade de chama e o poder calorífico do gás.....	117
Tabela 8-1 Comparação de Metodologias de Aquisição de Imagens.....	130
Tabela 8-2. Resumo estado de arte.....	132

SIMBOLOGIA.

LETRAS LATINAS

Re	Número de Reynolds.
D	Diâmetro da tubulação.
A_q	Área do queimador.
A_c	Área lateral da chama.
V_u	Velocidade dos gases não queimados.
S_L	Velocidade de chama laminar.
R_f	Raio instantâneo de chama.
R	Raio da bolha.
r	Raio da frente da chama.
n	Tamanho da amostra.
Z	Desvio padrão.
e	Erro máximo do estudo.
p	Heterogeneidade da amostra.

LETRAS GREGAS

ρ	Massa específica.
v	Velocidade do escoamento.
ϕ	Razão de equivalência.
α	Ângulo do cone.
γ	Coeficiência isentrópico.
λ	Relação ar/combustível.

SIGLAS

PIB Produto interno bruto.

OTEP Oferta total de energia primaria.

IEA International Energy Agency.

MACI Motores alternativos de combustão interna.

GNS Gás natural sintético.

OIEE Oferta interna de energia elétrica.

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO

A participação das fontes renováveis de energia na matriz energética mundial é significativamente baixa quando comparada com fontes fósseis; indicadores como a relação da oferta primária total de energia versus o acréscimo do PIB (representada no indicador OTEP/PIB)¹ se encontram na ordem de -28% segundo o IEA, (2015b). Isso demonstra que enquanto a população, a qualidade de vida e o consumo de energia aumentaram, a representação da oferta de energias renováveis na matriz energética mundial diminuiu.

Além disso, este acréscimo no consumo de energia de origem fóssil impulsionou as emissões de CO₂ liberadas na atmosfera, aumentando só no ano de 2013 em 9% às emissões de CO₂ procedentes da queima de combustíveis segundo o informado pela IEA, (2015).

Neste contexto, a IEA (2011) estipulou uma necessidade de uma redução de 60% da quantidade de emissões de carbono que forneçam o total da energia primária, sendo que este objetivo deve ser atingido para o ano 2050. Isto impulsionou a exploração de muitas opções de fornecimento de combustíveis não poluentes e de boa qualidade, a fim de contribuir no aumento da oferta de energias renováveis.

A biomassa é uma fonte renovável de energia e seu uso, atualmente, tem se intensificado, principalmente no Brasil, como pode ser constatado pela crescente utilização do etanol hidratado como combustível na frota de veículos nacionais, sendo essa apenas uma das possibilidades para sua aplicação. Ela pode ser queimada diretamente em processos de combustão como na conversão em energia elétrica através de um ciclo Rankine, ou ainda, ser convertida em gás combustível em processos como a gaseificação, para aplicação em motores de combustão interna ou para obtenção de gás de síntese para conversão em, por exemplo, combustíveis de segunda geração. Deste modo, pode ser explorado e aproveitado o poder calorífico destes materiais, os quais são usados como alternativa para responder à esta demanda por energias limpas.

Cada mistura de gases tem propriedades únicas, com relação ao gás que provem do processo de gaseificação, ele muda dependendo da matéria prima utilizada, o tipo de reator e a manipulação das variáveis envolvidas no processo termoquímico. Estudar, conhecer e projetar metodologias para entender estes fenômenos e a relação destas propriedades é necessário para

obtenção de gás de melhor qualidade e conseqüentemente melhor desempenho das máquinas e motores.

Uma das propriedades mais estudadas é a velocidade de propagação da chama do combustível, que determina a estabilidade da combustão, pois calcula sua taxa de queima e ajuda a garantir um fornecimento de energia constante; este critério é usado para validar o uso de combustíveis alternativos em processos industriais ou de conversão energética.

No presente trabalho, tem-se como objetivo projetar uma metodologia experimental para calcular a velocidade de queima de um gás produto de gaseificação de biomassa quando é submetido a uma reação de combustão com diferentes vazões de ar/combustível.

Visando a avaliar este fenômeno, foi desenvolvido um planejamento experimental e uma metodologia de pesquisa baseada no método do Bico de Bunsen, em que o critério de avaliação é o ângulo formado entre a frente da chama estável e pré-misturada e a base do bico, o que também pode ser definido como ângulo resultante da união da componente escalar do movimento dos gases não queimados e a componente normal da velocidade de expansão dos gases queimados. A medida do seno desse ângulo multiplicado pela velocidade da mistura não queimada fornece como resultado, a velocidade de chama da mistura.

O combustível usado nesta pesquisa foi gás produzido na gaseificação de madeira de eucalipto, sendo seus resultados comparados com um planejamento padrão de queima de uma mistura de Ar/GLP.

A caracterização deste tipo de gás ainda não foi feita na literatura e é de grande importância para seu controle operacional. Ao final deste trabalho pretende-se contribuir para a formação do estado da arte das características dos gases provenientes de gaseificação de biomassa, fornecendo uma metodologia que avalie a velocidade de chama de gases não caracterizados na literatura na literatura, quando o gaseificador está operando, e que considere no caso deste trabalho a razão de equivalência para caracterizar a velocidade de chama laminar na queima de misturas Ar/Gás, quando variam as condições operacionais ou a razão de equivalência.

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivo geral.

Projetar e desenvolver uma metodologia que avalie experimentalmente a velocidade da chama que provem da queima de um gás de biomassa, produzido em um gaseificador de leito fixo tipo co-corrente.

1.1.2 Objetivos específicos.

- Revisão do marco teórico e do estado da arte da velocidade de chama laminar.
- Desenvolver um planejamento experimental de um fator (a relação de ar/combustível), com os parâmetros necessários para calcular a velocidade de chama de um gás produto de gaseificação de biomassa, partindo de um planejamento com um gás padrão, gás liquefeito de petróleo (GLP) que valide os resultados da metodologia na literatura.
- Projetar, dimensionar e construir uma bancada para medir velocidade de chama laminar do gás padrão e o gás de biomassa e validar a influência dos parâmetros contemplados no planejamento experimental.
- Testar os gases envolvidos na pesquisa, comparar o comportamento da velocidade de chama do gás de biomassa com o gás padrão quando se altera a relação de ar/combustível na combustão em um processo de queima controlada pelo método do Bico de Bunsen.
- Validar os resultados estatística e teóricos com estudos similares na literatura e por meio de uma análise de incerteza.

1.2 Justificativa.

O combustível produto da gaseificação de biomassa pode ser utilizado em diferentes equipamentos, como é o caso das máquinas térmicas como turbinas a gás (TG) ou também em motores alternativos de combustão interna (MACI), aplicados na conversão de potência. Também, é possível obter álcool, hidrogênio, amônia e GNS (Gás Natural Sintético), além de hidrocarbonetos com características semelhantes aos combustíveis líquidos disponíveis comercialmente, como a gasolina e diesel, entre outros compostos, (SILVA et al. 2012). Esta opção poderia substituir os combustíveis fósseis; contudo, atualmente a informação sobre o comportamento da combustão deste tipo de combustíveis é incipiente e precisa ser aprofundada, a fim de poder ser usada em uma escala industrial.

A taxa da queima destes gases é um fenômeno expresso por meio de uma propriedade única para cada mistura, conhecida como a velocidade de chama, definido por Londoño; López; Cadavid. (2011), como o processo de liberação da energia armazenada no combustível, esta propriedade permite prever o comportamento da combustão e projetar dispositivos de maior eficiência e confiabilidade, e assim, solucionar modelos teóricos e problemas práticos na utilização dos gases.

Também, segundo Orrego (2012), permite analisar a estabilidade da queima e desenvolver estratégias mais eficientes e seguras para o controle e uso dos equipamentos de combustão evitando fenômenos não desejáveis como toxicidade em ambientes fechados e possibilidade de detonações fortes.

A velocidade de chama é comumente analisada teórica e experimentalmente partindo de pré-misturas (quando o combustível e comburente foram misturados antes da queima). Segundo o Orrego (2012), também são usadas como pontos de referência chamas laminares, obedecendo ao critério do número de Reynolds, pois estas chamas são mais estáveis e são úteis para projetar modelos que preveem o comportamento dos combustíveis. Por exemplo, no projeto de queimadores ou câmaras de combustão é necessária à obtenção de chamas estáveis, que garantam a eficiência e segurança do funcionamento dos equipamentos.

As técnicas para o estudo da velocidade da propagação da chama para misturas não caracterizadas na literatura como o caso do gás de biomassa, são estudadas por meio da alternativa experimental. Porém, existe na literatura um método normalizado para sua

medição. Assim, segundo Benjumea et al. (2004), o que pode ser usado para analisar estes fenômenos são um conjunto de metodologias, que se diferenciam na geometria das chamas geradas e no tipo de interação da chama com o queimador. Neste trabalho foi usada a metodologia do Bico de Bunsen, levando em consideração a metodologia de planejamento experimental de um fator por vez para desenvolver os testes e uma metodologia de aquisição de imagens chamada “Schlieren” que foi usada como suporte para o estúdio.

Finalmente, a importância deste trabalho poderia ser resumida a segundo os seguintes critérios:

- **Impactos Acadêmicos:**

É importante destacar o componente inovador deste trabalho, mesmo que a metodologia experimental do Bico de Bunsen para calcular a velocidade de deflagração laminar em chamas de pré-mistura já tenha sido amplamente desenvolvida, foi pouco utilizada em um gás produto da gaseificação. Pesquisas de graduação estudaram sobre a velocidade da queima de propano ou butano, trabalhos em nível de mestrado pesquisaram sobre as propriedades de misturas de gases feitas no laboratório variando os conteúdos de metano, hidrogênio ou a relação de Ar/Combustível, trabalhos de doutorado fizeram pesquisa sobre a velocidade de chama de misturas feitas no laboratório de H₂, CO, CO₂, N₂ e compararam seus resultados com modelos matemáticos ou softwares. Porém, até então não foi feita a análise sobre gás produto de gaseificação diretamente, usando as ferramentas ilustradas neste trabalho.

Além disso, mesmo que atualmente o uso desta metodologia apresente algumas imprecisões devido aos fenômenos óticos da visualização da chama, o trabalho oferece um valor agregado, adicionando o uso das metodologias “*schlieren*” e “*shadowgraph*”, as quais aumentam a confiabilidade do estudo, diminuindo seu erro experimental.

Os resultados do projeto contribuem para a formação de um estado da arte sobre propriedades de gases de biomassa e ao desenvolvimento de novas pesquisas nesta área.

- **Aspectos ambientais:**

Aumentando o uso da gaseificação como opção alternativa de geração de energia, serão reduzidas as emissões de CO₂ e outros agentes poluentes; além disso, o aproveitamento da madeira de Eucalipto (combustível na gaseificação), a segunda mais produzida no Brasil com

fins industriais, é um fator a considerar pois o uso desta matéria prima de alta disponibilidade e de fácil obtenção e possui boas propriedades como fonte de energia.

- **Aspectos sociais:**

A matéria prima do gás de biomassa por sua disponibilidade permanente e sua fácil obtenção e baixo custo, caracterizada corretamente poderia contribuir à demanda por energia em comunidades isoladas através da queima direta do gás em motores de combustão interna, aumentando a eficiência do uso da madeira sendo gaseificada.

1.3 Conteúdo do trabalho.

No *capítulo 1* são apresentados os aspectos introdutórios da pesquisa objeto de estudo, sua importância, os objetivos e seu conteúdo.

A partir do *capítulo 2*, encontra-se a revisão da bibliografia usada como referência no trabalho. Nesta parte são expostos os fundamentos teóricos e as pesquisas na área, assim como o estado da arte com as principais contribuições no tema da pesquisa. Inicialmente, é mostrado o panorama atual das energias renováveis no Brasil e depois, são abordados conceitualmente os temas de biomassa, gaseificação, combustão e combustíveis, propriedades dos combustíveis, velocidade de chama e os métodos para calculá-la e por último, os métodos de visualização de imagens, ferramentas complementares desta pesquisa.

O *capítulo 3*, tem como objetivo apresentar a metodologia e os materiais utilizados na avaliação experimental da velocidade de chama gerada por um gás produto de gaseificação a partir de um gaseificador de leito fixo tipo co-corrente, apresenta – sem os planejamentos experimentais projetados e a bancada feita a fim de calcular a velocidade de chama. O estudo foi dividido em duas partes, um planejamento padrão de referência com GLP e um estudo de gás de biomassa de eucalipto. O projeto procura encontrar uma metodologia experimental que caracterize o processo de avaliar as propriedades deste gás e conhecer seu potencial como fonte de energia por meio do estudo de sua velocidade de chama, a fim de ser um aporte significativo para o estado da arte desta linha de pesquisa.

No *capítulo 4* são apresentados, os resultados do estudo, tanto as amostras com o planejamento padrão e também, as amostras com gás de biomassa, as análises de incerteza e as comparações com a literatura foram feitas a fim de comprovar a qualidade do trabalho.

O *capítulo 5* apresenta a discussão e a análise dos resultados divididas em duas sessões, a primeira numa análise do desvio padrão com a ferramenta SPSS® da IBM® e uma análise de incerteza através da ferramenta Crystall Ball® software da Oracle®, também foi feita uma análise de sensibilidade.

Finalmente no *capítulo 6* foram apresentadas as conclusões, sugestões para futuros trabalhos e recomendações para pesquisas relacionadas na área.

O *capítulo 7* contém as referências bibliográficas da pesquisa e anexos.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Panorama atual das energias renováveis no Brasil.

Os acontecimentos geopolíticos estão impulsionando os preços da energia com custos cada vez mais elevados, a dependência mundial dos combustíveis fósseis e a queda do preço do barril de petróleo são ameaças em longo prazo para a sustentabilidade ambiental e econômica. Segundo o BP Statistical, (2016), a tendência da distribuição mundial das fontes de fornecimento de energia não tem mostrado muitas mudanças ao longo do tempo, como é ilustrado na Figura 2-1. Por exemplo, no ano 2009 os biocombustíveis e resíduos representaram 16% de todo o consumo mundial de energia primária segundo Global Status Report (2011), embora a contribuição dos biocombustíveis tenha dobrado desde a década dos 70 como foi mostrado no trabalho de Galindo (2012), a parcela de carvão mineral e o óleo é bastante significativa, com uma dinâmica quase constante. Por outro lado, fontes como biocombustíveis e a água mostram um crescimento leve como pode ser ilustrado na Figura 2-1.

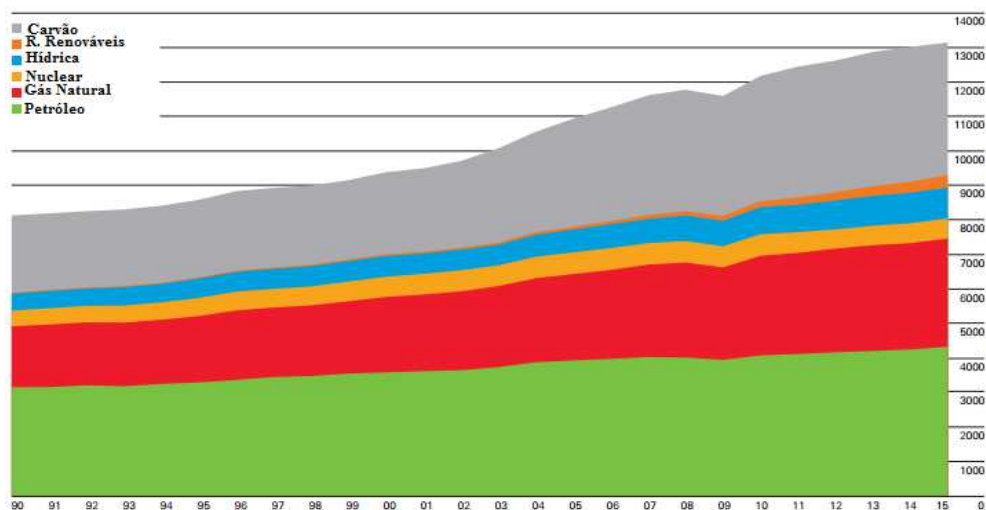


Figura 2-1 Total de Energia Primária Subministrada ao Nível Mundial desde 1990 – 2015 segundo do tipo de Combustível (Mtep)
Fonte: (BP Statistical, 2016)

O Brasil é um dos países com maior quantidade de recursos para responder à necessidade de diversificar a oferta de energia não poluente. Em 2014, suas fontes renováveis de energia representavam 39,4% da oferta interna de energia do país, contudo, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) de 2017 foi estimada em 630,2 TWh, mostrando aumento de 2,6% sobre 2016. As fontes renováveis devem manter participação próxima de 83% na

OIEE, principalmente em razão do bom desempenho da eólica, isto pode ser visto com mais detalhe na tabela 2-1.

Tabela 2-1 Adaptação da Distribuição da Oferta Interna de Energia do Brasil

Especificação	Participação (%)	
	2016	2017
Não renováveis	17,3	16,6
Petróleo e derivados	2,1	1,8
Gás natural	8,1	8,1
Carvão mineral e seus derivados	2,8	2,5
Nuclear	2,6	2,5
Gás industrial	1,7	1,7
Renováveis	82,7	83,4
Hidráulica e eletricidade	68,6	67,9
Biomassa y derivados	8,8	9,0
Eólica	5,3	6,5

Fonte: (Ministerio de minas e Energia, 2017)

Para o caso das energias renováveis, a hídrica representa o 68% da oferta na matriz energética, isto representa o grande potencial para aumentar a quantidade de energia gerada a partir de recursos renováveis como biomassa e eólica na oferta interna de eletricidade do Brasil.

2.2 Gaseificação de biomassa.

Biomassa segundo os autores Andrade & Silva (2007) é toda matéria orgânica existente, de origem animal ou vegetal, cuja energia armazenada pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos por meio de queima direta ou a través de um processo termoquímico ou biológico. Para uso energético a biomassa é fornecida de diversas fontes como madeira, plantações de rápido crescimento, resíduos das florestas e processos agrícolas, resíduos sólidos e esgoto. Segundo Rincón e Gómez; Klose, (2011), por exemplo, os combustíveis à base de madeira, representam aproximadamente 7% do fornecimento total de energia mundial (MARQUEZ *et al.*, 2001) nos países em desenvolvimento, pode aumentar até 15%.

O processo de transformação da biomassa pode ser superficial ou biológico, o primeiro altera suas qualidades externas depende de suas características físicas, químicas ou de seu uso final; exemplos destes processos são a redução de granulometria, densificação ou a prensagem mecânica.

A transformação biológica da biomassa, é um processo onde se descompõe para gerar metano em processos como a biodigestão ou fermentação. Também pode ser tratada termo-quimicamente, em que a biomassa se degradada termicamente em processos como a gaseificação e a pirólise.

Na gaseificação, a biomassa é transformada em gás combustível, composto principalmente segundo Cousins (1978) de: CO₂, CO, CH₄, H₂O, H₂, N₂ e de alcatrão. Martinez; Silva; Andrade, (2009) afirmam que as concentrações de CO, H₂ e CH₄ estão condicionadas ao desenvolvimento das reações envolvidas na gaseificação. Dessa forma, o agente de gaseificação é um dos parâmetros operacionais que influenciam a qualidade do gás e também no PCI. Na Tabela 2-2 pode – se observar as diferentes opções e as composições volumétricas da gaseificação de alguns compostos.

Tabela 2-2 Composição dos Combustíveis de Baixo poder Calorífico de acordo com sua fonte geradora segundo diferentes autores na literatura (% Vol.)

Fonte	Características do gás.	H ₂	CO ₂	CO	N ₂	CH ₄	H ₂ O	H ₂ S
Gaseificação (Carvão, biomassa, lixo orgânico, etc.) (GILES; <i>et al.</i> , 2006)	Efeito do CO ₂ e N ₂ nas emissões de NO _x de uma chama não pré-misturada utilizando combustíveis de baixo poder calorífico.	14,5	5,6	0	49,3	1,3	5,7	0
Gaseificação (resíduos sólidos) (KUŠAR; <i>et al.</i> , 2003)	Gás com baixo poder calorífico e conteúdo de H ₂ , CO, CH ₄ .	10,2	13,8	14,7	44,5	4,6	11,2	0,2
Gaseificação (biomassa) (ADOUANE <i>et al.</i> , 2002)	Gás com baixo poder calorífico e conteúdo de H ₂ , O ₂ , CO.	14,3	13,3	10	41,9	0	20,56	0
Gaseificação (biomassa) (BERG; <i>et al.</i> , 2000)	Gas produto de gaseificação de madeira.	12,6	11,8	15,4	47,1	2,6	10	0
Gás sintético proveniente de carvão (WITTON; <i>et al.</i> , 2003)	Gás sintético de baixo poder calorífico.	15,1	8,1	19,5	46,4	1,8	9,1	0

Fonte: Adaptado de (FRANCISCO; MARTINS, 2014)

A gaseificação pode ser realizada por meio de agentes gaseificadores tais como: ar, vapor de água ou oxigênio. Quando o agente gasificado é o ar, o gás tem um teor considerável de nitrogênio (N₂), o qual deve ser removido quando se visa à produção de compostos químicos.

O agente de gaseificação influencia o poder calorífico do gás, Mc Kendry (2002), classificou os gases obtidos, dividindo-os em gases de médio e baixo poder calorífico. Posteriormente Bridgwater (2003) adicionou os diferentes usos que poderiam ser dados para estes gases, como fornecimento de gás de síntese para obtenção de energia elétrica e de calor,

sendo uma opção apropriada para a geração de energia elétrica e calor (MARTINEZ *et al.*, 2012). O resumo de suas classificações encontra-se na Figura 2-2.

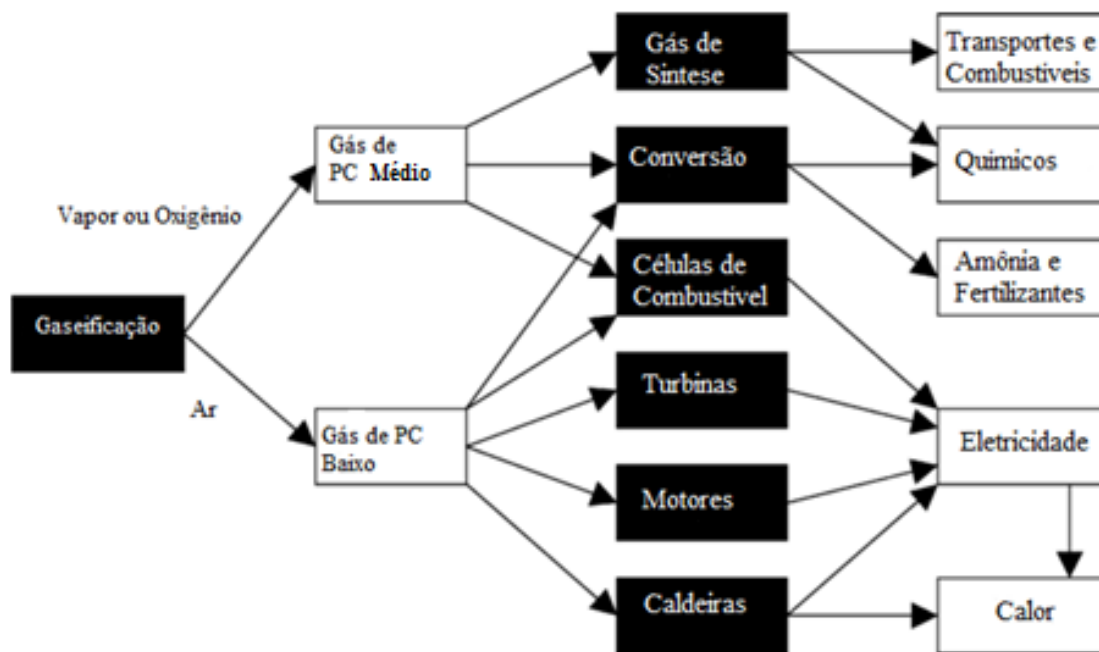


Figura 2-2 Produtos da Conversão Térmica de Biomassa.

Fonte: (Bridgwater, 2003).

No trabalho de Sridhar & Mukunda, (2001), foi avaliado experimentalmente o desempenho de um sistema de geração de energia elétrica utilizando um motor de combustão interna (MCI), sendo possível atingir razões de compressão elevadas (17:1), queimando gás de síntese ($H_2/CO = 1,01$), e obtendo uma eficiência de 21% para uma potência de 20 kW e baixos níveis de NO_x . Além do gás de síntese ser queimado em motores de combustão interna, pode se queimar em turbinas a gás (MUKUNDA, 2015).

A utilização do gás de síntese para a produção de energia elétrica, este tem sido utilizado para aquecimento em processos industriais de baixa e média temperatura, como na pesquisa de Dassapa *et al.*, (2003), os autores concluíram que gaseificadores e unidades de geração de energia com gás produto de gaseificação conseguiram operar por 140 horas na

semana, com um acumulado de 4000 horas, conseguindo substituir caldeiras que utilizavam diesel como combustível.

Usando combustíveis de médio poder calorífico (PCI de 5 até 10 MJ/nm³), pode-se gerar de gás de síntese, para ser usado na indústria química ou de transporte, ou ainda, ser usado em células de combustível. Quando o gás gerado for de baixo poder calorífico, é possível obter também produtos químicos, fertilizantes e amônia. Também, pode ser usado em células combustíveis ou em turbinas, motores ou em caldeiras por meio da queima direta, a fim de gerar eletricidade (VILASBOAS; ANDRADE; SILVA, 2002).

O tipo de reator utilizado no processo também influencia a qualidade do gás gerado, existindo de leito fixo co-corrente e contracorrente, leito móvel, de leito fluidizado, circulante e borbulhante.

De acordo com Chopra & Jain (2007), os gaseificadores de leito fixo contra corrente e co-corrente são adequados para biomassa com umidade em torno de 15% e cinzas de 50% respectivamente. Porém, geralmente são obtidas elevadas taxas de alcatrão, as quais podem ser reduzidas após tratamento segundo Son *et al.*, (2011). Este reator consegue trabalhar com diversos tipos de matérias primas, desde casca de arroz, eucalipto até resíduos sólidos urbanos, são também, equipamentos de operação e construção relativamente simples.

O gaseificador de leito móvel consegue melhorar as propriedades do gás de síntese e diminuir a produção de alcatrão (MARTINEZ *et al.*, 2011), sendo a vazão do ar (agente de gaseificação) o parâmetro mais importante, dado o fato deste regular o consumo de biomassa no reator.

O tipo de reator usado nesta pesquisa foi de leito fixo, sendo que neste tipo de dispositivo, a matéria a ser gaseificada se movimenta por ação da gravidade, é alimentada na parte superior e introduzida em um movimento lento e descendente de um eixo vertical no interior do reator. De acordo com Melo, 2008 e Bridgwater, 2003, estes reatores podem ser classificados dependendo do escoamento do fluxo do agente oxidante e sua relação com o movimento da matéria.

Esta informação é resumida na Tabela 2-3, onde são encontrados os critérios de influência para caracterizar gases de biomassa produto de gaseificação.

Tabela 2-3 Critérios de caracterização do gás de biomassa produto de gaseificação

Poder calorífico do gás produzido	Alto poder calorífico - até 5 mJ/nm ³
	Médio poder calorífico- de 5 até 10 mJ/nm ³
	Baixo poder calorífico de 10 até 40 mJ/nm ³
Tipo de agente de gaseificação	Ar
	Vapor de água
	Oxigênio.
Pressão de trabalho	Baixa pressão (atmosférica)
	Pressurizados (até 3 Mpa)
Segundo o tipo de reator de operação.	Leito fixo contracorrente
	Leito fixo concorrente
	Leito cruzado
	Leito fluidizado borbulhante
	Leito fluidizado circulante

Nos reatores de leito fixo co-corrente, a matéria prima é submetida a quatro processos que alteram suas propriedades químicas, oxidando a matéria prima. Tais os processos são: secagem, pirólise, combustão e redução. A temperatura no interior do reator ao longo desses processos pode variar em uma ampla faixa (pela heterogeneidade decorrente das reações do processo) dando origem a regiões de alta temperatura, de até 1200 °C (BELGIORNO *et al.*2003).

O gaseificador co corrente pode ser operado em um ou dois estágios de fornecimento de ar, o primeiro na área de pirólise e o segundo na área da combustão, onde os compostos reagem quimicamente e a temperatura do processo chega no seu ponto máximo. Uma ilustração deste tipo de reator pode ser observada na Figura 2-3.

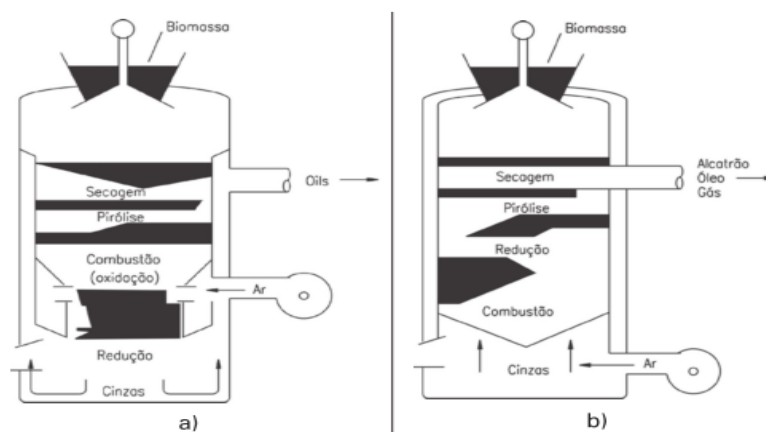


Figura 2-3 Gaseificador de Leito Fixo a. Contracorrente b. Co-corrente.

Fonte:(SILVA; ANDRADE; MARTINEZ; HAIKAL; ROCHA; VILASBOAS; *et al.*, 2012)

O gaseificador de leito fixo é o mais difundido e tendo sido amplamente utilizado. No caso das cinzas, McKendry (2002) relata sobre os aspectos negativos dos altos conteúdos de matéria mineral no combustível, os quais podem fazer o processo de gaseificação complicado, podendo entupir as tubulações do equipamento. Devido à temperatura de oxidação, quando é superado o ponto de fusão das cinzas na biomassa, surgem problemas de acumulação de cinza. Sobre os voláteis, o gaseificador deve ser projetado para destruir os alcatrões e hidrocarbonetos pesados, liberados durante a fase de pirólise.

Silva; Andrade e Aradas (2004) apresentam alguns dos fatores que afetam o desempenho do sistema de gaseificação: a razão de equivalência ou fator de ar; o tipo de agente de gaseificação (comburente); o tempo de residência, o qual é limitado pela operação da grelha nos reatores de leito fixo; e as características da biomassa em termos físico-químicos e energéticos, este refletido na aparição de partículas sólidas, alcatrão, metais alcalinos, sulfeto de hidrogênio e amônia, que devem ser removidos, pois podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos energéticos que utilizam o gás.

2.3 Conceitos Básicos de combustão.

A combustão, segundo por Baukal e Londerville (2013), é um processo químico exotérmico, onde um composto chamado combustível reage e é queimado junto com uma substância chamada comburente, produto dessa reação, e é liberada energia em forma de luz e calor. O produto da combustão, a chama, foi definido no trabalho de Yepes e Tangarife (2014) como um fenômeno resultante e visível de uma propagação autossustentada de misturas químicas com capacidade de reagir rapidamente, em uma zona de combustão à velocidades subsônicas.

O estudo das chamas fornece informação sobre o comportamento da combustão; segundo o Glassman e Yetter (2008), as chamas podem ser classificadas segundo o tipo de escoamento dos fluidos misturados que interagem na queima, em laminares e turbulentas. O critério usado para esta classificação é o número de Reynolds (Re) do fluido não queimado, obtido por meio da relação de propriedades do combustível, como: massa específica, viscosidade dinâmica e a velocidade do escoamento. Esta interação pode ser ilustrada por meio da equação (2-1):

$$Re = \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right) \quad (2-1)$$

Onde:

ρ = Massa específica do fluido.

v = Velocidade do escoamento.

D = Diâmetro da tubulação.

μ = Viscosidade dinâmica do fluido

Um parâmetro básico de transporte de fluidos é onde se enunciam padrões para caracterizar as chamas segundo o seu escoamento: se $Re \leq 2000$, o escoamento e a chama resultante são do tipo LAMINAR; se $Re \geq 4000$, o escoamento e a chama final são de tipo TURBULENTO, e se $2000 < Re < 4000$, o escoamento e a chama se encontram na região de TRANSIÇÃO (neste caso não é possível prever o regime do fluxo).

Segundo o estado dos reagentes, Brizuela e Romano, (2003) classificam as chamas em difusivas (quando os reagentes encontram-se separados) e pré-misturadas (quando os reagentes encontram-se completamente misturados antes da combustão).

A chama pré-misturada laminar, como a apresentada na Figura 2-4, é a mais usada na literatura para estabelecer modelos físicos e explicar fenômenos da combustão; ela é constituída (AMELL *ET AL.* 2004, YEPES; TANGARIFE,2014), por uma zona primária na frente da chama e uma zona secundária de combustão gerada pela difusão do oxigênio dos arredores, a qual vai reagir com os elementos combustíveis que saem da frente desta composição. Normalmente, o exemplo adequado para trabalhar com este tipo de chamas, são as geradas a través do Bico de Bunsen, como foi estabelecido por Ribeiro (2012). Neste tipo de queima, o combustível gasoso provoca o arraste de ar primário desde o meio do queimador através de furos localizados na base, que produz uma mistura anterior à queima; esta chama é laminar e estável, por isto, é utilizada como ponto de referência para procedimentos experimentais.

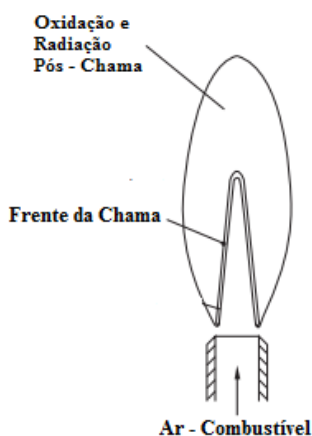


Figura 2-4 Chama Laminar de Pré-mistura

Fonte: (Peters, 2010)

Em uma chama de pré-mistura, como aquela gerada em um bico de Bunsen, a combustão é iniciada em um ponto, e para que seja propagada e o processo seja estável, segundo o trabalho do (ETSII, 2011), é necessário que as camadas adjacentes da pre-mistura não queimadas sejam energizadas para atingir condições de inflamabilidade. A estabilidade da chama está associada à capacidade da mistura ar-combustível de manter o processo de propagação. Segundo a teoria de Kuo (1967), quando o processo atinge um ponto no qual a taxa de liberação de energia é suficiente para sustentar a reação e naturalmente a propagação, este ponto é chamado limite de inflamabilidade.

Razão de equivalência (ϕ), definida como a razão entre a massa de ar fornecida e a massa de combustível na reação determina a geração de outros componentes, tais como: cinzas, alcatrão e gases inertes, onde a ϕ representa a razão entre a proporção de combustível - ar real necessário para que a combustão seja completa ou estequiométrica (MAC ANBHAIRD *et al.* 2015). Este fenômeno, citado no trabalho de Yopez e Tangarife (2014), acontece quando a reação é realizada com a quantidade mínima garantida para queimar o total do combustível, que pode ser chamada também combustão teórica. Tecnicamente, é definida na literatura como a queima de um hidrocarboneto gerando somente CO_2 e H_2O . Também Mautone (2016) mencionou a formação de SO_2 , no caso do combustível conter enxofre.

Quando o combustível não é queimado totalmente o combustível resultante aparece misturado com os produtos ao final do processo, como foi descrito por Ribeiro, (1822). Alguns exemplos são as reações conhecidas como a combustão de Ostwald mencionada no

trabalho de Danilin (1999); nesta reação, produz-se unicamente CO nos gases de combustão. Outro exemplo poderia ser a reação de Combustão de Kissel que produz CO e H₂.

Mas quando a reação possui uma quantidade de ar que supera a relação estequiométrica, a reação é chamada reação com ***excesso de ar***, muito usada para os processos de combustão, pois garantem uma mistura completa do combustível e o comburente, estas misturas completas são convenientes para estudar a velocidade de chama dos combustíveis.

Outros autores como Cengel e Boles, (2009) expressam o excesso de ar percentual como ar teórico percentual. Por exemplo, 50% de excesso de ar corresponde a 150% de ar teórico; no caso contrário, quando uma reação de combustão tem uma quantidade de oxigênio insuficiente (menor que a relação estequiométrica), é gerada uma combustão incompleta. Quantidades de ar menores às necessárias para uma combustão completa são normalmente chamadas deficiência de ar e são expressas como deficiência de ar percentual. Por exemplo, Cengel & Boles, (2009) afirmava que 90% de ar teórico representa 10% de deficiência de ar.

2.3.1 Propriedades dos combustíveis gasosos.

Composição volumétrica e análise imediata da biomassa:

Segundo Castro et al., (2013), a composição volumétrica de um combustível gasoso fornece informação sobre as percentagens dos elementos contidos nele; também, a partir desta, são calculados os fluxos de gases e a quantidade de comburente necessário na combustão, isto é, ela determina a quantidade estequiométrica da combustão.

Para o caso dos combustíveis gerados a partir de gás de biomassa, Loo & Koppejan, (2015) descrevem sua composição volumétrica principalmente de cinco elementos: C, H, S, N e O, sendo que o oxigênio contribui para a oxidação dos outros quatro elementos e reduz a quantidade de ar necessária para a combustão. Quando o combustível é queimado totalmente, os produtos com maior frequência gerados seriam: CO₂, H₂O, SO₂, N₂ e O₂. Quando a combustão é incompleta, além de CO, a reação produz outros elementos, ilustrados na equação (2-2) descrita por Vlassov (2008), onde C^t, H^t, O^t, N^t, S^t, representam as percentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, e enxofre na mistura, e A^t, e W^t, representam outros compostos produto da combustão como cinzas e umidade do combustível.

$$C' + H' + O' + N' + S' + A' + W' \rightarrow 100\% \quad (2-2)$$

Loo & Koppejan (2015), expressam que em razão de sua ampla diversidade e a variabilidade de sua composição elementar, os níveis de umidade e seu comportamento termoquímico e muitas aplicações para a combustão de biomassa têm-se desenvolvido com a finalidade de garantir a menor quantidade de emissões atmosféricas.

No caso da análise imediata, Castro *et al.*, (2013) determinaram seu uso a fim de identificar materiais no combustível que diminuam seu potencial energético, ou seja, os produtos da combustão que não possam ser aproveitados ou que diminuam a capacidade do combustível de gerar energia. Segundo o Francisco; Martins, (2014) podem apresentar-se em forma os teores de umidade (W), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (A); com estes percentuais, podem ser determinadas propriedades como o poder calorífico, temperatura adiabática e também, a velocidade de propagação da chama produto dessa combustão.

A análise imediata de um combustível gasoso depende muito do tipo de matéria prima usada no processo. Por exemplo, McKendry (2002), expressou que para os processos de gaseificação, os combustíveis sólidos usados como matéria prima com conteúdo de umidade superior 30% apresentaram problemas para ignição o que significou um poder calorífico do gás resultante menor comparado com combustíveis sólidos com menos conteúdo de umidade, isto, devido ao gasto energético adicional para a evaporação da água dos combustíveis com maior umidade.

Poder calorífico do combustível:

Os combustíveis são classificados de acordo com seu poder calorífico. Segundo Danilin, (1999) esta propriedade é definida como a capacidade de um combustível de fornecer calor em um processo de oxidação completa. O poder calorífico pode ser classificado em poder superior e inferior.

Na primeira classificação, o poder calorífico superior (PCS), segundo o conceito de Glassman; Yetter (2008), é medido o potencial do composto para fornecer energia, incluindo a água nos produtos de combustão em fase líquida. O seu valor pode ser obtido de duas maneiras: utilizando-se um calorímetro, e executando o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática, seguindo os procedimentos ditados pela norma da

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT-NBR 8633 de 10/1984 (Carvão Vegetal Determinação do Poder Calorífico), ou pela análise elementar, pois ela relaciona a quantidade de ligações químicas dos seus elementos com PCS do combustível (VIEIRA, A. 2012).

A segunda classificação é chamada poder calorífico inferior (PCI) e expressa a quantidade de calor que é desprendido pelo combustível numa reação completa, mas considerando a água em estado vapor Vlassov, (2008). O PCI pode ser calculado a partir da composição elementar ou volumétrica dos materiais utilizados segunda a equação de Mendeleev, descrita como segue na equação (2-3)

$$PCI = 339,13C^t + 1029,95H^t - 108,85(O^t - S^t) - 25,12W^t \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (2-3)$$

Onde as variáveis da equação se referem à porcentagem em massa da composição química do combustível, respectivamente, de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e umidade. O PCI varia segunda a composição volumétrica da matéria prima quando ela for gás, para o caso do gás produzido a partir da biomassa num processo de gaseificação com ar como agente oxidante o PCI varia entre 3 e 6 MJ/Nm³ segundo a literatura em trabalhos experimentais realizados anteriormente por outros autores, este gás é conhecido como gás pobre, e como expresso por Silva et al., (2012), seu poder calorífico ser consideravelmente menor que o do gás natural.

Com base na composição elementar dos materiais e nos valores obtidos de PCI, é possível o calculo do PCS, como foi apresentado pelos autores, através da equação (2-4)

$$PCS = PCI + \frac{m_{H_2O}}{m_{comb}} h_{vap} \quad (2-4)$$

Temperatura de Ignição:

A ignição, conforme definido por Baukal & Londerville, (2013), é o processo de introdução de energia à uma mistura inflamável, sendo que este processo dá início a combustão. Bidabadi & Fereidooni, (2013), asseguram que pode ser expressa como o balanço de calor de uma partícula para se queimar, e consiste no fornecimento da quantidade exata de energia que necessita uma reação para iniciar um processo de queima.

Este processo ocorre quando o composto atinge uma temperatura mínima que permita começar a combustão de uma substância. Essa temperatura encontra-se sujeita a variáveis como: o tamanho das partículas, o teor de oxigênio, velocidade da mistura de ar/combustível, presença de catalisadores, entre outras.

Limite de inflamabilidade:

Esta propriedade é descrita por Mahallawy; Din Habik, (2002) como o valor superior e inferior do intervalo da relação ar – combustível adequado para que uma mistura possa ser queimada; se a mistura não cumpre esta relação, mesmo que ela se encontre na temperatura de ignição, não vai se queimar. Segundo (Danilin, 1999), esta propriedade é característica dos combustíveis gasosos. É importante porque define a proporção da mistura de combustível e o agente oxidante (ou comburente) para atingir uma combustão constante.

Valores experimentais de limites de inflamabilidade de determinados combustíveis puros são extensivamente reportados na literatura, enquanto que dados relativos a misturas (como o objeto deste estudo), citando o trabalho de Vivas (2012) são restritos à situações muito específicas de composição, bem como de número e de tipo de espécies químicas envolvidas.

2.4 Velocidade de Chama

A frente da chama segundo Vlassov (2008) é uma película de pequena espessura que é constituída por zonas bem determinadas, em estas zonas ocorre a preparação de uma mistura combustível para a inflamação e a própria reação química. A frente de chama é uma interface entre a mistura combustível e os produtos de combustão. Por isso é lógico, caracterizar a velocidade de combustão como a velocidade de propagação de frente da chama.

A velocidade de chama segundo Díaz; Amell & Cardona, (2008) é considerada uma propriedade física e pode ser classificada em três níveis, conforme o expresso por Brizuela & Romano, (2003). O primeiro nível é a oxidação lenta, onde a liberação do calor por unidade de tempo é muito pequena, neste caso, a chama não se apresenta com luminosidade. O segundo nível é a deflagração, na qual a frente da chama se propaga em uma velocidade menor à velocidade do som e é caracteristicamente utilizado para os estudos de combustão. Finalmente, o terceiro nível é a detonação, na qual a frente da chama se propaga em uma velocidade maior à velocidade do som, este modo é o caracteristicamente utilizado para as explosões.

A deflagração, objeto de estudo deste trabalho, segundo Baukal & Londerville, (2013) e preconizado por Benjumea et al., (2004) resulta em uma onda de choque que se move à uma velocidade inferior à velocidade do som no meio que não reagiu. Francisco & Martins(2014), expressam que em gases manufaturados, é uma propriedade dominante; e segundo Dong *et al.*, (2009), além de ser um parâmetro importante no projeto de câmaras de combustão, também é utilizada para validação de mecanismos de cinética química.

Quando a chama é laminar, sua deflagração é medida considerando quão rápido a frente viaja em relação ao gás não queimado em uma direção normal à superfície da chama, o qual poder ser observado na Figura 2-5, onde é observado a componente escalar da chama.

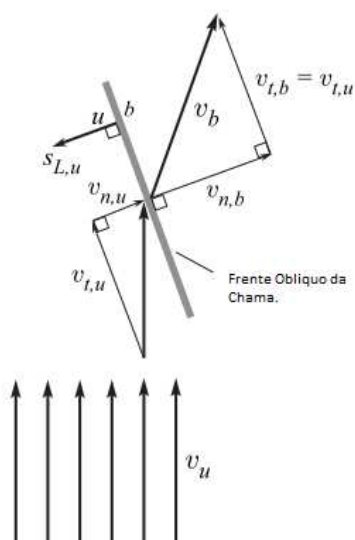


Figura 2-5. Diagrama esquemático de uma chama de pré-mistura laminar estabilizada

Fonte: (Peters, 2010)

Fisicamente, a medição desta velocidade ($S_{L,u}$), chamada neste trabalho de S_L tem sido estudada por diversos autores (Orrego, 2012; Amell, 2009) a velocidade de chama pode ser obtida a partir da aplicação da equação de continuidade, igualando a mistura de gases não queimados com a velocidade do gás queimado para se deflagrar, expresso matematicamente por meio da equação (2-4):

$$\rho V_u A_q = \rho S_L A_c \quad (2-4)$$

Onde V_u é a velocidade dos gases não queimados e S_L é a velocidade dos gases queimados (A velocidade de chama), A_q representa a área do queimador e A_c a área lateral da chama. Considerando-se que se tenha a mesma massa específica para a mistura queimada e aquela não queimada, estas seriam desprezíveis, e poderia ser calculado S_L segunda a equação (2-5):

$$S_L = V_u \left(\frac{A_q}{A_c} \right) \quad (2-5)$$

Se A_q e A_c são representadas nas equações (2-6) e (2-7) como um cone circular reto.

$$A_q = \pi r l \quad (2-6)$$

$$A_c = \pi r \sqrt{r^2 + h^2} \quad (2-7)$$

Assumindo que o fluido seja incompressível, pois se trata de um escoamento subsônico, pode-se afirmar que a velocidade dos gases não queimados é descrita pela equação(2-8) de vazão volumétrica:

$$V_u = \frac{\dot{V}}{A_q} \quad (2-8)$$

Onde \dot{V} é a vazão volumétrica da mistura combustível dentro da tubulação, sendo dividida pela área do queimador A_q , para calcular a velocidade da mistura não queimada V_u . O cálculo da velocidade de chama S_L será produto de substituir as equações (2-7) e (2-8) e (2-8) na equação(2-5); estas substituições são expressas a seguir nas equações (2-9) e (2-10) onde finalmente é expressa S_L em função de V_u :

$$S_L = \frac{\dot{V}}{A_q} \left(\frac{A_q}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}} \right) \quad (2-9)$$

$$S_L = \frac{\dot{V}}{\pi \sqrt{r^2 + h^2}} \quad (2-10)$$

Embora o interesse prático de chamas laminares seja reduzido, segundo o trabalho de Ariello & Zanoelo, (2010), as velocidades típicas deste regime são utilizadas para modelagem de combustão turbulenta e são úteis para estimar velocidades turbulentas tipicamente encontradas em equipamentos industriais de combustão.

Entre os fenômenos indesejáveis na combustão de chamas os mais comuns são o deslocamento e o retorno de chama, os quais se relacionam com os limites de inflamabilidade. No caso do gás de biomassa que provem do processo de gaseificação com ar como agente gaseificador, o gráfico que ilustra sua estabilidade e comportamento na queima, pode ser visto na Figura 2-6.

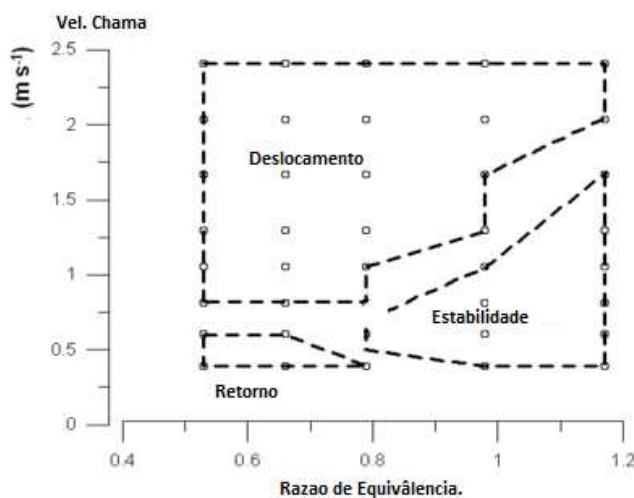


Figura 2-6 Diagrama de Estabilidade do gás produzido por gaseificação de biomassa com ar.
Fonte:(HERNANDEZ; BARBA; ARANDA, 2012)

O gráfico que descreve o fenômeno é descrito no trabalho de Hernandez; Barba; Aranda, (2012), onde os limites para obter chamas estáveis se encontram na faixa entre 0,75 e 1,2 de razão de equivalência, obtendo melhores resultados entre 0,79 e 1. Quando a velocidade de chama supera a velocidade da mistura não queimada se apresentara retorno de chama, se for, o caso contraria (a velocidade da mistura não queimada é maior do que a velocidade de chama) o fenômeno será deslocamento da chama.

2.4.1 Métodos para Calcular a Velocidade de Chama.

Existem diferentes métodos para determinar a velocidade de chama. No caso que a chama a estudar seja propagada de maneira estática, sem se deslocar, deve ser utilizado um método de chama estático, e método mais conhecido é o Bico de Bunsen. No caso que a chama objeto de estudo, se encontre em movimento, ou seja, de tipo turbulento, são utilizados métodos dinâmicos; os mais desenvolvidos na literatura para este tipo de experimentos são: o método da chama esférica (a pressão é constante); a bolha de sabão (o volume é constante); e o tubo de vidro.

- **Métodos Estáticos: Método do Bico de Bunsen**

Em um processo de combustão em um queimador Bunsen, a chama gerada é do tipo laminar, e no centro da chama (o cone gerado pela combustão pré-misturada) se encontra a maior temperatura do processo químico. A determinação da velocidade de propagação da chama pelo *Método do Bico de Bunsen* se encontra baseada na obtenção de chamas estáveis caracterizadas por um percentual de gás combustível na mistura inflamável (BENJUMEA; HIGUITA; CÓRDOBA, 2004). O objetivo deste método é medir o ângulo formado pelo cone interno da chama apresentado na Figura 2-7, o qual não seria possível ser observado com clareza em um chama de difusão, esse ângulo é definido pela velocidade da chama dos gases queimados e a dos gases não queimados, onde, estes se encontram relacionados com o ângulo do cone, em radianos.

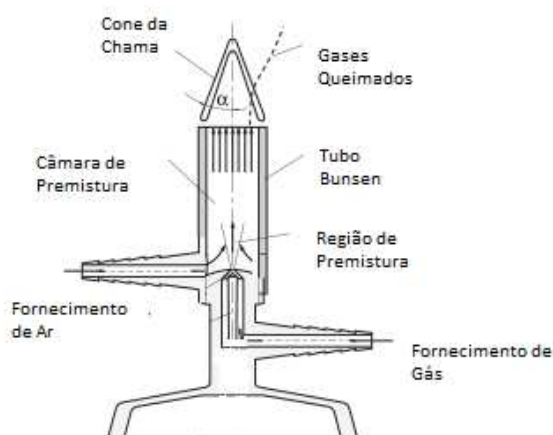


Figura 2-7 Cone da chama gerada por um queimador de Pré-mistura Laminar tipo Bunsen adaptado com entradas de ar e gás reguladas.

Fonte: (Peters, 2010)

Para calcular a V_u e S_L por meio deste método, é necessário partir da equação (2-8). Em seguida, deve-se expressar a equação da continuidade em termos trigonométricos, onde a velocidade laminar de chama é a componente de velocidade dos gases não queimados normal à superfície da chama, o que permite escrever a Equação como foi na equação (2-11):

$$S_L = V_u \times \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2-11)$$

Onde $\alpha/2$ representa a metade do ângulo formado entre os componentes escalares dos gases queimados e não queimados no bico de queimador Bunsen.

Entre as desvantagens deste método está a influência da transferência de calor entre a frente de chama e o bico de injeção, a qual diminui a temperatura de reação e, portanto, a velocidade de chama. Outra desvantagem desse método é a elevada incerteza na determinação da área da frente de chama, necessária segundo Francisco; Martins, (2014) para o cálculo da velocidade de chama.

Na Tabela 2-4, encontra-se resumidamente os aspectos de maior relevância desta metodologia, como segue:

Tabela 2-4 Aspectos de maior relevância da metodologia do Bico de Bunsen

Conceito	Vantagens	Desvantagens
<p>O método é baseado na obtenção de chamas estáticas em um queimador tipo Bunsen. A chama toma a aparência de um cone que permanece imóvel ao respeito do observador, mas viaja ao respeito da mistura inflamável, como foi visto no trabalho de Benjumea et al., (2004).</p> <p>Para calcular a velocidade de chama, multiplica-se a velocidade da mistura não queimada no tubo pela área da sua secção transversal. Normalmente, a área lateral da chama é considerada igual a de um cone circular reto, o que permite o cálculo da velocidade de chama com a equação (T2-1) expressada por Natarajan (2008):</p> $V_m = V_u \times \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2-12)$	<p>Entre os aspectos positivismo de esta metodologia destacam a simplicidade e flexibilidade da montagem e a facilidade de adaptação dos testes para trabalhar com diferentes temperaturas e pressões (Ariello; Zanoelo, 2010).</p>	<p>Entre os aspectos que devem ser considerados para melhorar a metodologia se encontram a incerteza na determinação da área superficial da chama. (Natarajan, 2008), isto pois as temperaturas mais baixas próximas às paredes do queimador levam a menores taxas de reação e conseqüentemente menores velocidades de chama (Ariello; Zanoelo, 2010).</p> <p>A existência de uma fonte estável de gás é sempre requerida, o que para gases raros ou puros pode ser um problema; divergências nas linhas de corrente do fluxo podem gerar incertezas nas medidas (Natarajan, 2008), também é possível que ocorra arraste de ar com retorno da chama no caso de queimadores com grandes diâmetros (Ariello; Zanoelo, 2010).</p>

- **Métodos Dinâmicos: Método da Chama Esférica.**

No caso dos métodos dinâmicos (quando a chama se movimenta ao longo de uma superfície de gases não queimados) existe um realizado a pressão constante. Conforme descrito por Kuo,(1967) e Glassman & Yetter, (2008), neste método uma mistura inflamável se espalha radialmente em uma câmara cilíndrica a *pressão constante*, e avanço da frente de chama é registrado por técnicas de visualização de imagens, tais imagens são utilizadas para determinar as variáveis necessárias para o cálculo da velocidade de chama laminar que não são poder ser vistas através da observação direta.

Neste método, a velocidade de chama pode ser obtida expressão mediante a equação (2-13) no trabalho de Orrego (2012) como:

$$S_L = \left(\frac{\rho_q}{\rho_s} \right) \frac{dR_f}{dt} \quad (2-13)$$

Onde:

ρ_q e ρ_s são as massas específicas do gás queimado e mistura não queimada respectivamente. R_f é o raio instantâneo da chama, obtido a partir de análise de uma técnica de visualização, deve ser extrapolado para um ponto determinado onde chama de combustão é encontrada.

A chama propaga-se radial e livremente à pressão constante, a frente de chama é esférica e a velocidade de deslocamento pode ser registrada utilizando câmaras fotográficas simples. Nos últimos anos, muita atenção foi focada para as chamas de expansão esférica. Lamoreux; et al., (2003) expressam que este tipo de propagação é caracterizado por meio da gravação da evolução da frente da chama em função do tempo; na Tabela 2-5 apresenta-se a informação básica desta metodologia.

Tabela 2-5 Aspetos de maior relevância da metodologia da chama esférica.

Conceito	Vantagens	Desvantagens
Método realizado a pressão constante onde uma superfície esférica cresce radialmente até entrar em contato com a substância inflamável. A medição do crescimento do diâmetro da chama que se espalha determina a velocidade de chama da mistura.	Sendo uma câmara isolada, não existe influencia de temperatura nem de pressão na velocidade de chama. O que reduz a montagem de equipamentos e o custo da bancada.	Não existe um método de visualização de chama confiável para medir os dados da mistura, pois as reações de combustão são muito rápidas (Agnew, 1960). Além disso, o método pode apenas ser usado para gases com frentes de chama rápidos para evitar efeito convectivo dos gases quentes.

- **Métodos Dinâmicos: Método da bolha de sabão.**

Este método é realizado a volume constante e a mistura encontra-se no interior de uma bolha de sabão e a ignição é provocada por uma faísca em seu centro. Esse método é muito similar ao método da chama esférica, a diferença é que neste o volume é constante (pressão varia). O gás no qual a chama está se movendo está sempre mudando.

A expressão para calcular a velocidade de chama desenvolvida por Gupta; Nair, (1974) na equação (2-14) é:

$$V_m = \left[1 - \left(\frac{R^3 - r^3}{3p\gamma_u r^2} \right) \frac{dp}{dr} \right] \frac{dr}{dt} \quad (2-14)$$

Onde R é o raio da bolha em cms, r o raio da frente de chama em cms, p a pressão, t o tempo, e γ_u a razão dos calores específicos dos gases não queimados, a visualização de uma montagem com a metodologia da chama esférica poder ser vista na Figura 2-8, onde são mostrados diferentes estágios da frente de uma chama pré-misturada de H₂ e Ar, a linha preta na montagem amostra os eletrodos usados para ignizar a mistura.

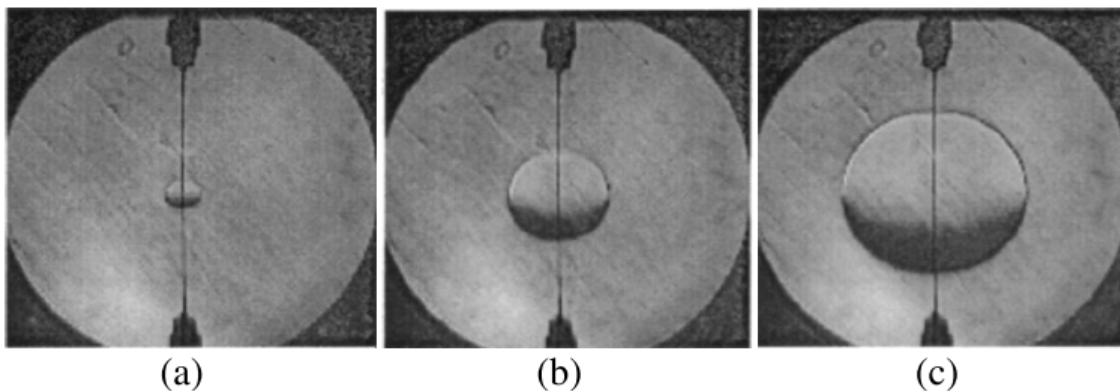


Figura 2-8 Imagens da frente de chama de uma mistura de H₂ e ar se propagando em um queimador esférico à pressão constante, sendo em (a) a frente de chama após 1ms, (b) após 2 ms e (c) após 3 ms
Fonte: (TSE *et al.*, 2014)

A maior dificuldade do método é a grande incerteza na razão entre a temperatura dos gases não queimados e dos gases queimados, necessária para determinar a massa específica e a velocidade da chama. Outras dificuldades são:

- O método pode ser apenas usado para gases com frentes de chama rápidas para evitar efeito convectivo dos gases quentes.
- Segundo o mencionado por Francisco; Martins, (2014), o método não permite a utilização de misturas secas, devido à umidade resultante da evaporação da solução aquosa da bolha de sabão.

Resumidamente, apresentam-se na Tabela 2-6 os aspetos de maior relevância da metodologia da bolha de sabão.

Tabela 2-6 Aspetos de maior relevância da metodologia da bolha de sabão.

Conceito	Vantagens	Desvantagens
É uma metodologia onde o volumen da mistura inflamável é constante e úmido, e se encontra dentro de uma bolha de sabão que entra em contacto com uma faísca.	Pode ser controlada facilmente a quantidade de combustível e comburente, pois o volumen da queima é constante.	<ul style="list-style-type: none"> • Não existe um método de visualização de chama confiável para medir os dados da mistura, pois as reações de combustão são muito rápidas (Agnew, 1960) • Incerteza no raio da superfície. • Segundo exposto por (Francisco; Martins, 2014) o método não permite a utilização de misturas secas, devido à umidade resultante da evaporação da solução aquosa da bolha de sabão.

- **Métodos Dinâmicos: Método do tubo de vidro.**

Neste método uma mistura homogênea de ar e combustível é fornecida em um tubo cilíndrico e transparente cuja extremidade oposta à entrada destes reagentes é aberta para a atmosfera, bem como é ilustrada por Ariello & Zanoelo (2010), na fFigura 2-9:

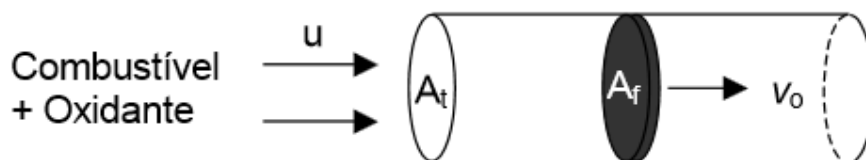


Figura 2-9 Método do Tubo do Vidro
Fonte:(Ariello & Zanoelo, 2010)

Segundo Ariello e Zanoelo (2010), quando a mistura não queimada expressa no gráfico como “ u ” se escoar pela tubulação com área transversal “ A_i ” com uma velocidade maior à velocidade do frente da chama “ V_o ” então a área da frente da chama “ A_f ” se desloca em direção ao “ V_o ”, assim, ocorrerá a propagação de uma frente de combustão que se desloca no mesmo sentido de escoamento da mistura (descolamento da chama). A medição dessa propagação é a estudada por esta metodologia.

Algumas dificuldades do método são:

- O gás na frente de chama é afetado pela chama porque uma onda de pressão é estabelecida pela queima. Essa onda de pressão causa uma velocidade nos gases não queimados e é necessário levar em conta esse movimento. Essa velocidade deve ser subtraída do valor medido, uma vez que a chama se propaga em um gás em movimento.
- Efeitos de fricção causam uma onda de pressão mais forte e o comprimento do tubo pode afetar a medida (ARIELLO E ZANOELO, 2010)

Finalmente, apresenta-se na Tabela 2-7, um resumo das principais informações relacionadas neste trabalho sobre os métodos para calcular a velocidade de chama, a fim de compará-los e estabelecer a metodologia desta pesquisa.

Tabela 2-7 Resumo das Metodologias de Cálculo de Velocidade de Chama Laminar.

Conceito	Vantagens	Desvantagens
Neste método alimenta-se uma mistura homogênea de ar e combustível em um tubo cilíndrico e transparente cuja extremidade oposta à entrada destes reagentes é aberta para a atmosfera (Ariello; Zanoelo, 2010).	A queima é pré-misturada e homogênea.	<ul style="list-style-type: none"> • A existência do efeito de curvatura da frente de chama dentro do tubo cilíndrico. • A onda de pressão gerada durante o processo de combustão nos gases não queimados afeta a velocidade de chama. • A frente de chama é instável, dificultando a medição da área.

Ao final da análise destas metodologias, o método do Bico de Bunsen por seu amplo desenvolvimento na literatura e sua simplicidade, é o escolhido para este trabalho. Este método foi usado paralelamente as técnicas de visualização de imagens, apresentadas na seção 2.5.

2.5 Métodos óticos para visualização de Imagens.

A variação da forma de escoamento de vazões transparentes com alta sensibilidade as mudanças da massa específica, temperatura, velocidade e concentração tem sido amplamente estabelecida em trabalhos como o de Vásquez, (2007), usando-se como ferramenta útil de diagnostico comum para obter informação quali-quantitativa sobre fluidos.

Para este trabalho foram utilizadas duas técnicas, “shadowgraph” e “schlieren”, utilizadas por Settles (2001) e consideradas complementos em processos experimentais no laboratório. Nestas técnicas, podem ser observadas perdas de homogeneidade em no escoamento de fluidos transparentes quando são difíceis de observar por meio da observação direta. Estas técnicas foram introduzidas para de comparar mudanças obtidas no plano dos testes. A seguir, cada uma destas técnicas é explicada com maior detalhe.

2.5.1 “Shadowgraph”.

“Shadowgraph” é uma técnica aplicada que colima um raio de luz de um ponto (geralmente é usado um laser ou um led) através de uma lente biconvexa e projeta-a sobre uma superfície como foi feito no trabalho de Panigrahi; Muralidhar, (2012); esse raio gera uma perturbação no campo observado, criada como produto da refração da luz na lente, sendo que os raios de luz individuais passam por meio da seção de teste e refratam fora de sua trajetória original. Isto provoca uma variação na intensidade da luz, o qual é refletido sobre a tela, aumentando a imagem, e mostrando as mudanças da massa específica da área de teste. Este método capta a sombra formada por um objeto em um plano claro (Francisco; Martins, 2014), assim como é apresentado na Figura 2-10.

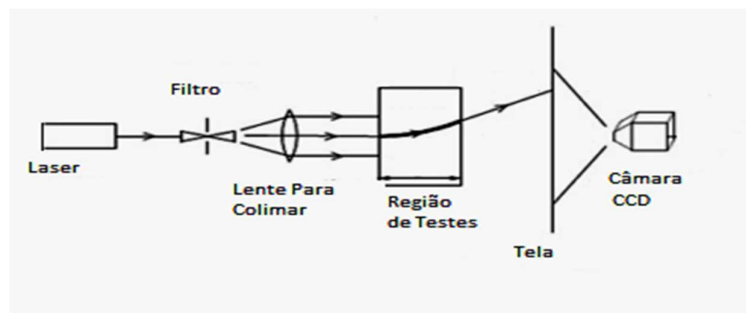


Figura 2-10 Montagem de Shadowgraph Básico.
Fonte: (Panigrahi; Muralidhar, 2012)

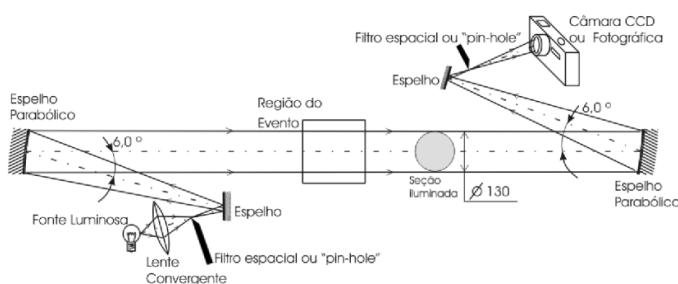
Seu princípio de operação é muito simples, segundo o exposto por Panigrahi; Muralidhar, (2012), pois requer só uma lente e uma tela. A análise das imagens estuda o deslocamento dos raios de luz e também seu desvio no plano. Segundo os autores, esta metodologia tem sido amplamente utilizada em mecânica dos fluidos experimental e de transferência de calor, como uma ferramenta para visualização do fluxo por sua simplicidade de aplicação.

Alguns desafios desta metodologia são devidos ao campo de distorção gerado nesta técnica; esse campo gera uma diferença entre a imagem real e a refletida na tela. Assim, “shadowgraph” apresenta uma margem de erro superior a outros métodos óticos. Uma vez que não se trata da análise uma imagem e sem de uma sombra, podendo refletir em resultados imprecisos, assim, ela poderia não ser fiel à escala real do objeto estudado.

2.5.2 “Schlieren”.

“Schlieren” é uma técnica onde uma lente gera uma relação óticamente conjugada entre um objeto opaco e uma imagem, produto da refração dos raios de luz. Assim, o método de “Schlieren” difere do “shadowgraph” devido à geração de imagens e não sombras.

Uma configuração de “Schlieren” básica usando espelhos côncavos geralmente tem forma de Z . O princípio de operação para o sistema de tipo Z monocromático “schlieren” compreende os espelhos côncavos e planos, uma lâmina de aço pequena, e um laser ou uma luz tipo led branco como fonte de luz. Os componentes óticos e o laser são mantidos em uma linha central comum acima do solo (Panigrahi; Muralidhar, 2012), em condições inalteradas, a luz de laser original, cai na parte central dos componentes óticos, o sistema óptico é construído usando espelhos esféricos, quando o tamanho do espelho é maior a distorção da imagem é menor.



**Figura 2-11 Plano Esquemático para Captura e visualização de objetos, baseado em Schlieren.
Fonte: Adaptação, Andrade (2005)**

Devido às distâncias entre o foco dos espelhos e os objetos analisados, Schlieren apresenta uma sensibilidade maior aos grandes gradientes térmicos ou de concentração.

A montagem de “schlieren” apresentada na Figura 2-11 usa dois espelhos côncavos: o primeiro tem a função de colimar os raios de luz, logo depois a segunda lente e foca no filtro espacial ou “Pinhole”, porém, necessariamente em todos os casos devem ser usados dois espelhos; neste trabalho, foi usado um espelho unicamente, em uma adaptação chamada “*Schlieren direto*”. As imagens do processo são geradas usando uma fonte de luz impulsionada por um gerador de sinal em alguns casos, como no trabalho de Dalziel; O hughes; Sutherland, (1998), algumas vezes um led simples é suficiente. Finalmente, é usada uma câmera para capturar as imagens, os arquivos de imagem obtidos são baixados diretamente no computador.

“Schlieren” possui facilidade operacional e a simplicidade da análise Panigrahi; Muralidhar, (2012), pois estuda só o desvio dos raios de luz e não seu deslocamento no plano, comparando-se com “shadowgraph”. Assim, apesar destes dois métodos parecem ser semelhantes na aplicação, os fenômenos envolvidos opticamente são diferentes, influenciando os resultados obtidos.

O “shadowgraph” segundo o conceito de Francisco; Martins (2014), é a sombra de um objeto projetada em um painel, cuja resposta gerada é a derivada segunda do índice de refração. Enquanto que o “schlieren” é uma imagem óptica formada por lentes, cuja resposta gerada é a primeira derivada do índice de refração. Sendo assim, o “schlieren” é um método que apresenta maior sensibilidade à variação da massa específica do meio do que o método “shadowgraph”.

2.6 Premissas derivadas da pesquisa do estado da arte.

Nos anexos A e B encontram-se resumos das comparações das tecnologias de cálculo da velocidade de chama e das técnicas de visualização de imagens. Destas foram elaboradas as seguintes premissas, estudadas ao longo do trabalho:

- As misturas com maiores velocidades de chama serão obtidas em queimas estequiométricas.

- Os gases com maior conteúdo de compostos inertes terão menores velocidades de chama.
- Quando a presença de Hidrogênio na mistura aumenta são obtidas maiores velocidades de chama.
- Fatores externos não controláveis como temperatura, pressão e umidade no ambiente não tem maiores efeitos sobre a velocidade de chama.

CAPITULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia Utilizada.

3.1.1 Aspectos gerais do projeto.

Este trabalho busca estabelecer uma metodologia de referência que minimize o erro da distribuição de probabilidade para as medições da velocidade de chama em gases produzidos através de gaseificação. Foi usado como ponto de partida um processo de gaseificação em leito fixo, com ar como agente de gaseificação, mas a finalidade desta pesquisa é fornecer um processo que seja referência para ser adaptado a gases produto da gaseificação com qualquer tipo de agente gaseificador e de reatores.

A metodologia proposta é iniciada a partir de uma pesquisa na literatura dos principais processos existentes para o cálculo de velocidade de chama experimental e suas principais vantagens e desvantagens técnicas apresentadas. Esta metodologia consiste em uma análise experimental suportada na implementação de técnicas transversais que pudessem minimizar os erros apresentados em trabalhos anteriores, em termos da incerteza das medições.

Para este trabalho foi necessário selecionar um gás padrão, o GLP comercial, visando a sua utilização como ponto de referência para comprovar a efetividade da metodologia. A hipótese que foi resolvida por meio desta pesquisa é: *“É possível projetar uma metodologia experimental que calcule a velocidade de chama laminar de um gás de biomassa com um grau de incerteza conhecido”*

Ao longo da pesquisa além de cumprir alguns objetivos específicos preestabelecidos, também foram propostas algumas hipóteses que delimitaram o escopo do trabalho, as quais são descritas a seguir e são produto da procura de informação no estado da arte, e que são apresentadas na seção 2.6. A linha estrutural da pesquisa experimental é o método científico;

Esta dissertação foi dividida em duas seções, a primeira para o planejamento padrão e as seguintes para o gás de biomassa, como são apresentadas na tabela 3-1 e 3-2.

Tabela 3-1 Componentes metodológicos da pesquisa do planejamento padrão

Componente Metodológico	Atividade
1. Definição do Problema	1.1 Definição de parâmetros iniciais para o experimento padrão.
2. Formulação da Hipótese	2.1 Planejamento do experimento padrão. 2.2 Projeção da Bancada de testes.
3. Coleta e Análise de Dados	3.1 Testes com o experimento Padrão.
4. Verificação da Hipótese	4.1 Medição do nível de erro e análise de incerteza do experimento padrão. 4.2 Elaboração de análise, revisão de resultados e comparação com a literatura.
5. Resultados.	5.1 Resultados do experimento Padrão.

Tabela 3-2 Componentes metodológicos da pesquisa do planejamento com o gás de biomassa

Componente Metodológico	Atividade
1. Definição do Problema	1.1 Elaboração do gás objeto de estudo.
2. Formulação da Hipótese	2.1 Adaptação da bancada e do planejamento experimental padrão, a fim de ser usado no gás objeto de estudo.
3. Coleta e Análise de Dados	3.1 Testes com o gás objeto de estudo.
4. Verificação da Hipótese	4.1 Medição do nível de erro e análise de incerteza do experimento objeto de estudo. 4.2 Comparação do experimento objeto de estudo com o padrão, elaboração de análise. 4.3 Revisão de resultados e comparação com a literatura.
5. Resultados.	5.1 Conclusões e sugestões finais.

Resumidamente, a metodologia do trabalho foi descrita na Figura 3-1, em um diagrama de fluxo onde são apresentados os principais aspectos técnicos da metodologia e os produtos esperados.

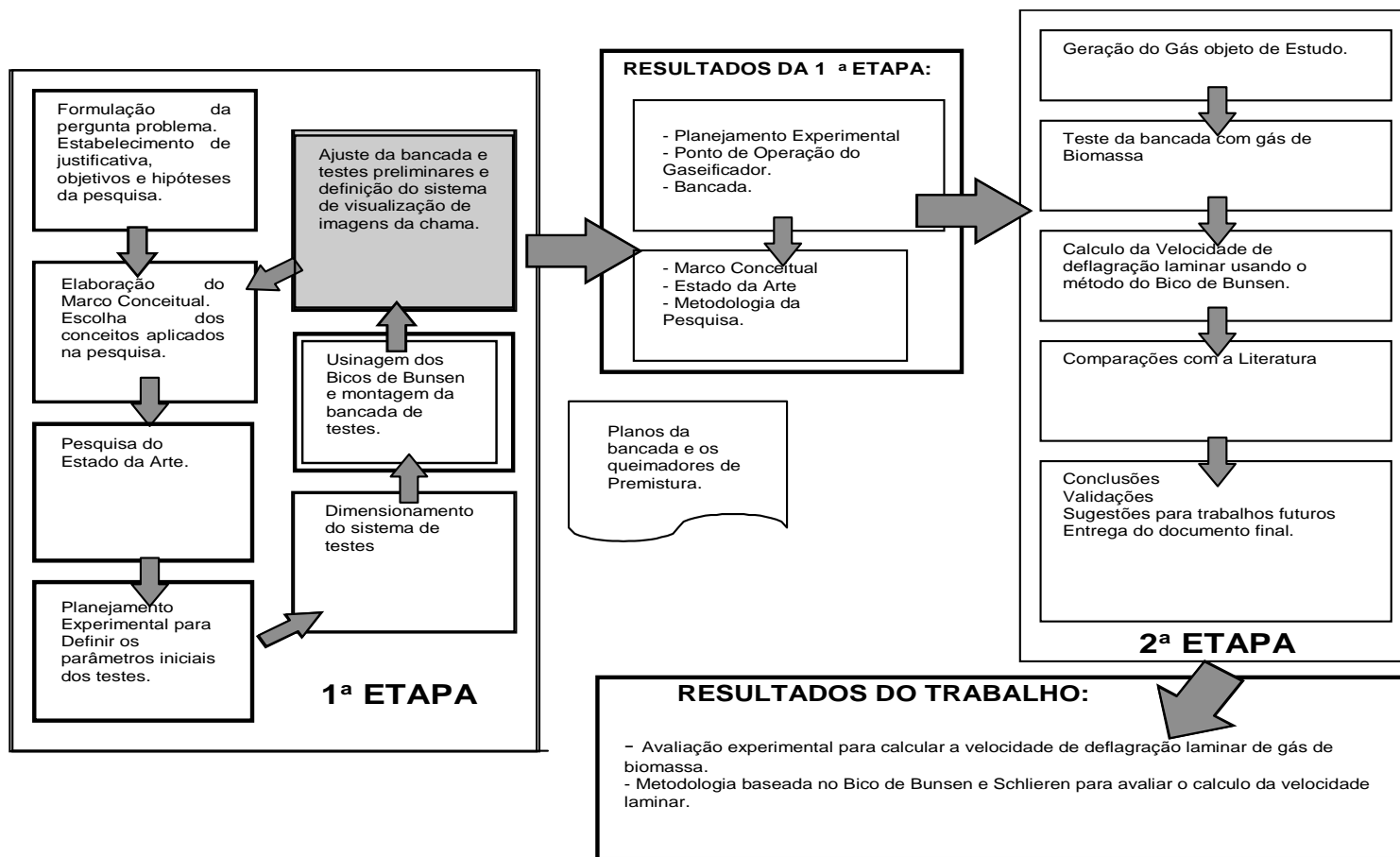


Figura 3-1 Metodologia do Trabalho

3.1.2 Parâmetros iniciais para o experimento padrão.

- Razão de Equivalência.

O primeiro parâmetro considerado neste estudo é a razão de equivalência (ϕ). Esta é definida conforme a equação (3-1), como sendo a razão entre a massa de combustível e a massa de comburente, que será expressa nesta pesquisa em termos da relação combustível-ar real e a relação combustível-ar estequiométrica. Valores de ϕ iguais a unidade refere-se à combustão completa, valores de ϕ inferiores a unidade, correspondem a combustão em excesso de ar ou misturas pobres, para ϕ superior a unidade há deficiência de ar, ou seja, misturas ricas.

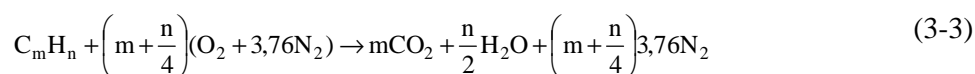
$$\phi = \frac{(comb/ar)_{real}}{(comb/ar)_{est.}} \quad (3-1)$$

Pode-se ainda definir o excesso de ar (λ) equação (3-2) como sendo a razão entre a relação ar-combustível real pela relação ar-combustível estequiométrica, também denominada de relação de equivalência com relação ao ar.

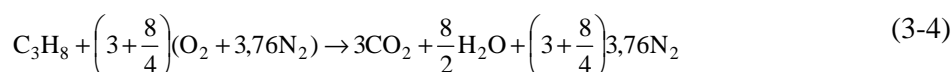
$$\lambda = \frac{(ar/comb)_{real}}{(ar/comb)_{est.}} \quad (3-2)$$

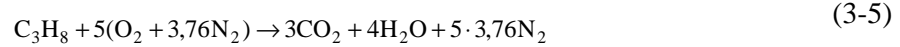
3.1.2.1 Determinação do ar necessário à queima do GLP.

O GLP é aqui considerado como uma mistura de propano (C_3H_8) (30%) e Butano (C_4H_{10}) 70%, dessa forma, a combustão completa pode ser escrita pelas equações (3-3), (3-4) e (3-5):

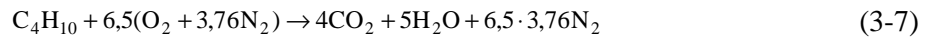
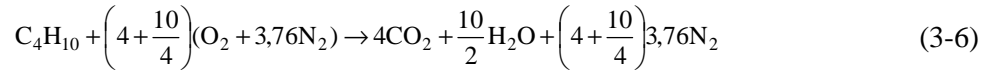


Então para o propano:





Para o Butano expresso nas equações (3-6) e (3-7)



A relação combustível/ar estequiométrico na equação (3-8):

$$\left(\frac{\text{C}}{\text{ar}}\right)_{\text{est}} = \frac{1}{6,5 \cdot (1 + 3,76)} 0,7 + \frac{1}{5 \cdot (1 + 3,76)} 0,3 = 0,035 \left[\frac{\text{L}_{\text{comb}}}{\text{L}_{\text{ar}}} \right] \quad (3-8)$$

A relação combustível/ar real $\left(\frac{\text{C}}{\text{ar}}\right)_{\text{real}}$ é determinada por meio da utilização das vazões obtidas pelos dos rotâmetros, apresenta-se a equação (3-9):

$$\left(\frac{\text{C}}{\text{ar}}\right)_{\text{real}} = \frac{\dot{V}_{\text{comb}}}{\dot{V}_{\text{ar}}} \left[\frac{\text{L} / \text{min}_{\text{comb}}}{\text{L} / \text{min}_{\text{ar}}} \right] \quad (3-9)$$

Tendo-se calculado os valores das relações combustível/ar real e estequiométrico, pode-se então determinar a razão de equivalência, através da eq (3-10) que foi expressa anteriormente na eq. (3-1):

$$\phi = \frac{(\text{comb}/\text{ar})_{\text{real}}}{(\text{comb}/\text{ar})_{\text{est.}}} \quad (3-10)$$

3.1.2.2 Cálculo da vazão da mistura:

A vazão da mistura combustível pode ser determinada pela soma das vazões de combustível e comburente, conforme equação. (3-11) considerando uma vazão hipotética a seguir:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_{\text{comb}} + \dot{V}_{\text{ar}} \quad (3-11)$$

Os parâmetros fixos do ambiente e composição das amostras como a viscosidade (no caso do GLP foi obtida através de Software de análise de processos químicos DWsim® (Medeiros, 2008), usando as bibliotecas de dados do Coolprop®. Parâmetros como a massa específica e fração volumétrica de cada componente na mistura, são importantes para a velocidade de chama, e não variam dependendo da técnica de aquisição de imagens que seja usada. A seguir os valores destas propriedades na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Padrões de composição da mistura

Caso	Amostras	Fração Volumétrica de combustível	Fração Volumétrica de Ar	Viscosidade dinâmica [Pa.s]	ρ [kg/m ³]	Número Reynolds
1	1 até 5	3,05%	96,95%	0,000018	1,21	1148,9
2	6 até 10	2,85%	97,15%	0,000018	1,21	1226,16
3	11 até 14	2,68%	97,32%	0,000018	1,21	1303,45
4	15 até 19	2,52%	97,48%	0,000018	1,21	1380,73
5	20 até 24	2,39%	97,61%	0,000018	1,21	1458,02
6	25 até 29	2,26%	97,74%	0,000018	1,21	1535,30
7	30 até 34	2,15%	97,85%	0,000018	1,20	1612,59

Informações como a massa específica e a viscosidade (usadas para calcular o Reynolds) foram usados para garantir que o escoamento saindo pelo queimador seja laminar e que houvesse uma pré-mistura adequada do combustível e o comburente.

3.1.3 Parâmetros iniciais para o planejamento objeto de estudo.

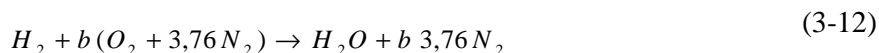
- Razão de equivalência e determinação de quantidade de ar necessário para a queima do gás de biomassa.

O gás objeto de estudo foi aqui considerado como uma mistura de CO, H₂ e CH₄, produto de um processo de gaseificação em leito fixo, usando ar como agente gaseificado. Durante o processo da gaseificação da biomassa e sua combustão foram apresentadas 9 composições diferentes, ilustradas na tabela (3-4):

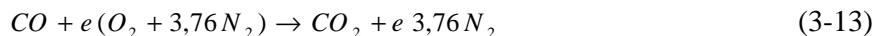
Tabela 3-4 Composição das amostras para a queima controlada do gás objeto de estudo.

<i>Composto/Amostra</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H₂	14,1%	13,9%	14,2%	14,5%	13,0%	14,9%	15,6%	15,8%	15,9%
CO	24,1%	24,5%	24,5%	23,0%	22,0%	19,1%	17,5%	19,0%	21,1%
CH₄	2,1%	2,0%	2,0%	2,0%	1,3%	2,0%	1,7%	1,9%	19,0%

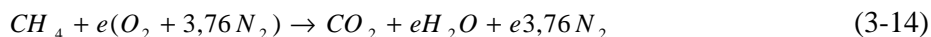
Dessa forma, a combustão completa para cada mistura, pode ser escrita como, para o H₂ na equação (3-12):



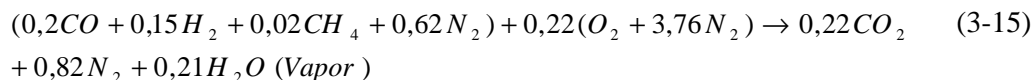
Então para o CO na equação (3-13):



E finalmente para o CH₄ na equação (3-14):



Em termos gerais a reação que descreve este fenômeno poderia ser expressa na equação (3-15)



Onde cada um dos reagentes, ao entrar no contato com o oxigênio proporcionado pelo ar, é transformado em CO₂ e água. A média da composição dos 9 casos escolhidos como amostra na mistura, é CO (20%), H₂ (15%) e 2% de CH₄. A relação combustível/ar estequiométrico médio $\left(\frac{C}{ar}\right)_{est}$ é expressa na equação (3-16):

$$\left(\frac{C}{ar}\right)_{est} = \frac{1}{6,5 \cdot (1 + 3,76)} 0,20 + \frac{1}{5 \cdot (1 + 3,76)} 0,15 + \frac{1}{5 \cdot (1 + 3,76)} 0,02 = 0,942 \left[\frac{L_{comb}}{L_{ar}} \right] \quad (3-16)$$

Para que esta reação ocorra, devem estar presentes 0,215 moles de O₂ por cada mol de Gás de combustão. A relação combustível/ar estequiométrica foi considerada neste trabalho, partindo do fato que 0,21% do ar é oxigênio, que é a quantidade necessária para a combustão, que é 1,06 kmol de ar/ kmol de combustível ou 0,94 kmol de combustível / kmol de ar.

A relação combustível/ar real $\left(\frac{C}{ar}\right)_{real}$ é determinada pela utilização das vazões obtidas pelos rotâmetros; dessa forma na equação (3-9) apresentada anteriormente, tendo-se calculado os valores das relações combustível/ar real e estequiométrico, pode-se então determinar a razão de equivalência (ϕ), pela equação (3-1):

- Cálculo da vazão da mistura:

A vazão da mistura combustível \dot{V}_m pode ser determinada através da soma dos fluxos de combustível \dot{V}_{comb} e comburente \dot{V}_{ar} , conforme eq. (3-11) considerando as vazões de combustível e comburente da mistura escolhidas como níveis do estudo no planejamento experimental.

Outros parâmetros básicos da composição da mistura são a massa específica total, calculada somando as massas específicas de ar (1,18 kg/m³ obtido da literatura) e gás de biomassa (1,04 kg/m³ em média) multiplicando-lhes por sua fração molar na mistura, obtendo um valor médio de 1,09 kg/m³.

3.1.4 Planejamento do experimento padrão.

- Definição das variáveis.

O objetivo deste planejamento é conhecer a influência da razão de equivalência na velocidade de chama, os planejamentos experimentais estão compostos por 3 partes: a primeira são os fatores, eles são o elemento variável do experimento e será ajustado em níveis (alto, meio e baixo), segundo a necessidade do experimento, finalmente a variável de resposta é o padrão que recebe o impacto da mudança dos fatores nos níveis escolhidos. Para este experimento foi escolhido um fator (a razão de equivalência), 7 níveis que foram chamados casos (as distintas vazões de prova) e foram feitas 5 réplicas de cada um.

Este experimento possui 7 níveis pois a medição das vazões de prova foi limitada pelos rotâmetros utilizados, que impedem utilizar vazões maiores de ar, e quando foram usadas vazões maiores de GLP (superiores 0,3 LPM) as chamas apresentadas foram turbulentas (quando atingiram valores estequiométricos) ou foram difusivas (por causa da necessidade de tomar ar do ambiente para se queimar, eliminando a pre-mistura). Esta situação também foi influenciada por o tipo de queimador utilizado, pois o comprimento e o diâmetro dele foram especificamente calculados para garantir fluxos laminares com gás de biomassa.

Inicialmente para avaliar o desvio padrão de cada caso foram feitas 5 réplicas. Então a população para o cálculo da quantidade de amostras é 35 casos e finalmente foram usados 34 para o experimento.

Os parâmetros (variáveis, fatores e níveis) foram divididos segundo as informações contidas na literatura e uma prova de conceito realizada para cada experimento, as informações sobre esses parâmetros podem ser observadas na Tabela 3-5:

Tabela 3-5 - Níveis projetados do Planejamento Experimental para o GLP

Número de Fatores.	Níveis do fator.	Variável de Resposta
Um fator. (Razão de equivalência, expressada em termos da mudança da vazão de ar na mistura)	7 razões de equivalência de prova e 5 Réplicas para cada uma delas. (Casos)	Velocidade da chama (S_L)

Para este experimento foram considerados fixos o tipo de queimador e o bico de saída, sendo a pressão e a temperatura dos fluidos desprezível. A perda de calor nas paredes do queimador

também foi desconsiderada neste modelo. A vazão de ar necessária para a queima do GLP é apresentada na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 vazão de entrada do ar das amostras.

Caso	Amostras	\dot{V}_{Ar} (L/min)	\dot{V}_{Ar} (m ³ /s)	$\left(\frac{C}{ar}\right)_{real}$
1	1 – 5	7,0	1,17E-04	3,14E-02
2	6 -10	7,5	1,25E-04	2,93E-02
3	11 – 14	8,0	1,33E-04	2,75E-02
4	15 -19	8,5	1,42E-04	2,59E-02
5	20 -24	9,0	1,50E-04	2,45E-02
6	25 -29	9,5	1,58E-04	2,32E-02
7	30 – 34	10,0	1,67E-04	2,20E-02

As vazões superiores de 0,4 LPM de ar excedem a capacidade de medida do rotâmetro; desta forma, não é possível obter medições dessa faixa. Assim, os testes foram feitos com vazões de 0,22 LPM de gás. Inicialmente foram experimentadas as vazões de ar em intervalos de 0,5 LPM para obter uma distribuição de frequência uniforme, com cada uma das técnicas de aquisição de imagens. A vazão de combustível foi o indicador para a medição experimental. Na Tabela 3-7 são apresentados os valores das razões de equivalência para o planejamento experimental.

Tabela 3-7 - Casos do planejamento experimental

Casos	\dot{V}_{GLP} [L/min]	\dot{V}_{Ar} [L/min]	R. E. [ϕ]
1	0,22	7,0	0,90
2	0,22	7,5	0,84
3	0,22	8,0	0,79
4	0,22	8,5	0,74
5	0,22	9,0	0,70
6	0,22	9,5	0,66
7	0,22	10,0	0,63

Sobre as medições do GLP, é importante considerar que os rotômetros escolhidos estão configurados para medir ar, então é necessário aplicar um fator de correção do equipamento, determinado pela equação (3-17) (YEPEZ, 2014):

$$V_{\text{corregido}} = V_{\text{gás}} \sqrt{\frac{R_{\text{Propano}}}{R_{\text{Ar}}}} \quad (3-17)$$

Para o caso do planejamento experimental, a vazão da mistura foi expressa na Tabela 3-8.

Tabela 3-8 – Parâmetros operacionais.

Caso	\dot{V}_{ar} (m ³ /s)	\dot{V}_{comb} (m ³ /s)	\dot{V}_m (m ³ /s)	V_u (m/s)
1	1,17E-4	5,0E-6	1,20 E-4	1,89
2	1,25E-4	5,0E-6	1,29 E-4	2,02
3	1,33 E-4	5,0E-6	1,37 E-4	2,15
4	1,42 E-4	5,0E-6	1,45 E-4	2,28
5	1,50 E-4	5,0E-6	1,54 E-4	2,42
6	1,58 E-4	5,0E-6	1,62 E-4	2,55
7	1,67 E-4	5,0E-6	1,70 E-4	2,68

- Cálculo do tamanho das amostras.

Para determinar o tamanho das amostras deste estudo, é preciso considerar que seu objetivo é determinar parâmetros, ou seja, que se pretende fazer inferências sobre valores populacionais (proporções, médias) a partir de uma amostra. Desta maneira a equação (3-18) é aquela que descreve melhor o comportamento dos dados e é usada como referência.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2} \quad (3-18)$$

Onde:

n = O tamanho da amostra a calcular

Z = O desvio do valor médio para o nível de confiança solicitado de 95%

e = A faixa de erro máximo que admitida pelo estudo (5%)

p = Representa a heterogeneidade da amostra; neste caso, é usado 50%, considerando uma amostra totalmente heterogênea (o pior dos casos).

O tamanho para garantir nível de erro de 5% e nível de confiança de 95% é de 33 amostras, as quais foram tomadas no transcurso do presente trabalho e analisadas, a fim de garantir o mínimo erro. Contudo, foram realizadas análise do desvio padrão para cada caso e cada amostra.

3.1.5 Considerações sobre o gás pobre

- Definição das variáveis.

O objetivo deste planejamento é conhecer a influência da variável razão de equivalência na velocidade de chama utilizando o gás produzido na gaseificação de biomassa. Para atingir este objetivo foi feito um planejamento considerando um fator, com 34 casos iniciais considerando diferentes relações de ar/combustível e duas composições aleatórias do gás objeto de estudo. Destes casos, foram realizadas 5 réplicas, divididas em dois dias de amostragem, sendo a informação sobre esses parâmetros apresentada na Tabela 3-9:

Tabela 3-9 Níveis projetados do planejamento experimental do gás de biomassa

Experimento	Parâmetros Avaliados	Variável de Resposta
Planejamento um fator	21 Diferentes Vazões que modificam a razão de equivalência, 5 réplicas de cada um. 2 dias de amostragem.	Velocidade da chama (S_L)

Os parâmetros fixos são: o tipo de queimador e o bico de saída (sendo a pressão e a temperatura dos fluidos desprezíveis, pois são parecidas às do ambiente). A perda de calor nas paredes do queimador também não foi considerada neste modelo, pois o queimador foi projetado para minimizar esta perda.

As amostras de gás de biomassa com vazões superiores aos 5 LPM de gás misturadas com vazões desde 1 até 3,5 LPM de ar foram desconsideradas. Isto, pois a chama produto desta pré-mistura foi de tipo difusiva, ou seja, não era possível enxergar o cone da chama no processo de combustão; assim, não poderia ser medida por meio da metodologia do ângulo do cone.

As amostras que se encontravam muito próximas dos limites das medições dos rotâmetros tiveram desvios padrão com coeficientes de variabilidade muito altos; então, também foram eliminadas dos casos para o planejamento experimental.

Este experimento difere dos testes com gás padrão pois as amostras foram tomadas enquanto o gaseificador estava operando; apresentam uma pequena mudança na composição do gás ao longo do processo de gaseificação. Finalmente, 21 dos 34 casos iniciais foram validados como parte do estudo, os quais são mostrados, a seguir na Tabela 3-10, na qual se mostram as vazões envolvidas na medição em litros por minuto e as razões de equivalência da combustão para cada uma das amostras de gás.

Tabela 3-10 Casos do Planejamento do Gás Objeto de Estudo.

Casos	\dot{V} Gás (l/min)	\dot{V} ar (l/min)	(ϕ) Día 1	(ϕ) Día 2
1	5	4	1,45	1,42
2	5	4,5	1,29	1,27
3	5	5	1,16	1,14
4	5	5,5	1,05	0,96
5	5	6	0,97	0,88
6	5	6,5	0,89	0,81
7	4	3	1,51	1,55
8	4	3,5	1,30	1,33
9	4	4	1,13	1,16
10	4	4,5	1,01	1,03
11	4	5	0,91	0,93
12	4	5,5	0,83	0,84
13	4	6	0,76	0,77
14	3	2,5	1,19	1,39
15	3	3	0,99	1,16
16	3	3,5	0,85	0,99
17	3	4	0,74	0,87
18	3	4,5	0,66	0,77
19	2	2	0,97	1,16
20	2	2,5	0,77	0,93
21	2	3	0,64	0,77

Estas vazões foram replicadas em dois processos de gaseificação diferentes, as amostras obtidas foram chamadas 1 e 2, mesmo que a composição varie ligeiramente entre elas, ainda se encontram dentro dos limites de coeficiente de variabilidade para considerar-lhe uma amostra homogênea, estudada como um mesmo tipo de gás. Durante os testes realizados, foi monitorada a fração volumétrica de cada gás combustível presente no gás produzido.

As frações de hidrogênio e metano se mantiveram praticamente inalteradas. A massa específica média para o gás foi de $1,04 \text{ kg/m}^3$, à temperatura e pressão normais (CNTP). Esta foi calculada usando a sua composição elementar. Para efeito dos cálculos dos parâmetros que dependem dessas medidas, foram adotados os seguintes pontos máximos, calculados para as frações de CO, H₂ e CH₄, respectivamente, 20%; 15%; 2%. Assim, como pode ser observado nas tabelas Tabela 3-11 e (3-11), a seguir:

Tabela 3-11 Teor de CO, H₂ e CH₄ da Amostra 1.

Casos	V̇ Gás (LPM)	V̇ ar (LPM)	Composição da Amostra do dia 1 (% Vol.)				
			H ₂	CO	CH ₄	O ₂	Inertes
1	5	4	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
2	5	4,5	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
3	5	5	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
4	5	5,5	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
5	5	6	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
6	5	6,5	14,1	24,1	2,1	1,5	58,2
7	4	3	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
8	4	3,5	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
9	4	4	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
10	4	4,5	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
11	4	5	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
12	4	5,5	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
13	4	6	13,9	24,5	2,0	0,2	59,4
14	3	2,5	14,2	24,5	2,0	0,2	59,1
15	3	3	14,2	24,5	2,0	0,2	59,1
16	3	3,5	14,2	24,5	2,0	0,2	59,1
17	3	4	14,2	24,5	2,0	0,2	59,1
18	3	4,5	14,2	24,5	2,0	0,2	59,1
19	2	2	14,5	22,8	2,3	0,1	60,3
20	2	2,5	14,5	22,8	2,3	0,1	60,3
21	2	3	14,5	22,8	2,3	0,1	60,3

Na amostra 2 é possível observar diferenças mínimas nos teores destes compostos, estas diferenças são atribuídas a fatores relacionados com a matéria prima e à operação do gaseificador que não foram considerados neste trabalho, mas influenciam a composição do gás objeto de estudo. Alguns deles são os seguintes:

- Umidade da biomassa usada como matéria prima no processo de gaseificação;
- Presença de carvão no gaseificador o dia 2, produto dos remanescentes da gaseificação do dia 1;
- Condições meteorológicas nos dias do experimento.

A seguir, a composição dos casos medidos no dia 2 na Tabela 3-12

Tabela 3-12 Teor de CO, H₂ e CH₄ da Amostra dia 2.

Casos	V̇ Gás (LPM)	V̇ ar (LPM)	Composição da Amostra dia 2 (% Vol.)				
			H ₂	CO	CH ₄	O ₂	Inertes
1	5	4	13,3	22,2	1,3	0,3	63,0
2	5	4,5	13,3	22,2	1,3	0,3	63,0
3	5	5	13,3	22,2	1,3	0,3	63,0
4	5	5,5	14,9	19,1	2,0	0,4	63,7
5	5	6	14,9	19,1	2,0	0,4	63,7
6	5	6,5	14,9	19,1	2,0	0,4	63,7
7	4	3	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
8	4	3,5	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
9	4	4	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
10	4	4,5	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
11	4	5	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
12	4	5,5	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
13	4	6	15,6	17,5	1,7	0,2	65,0
14	3	2,5	15,8	19,0	1,7	0,2	63,3
15	3	3	15,8	19,0	1,7	0,2	63,3
16	3	3,5	15,8	19,0	1,7	0,2	63,3
17	3	4	15,8	19,0	1,7	0,2	63,3
18	3	4,5	15,8	19,0	1,7	0,2	63,3
19	2	2	15,9	21,0	1,9	0,2	60,9
20	2	2,5	15,9	21,0	1,9	0,2	60,9
21	2	3	15,9	21,0	1,9	0,2	60,9

- **Cálculo do tamanho das amostras.**

O tamanho para garantir nível de erro de 5% e nível de confiança de 95%, considerando um universo de 170 possíveis réplicas totais (34 casos com 5 réplicas cada um) é 119 amostras (21 casos, com 5 réplicas de cada um, adicionando 14 amostras para os casos que apresentarem desvios padrões altos e heterogeneidade nos dados agrupados). Este cálculo é feito a partir da aplicação da equação (3-18) descrita anteriormente.

3.2 Descrição dos Equipamentos.

Esta pesquisa está composta de duas montagens, sendo a primeira uma bancada de testes e a segunda, um sistema de gaseificação que vai fornecer o gás de biomassa objeto de estudo, o conjunto de estas partes foi chamado bancada de testes. A bancada é composta por cinco partes, as quais devem ser dimensionadas de maneira conjunta para garantir o cumprimento das especificações do trabalho, entre eles: um conjunto de queimadores, dois sistemas de fornecimento de ar e gás, os medidores de vazão e finalmente, os sistemas de aquisição de imagens.

3.2.1 Queimador.

Foram construídos dois tipos de queimadores, que são denominados de Verticais e horizontais. Esses queimadores são descritos a seguir:

- Queimador Horizontal com abertura (fenda) na tubulação de $\varnothing 3/8''$ e $\varnothing 1/2''$:

O queimador projetado foi feito com tubulação de aço inoxidável de dois diâmetros diferentes, $\varnothing 3/8''$ e $\varnothing 1/2''$, o tipo de aço usado é tipo AISI 304 com especificações industriais. Seu comprimento é 200 mm (A tubulação foi fechada com uma barra chata em aço carbono de $1/4''$, que adiciona 6.5 mm em cada extremo ao seu comprimento), estes queimadores contem duas furações de $1/8 \varnothing$ nos extremos para a entrada dos fluxos de ar e gás.

A altura do suporte do queimador é de 150 mm e a fenda na tubulação foi estabelecido de 3 mm de espessura, com comprimento de 30 mm. As vistas lateral e superior do queimador de $1/2$ e $3/8$, bem como, o suporte são apresentadas nas figuras (3-2) e (3-3), podem ser observadas com maior detalhe no anexo C: planos dos queimadores de pre- mistura.

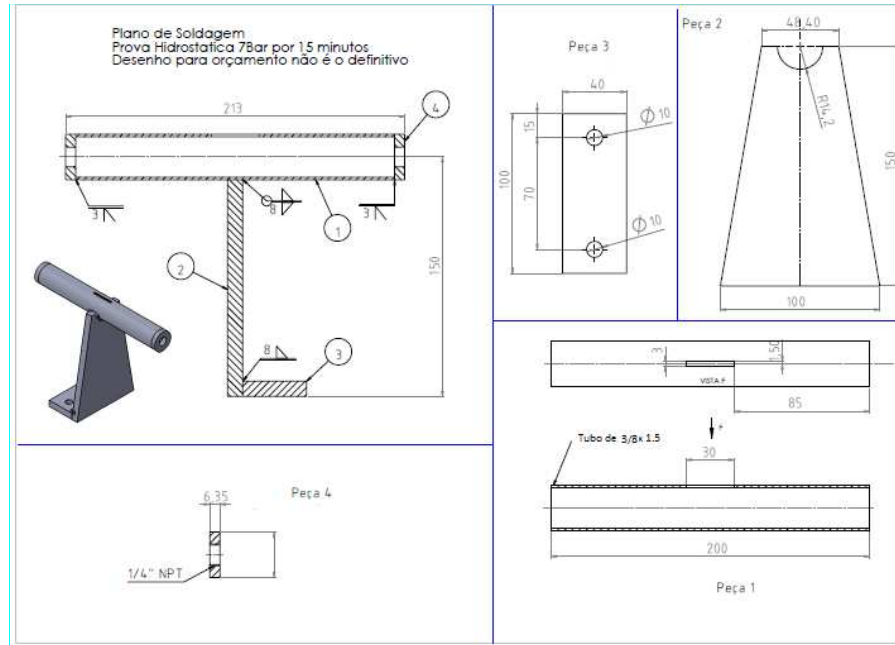


Figura 3-2 Planos do queimador de $\text{Ø } 3/8''$.

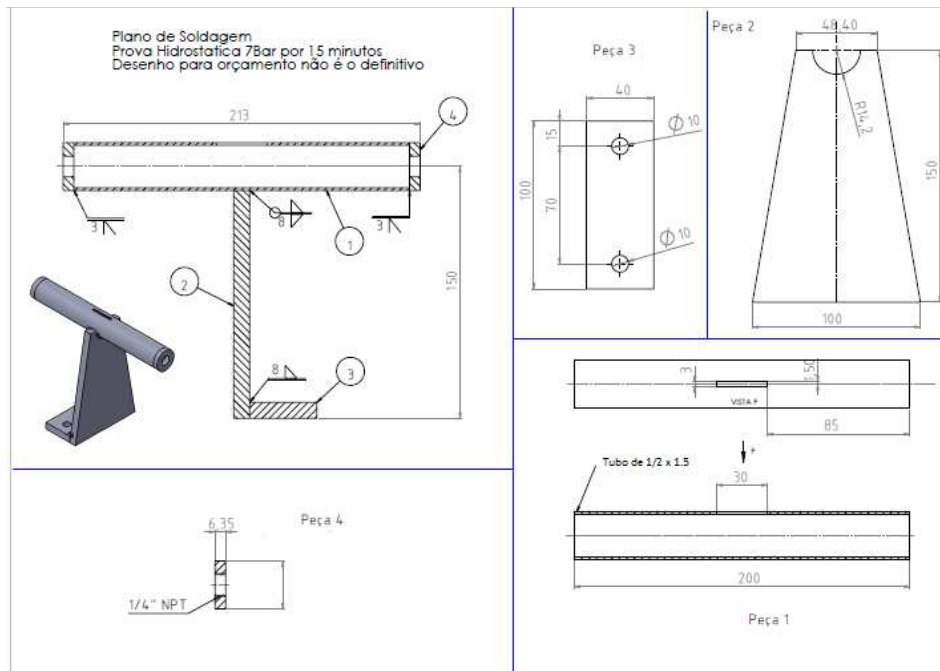


Figura 3-3 – Planos do queimador de $\text{Ø } 1/2''$.

- Queimador de tubulação vertical com câmara de pré-mistura e sistema de refrigeração:

Com relação a este tipo de queimador, também foram dimensionados dois, sendo a variável entre eles o diâmetro da área de pre-mistura. Ambos queimadores possuem uma cobertura exterior feita com uma tubulação de $\text{Ø } 1''$ de diâmetro externo, a fim de minimizar a perda de calor do processo e refrigerar a tubulação com a mistura não queimada.

No interior da camisa de diâmetro de $1''$, no caso do primeiro queimador, foi usada uma tubulação de aço inoxidável com diâmetro de $\frac{1}{2}''$ e 9 mm de diâmetro interno. No caso do segundo queimador, o diâmetro externo da tubulação é de $\frac{3}{8}''$, e o interno é de 6 mm. A câmara de mistura, foi feita com a união de dois perfis de 50 x 50 mm de aço carbono, sendo seu comprimento é 150 mm.

A câmara de pre-mistura é fechada com uma peça em aço carbono feita de uma barra chata de $\frac{5}{16}''$ de espessura e seção 50 x 50 mm, com duas furações de $\frac{1}{4}'' \text{ Ø}$, sendo que por estas furações entram os fluxos de ar e gás). Este queimador se encontra detalhado na Figura 3-4.

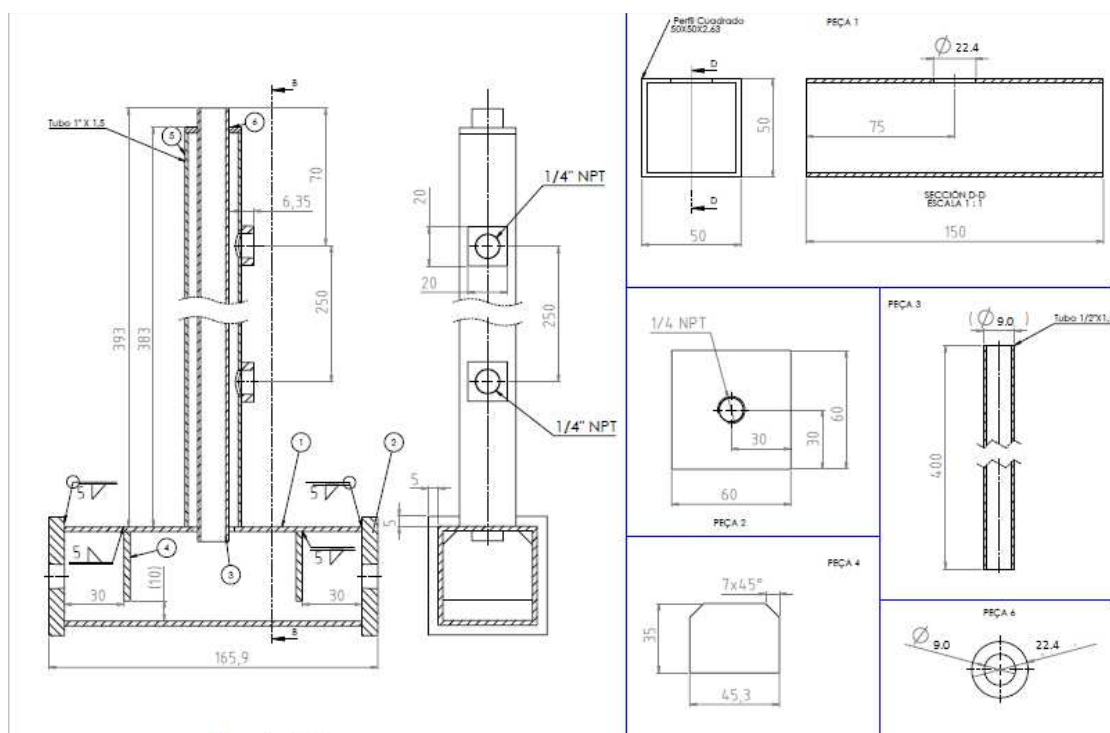


Figura 3-4 – planos dos queimadores com câmara de refrigeração

Foram realizadas provas de conceito, testes para conferir que os parâmetros operacionais delimitados no experimento eram adequados para o planejamento e para garantir chamas

laminares, no caso dos queimadores horizontais não foram satisfatórias, como pode ser observado na Figura 3-5 onde os cones de chama não se encontram definidos.

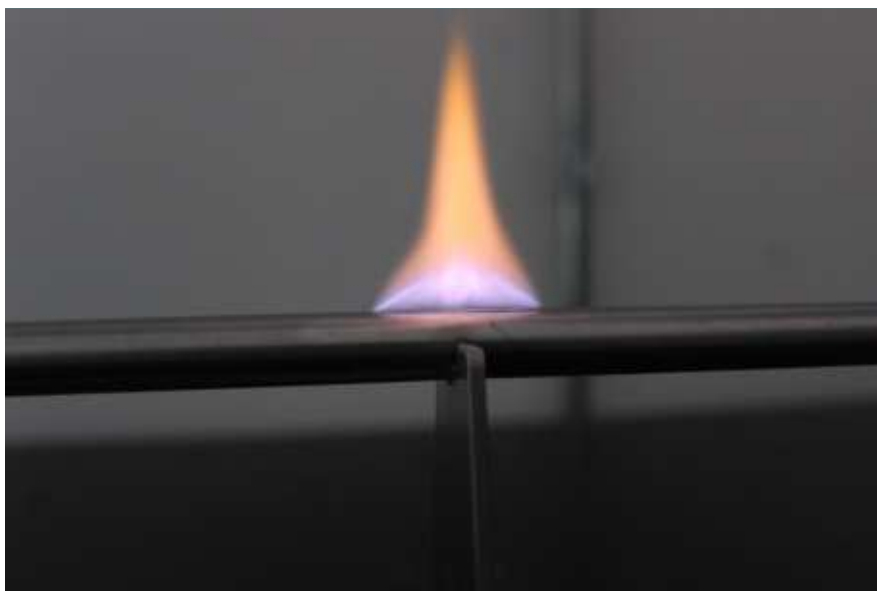


Figura 3-5 – Chama não laminar vista desde o queimador horizontal.

No caso do queimador vertical de $\text{Ø } 3/8''$ e diâmetro interno de 6 mm, a chama na prova de conceito não conseguiu ser estabilizada, o processo gerou deslocamento de chama e chamas difusivas com medições em diferentes vazões de ar e combustível. Portanto, este queimador também não foi usado, as ilustrações da instabilidade do queimador são apresentadas nas figuras 3-6a e b:



Figura 3-6 - Prova de conceito com queimador de diâmetro interno de 6mm e 400 mm de comprimento. (a). Chama difusiva (b) Deslocamento de chama.

O queimador selecionado para realizar os experimentos foi o de $1/2''$ de diâmetro (9 mm de diâmetro interno) e diâmetro externo, para refrigeração, de $1''$. As dimensões do queimador de $1'' \times 1/2''$ são apresentadas na Figura 3-7, onde são apresentadas as suas vistas.

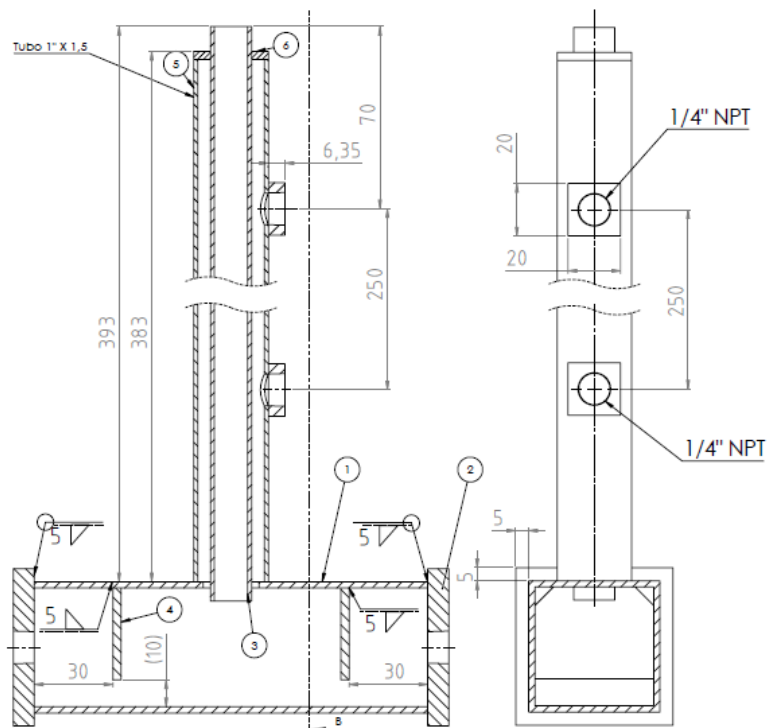


Figura 3-7 - Vista em corte do queimador com câmara de pré-mistura e sistema de refrigeração.

Na peça 1, mostrada figura (3-8), pode ser vista a câmara de mistura, construída a partir da união de duas cantoneiras de 50 x 50 mm de aço carbono, cujo comprimento é 150 mm. Nessa peça foi encaixada a tubulação do queimador de 9 mm (peça 3), e soldada a tubulação de 1" (peça 5).

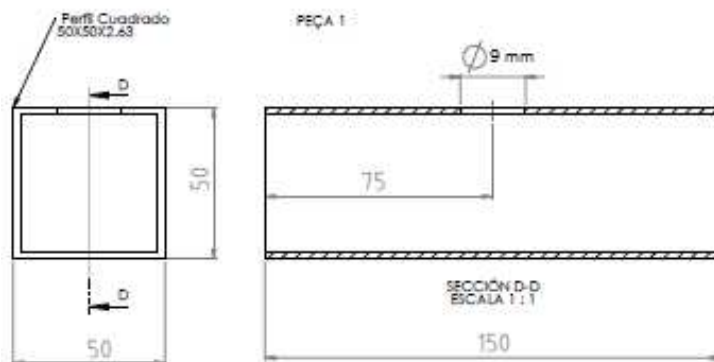


Figura 3-8 - Vistas da câmara de pré-mistura (peça 1).

A peça 2, mostrada na Figura 3-9, é a parte do sistema que tem a finalidade de fechar os cantos da câmara de mistura e fornecer os espaços para inserir o ar e o gás necessários ao

processo de combustão. É composto por uma barra chata de 60 x 60 mm e tem rosca NPT de 1/4".

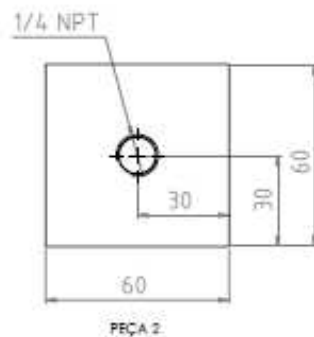


Figura 3-9 - Chapa com orifício roscado NPT de 1/4" para acoplamento de niple para entrada de ar e gás (peça 2).

Com relação à tubulação externa escolhida para o processo, ilustrada na figura (3-10), de 1" de diâmetro externo, 1/2" de diâmetro interno (9 mm milímetros ao interior da tubulação) e 400 mm de comprimento. Este comprimento garante que a mistura seja laminar e uniforme seguindo a fórmula que relaciona o comprimento com 50 vezes o diâmetro do queimador. A tubulação externa deve ter duas perfurações para garantir o fluxo de água no interior do queimador, que ao contato com a tubulação interna vai manter a temperatura do queimador.

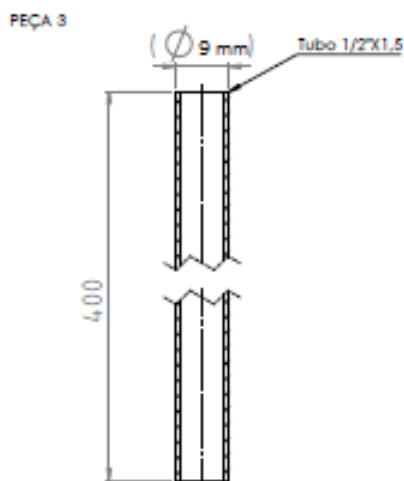


Figura 3-10 - Tubulação externa de 400 mm de comprimento e diâmetro externo de 1/2". (Peça 3).

No interior da câmara de pre-mistura do queimador são incluídas duas barras chatas de 1/8", ilustradas na Figura 3-11 que foram colocadas a 30 mm das entradas de ar e gás respectivamente, e tem como objetivo diminuir a diferença na velocidade do escoamento dos fluidos, a fim de igualar a velocidade dos dois, para garantir a estabilidade da chama e a qualidade da mistura.

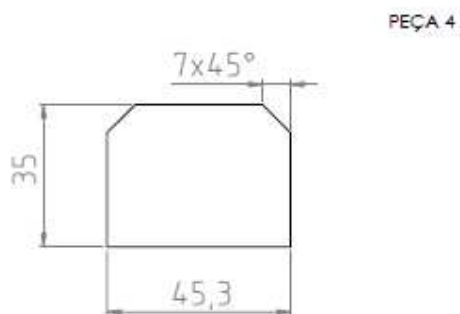


Figura 3-11 - Barra chata do aço para diminuir a velocidade dos fluidos e facilitar o fluxo laminar da mistura (peça 4).

A peça 6, de barra chata de 1/8", tem por finalidade fechar os extremos do sistema de refrigeração e teve a entrada para a tubulação interna de 1/2", como é observado na Figura 3-12.

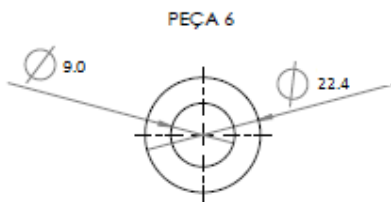


Figura 3-12 Peça 6: Fechadura do sistema de refrigeração para queimador de 1/2"

3.2.2 Fornecimento de ar.

A quantidade de ar fornecido na queima deve ser regulada a fim de calcular a razão de equivalência dos gases objeto de estudo; entretanto, a pressão e temperatura do ar entrando no queimador não são consideradas, pois são quase as condições do ambiente. A finalidade do compressor é fornecer o ar para a combustão, e possibilitar regular as condições desse ar para

estabelecer premissas gerais. A seguir as condições de fábrica do equipamento na Tabela 3-13:

Tabela 3-13 Especificações dos compressores

Fonte: (V8 BRASIL, 2017)

Rotação	2800 RPM
Potência	2 HP
Corrente	6 A
Tipo compressor	Compressor de Ar V8 – 8.5 / 50
Volume reservatório	50 l
Pressão Máxima/ Mínima	115 PSI/79 PSI
Deslocamento teórico	192 l/min
Volume de Óleo	300 ml

Na Figura 3-13 se ilustra o compressor usado na bancada, o qual é conectado ao rotâmetro que mede a vazão de ar usada no processo.



Figura 3-13 Compressor de Ar para a Bancada

3.2.3 Fornecimento de gás GLP e biomassa.

Para o planejamento padrão, o experimento foi feito com GLP, um botijão de 13 kg produzido pela companhia Petrobras® e distribuído pela Nacional Gás. O gás é uma mistura de Butano e Propano como já foi mencionado anteriormente nos parâmetros básicos na metodologia; inicialmente a massa específica deste gás segunda (GLP; Tecnologia, 2014) é

2.32 kg/m³, este valor foi usado como ponto de referência para os cálculos deste trabalho. O botijão é mostrado na Figura 3-14.



Figura 3-14 Botijão de gás de 13 kg para os testes padrão.

Para a validação da metodologia proposta foi usado GLP, para os testes com o objeto de estudo o tipo de material utilizado é biomassa florestal que provem de Eucalipto, em pesquisas anteriores no NEST/UNIFEI, os trabalhos de Martinez, (2009) e Galindo, (2012) caracterizaram antes esse tipo de material, a composição elementar e a análise imediata e o PCI da biomassa destes autores, são mostrados a seguir na Tabela 3-14:

Tabela 3-14 Análise elementar, composição imediata e PCS da biomassa de eucalipto

Autor	Análise Imediata			Análise Elementar					PCI [MJ/kg]
	CF	V	Cinzas	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	
(Galindo, 2012)	15,66	83,27	1,34	45,78	5,92	42,83	0,4	0,01	18,43
(Martinez, 2009)	21,30	75,35	3,35	46,04	5,82	44,49	0,3	0	18,64
(Presente, 2017)				49,25	5,99	43,07	0,3	0,01	19,4

O gás usado neste experimento foi produzido no gaseificador de leito fixo co-corrente da Universidade Federal de Itajubá, apresentado na Figura 3-15.



Figura 3-15 Gaseificador de Leito Fixo Co-Corrente

O gaseificador foi operado a um estágio de fornecimento de ar. A seguir na Tabela 3-15, os parâmetros nominais do gaseificador.

Tabela 3-15 Parâmetros Nominais do Gaseificador

Potência Térmica	45 kw
Potência de Geração de Energia Elétrica	10 kw
Potência Térmica Específica	1200 kW/m ² (\pm 500)
Consumo de Biomassa Base Seca	10 kg/h
Consumo de Biomassa Úmida	12 kg/h
Tamanho da Biomassa	20 – 60 mm.
Razão de Equivalência	0,35

Foi utilizado um sistema de limpeza de amostras de gás, para determinar a concentração volumétrica de alguns componentes na mistura, para melhorar seu processo de geração de combustível de boa qualidade. Este sistema de limpeza de gases é ilustrado na Figura 3-16.



Figura 3-16 Sistema de Limpeza de Gases na Saída do Gaseificador.

Posteriormente, um sistema de análise contínuo de gases que provém informação sobre a composição do gás, especificamente dos conteúdos de H_2 , CO e O_2 . Os equipamentos são mostrados a seguir na Figura 3-17:



Figura 3-17 Calomat 6 e Ultramat 23. Instrumentos de medição de Teor de Gases na Saída do Gaseificador.

O gás produzido neste gaseificador com o ponto de operação descrito foi usado para o desenvolvimento do trabalho apresenta poder calorífico de 5 MJ/Nm^3 , para uma concentração de CO de 20%, de H_2 de 15% e CH_4 de 2%, aproximadamente como pode ser observado na

Tabela 3-16.

Tabela 3-16 Composição volumétrica do gás obtido

Composição Volumétrica (%)				PCI [MJ/kg]
CO	H ₂	CH ₄	Inertes	
20,25	14,96	1,8	62,70	4,46

Para realizar os testes, foi necessário o uso de um tanque de acumulação do gás e uma tubulação que o transporte até a bancada de testes, além de uma saída alternativa do gás, para conferir a qualidade da chama gerada para o trabalho, apresentada na Figura 3-18.



Figura 3-18 Montagem do processo de gaseificação - Tanque de armazenagem de gás e gaseificador de leito fixo

3.2.4 Composição da Bancada de testes.

A bancada de testes foi dividida em duas partes; inicialmente, é preciso de uma estrutura para realizar os testes, composta por 5 partes. A primeira foi formada por diferentes tipos de queimadores de pré-mistura, um sistema de fornecimento de ar e gás (GLP e biomassa), além disso, sistemas de controle para as vazões e a qualidade das imagens obtidas. Todos esses equipamentos foram descritos com detalhe na seção 3.2 Descrição dos equipamentos

Na Figura 3-19 é apresentada a bancadas para coleta de amostras, esta bancada apresenta os materiais para realizar os testes de observação direta e de shadowgraph.

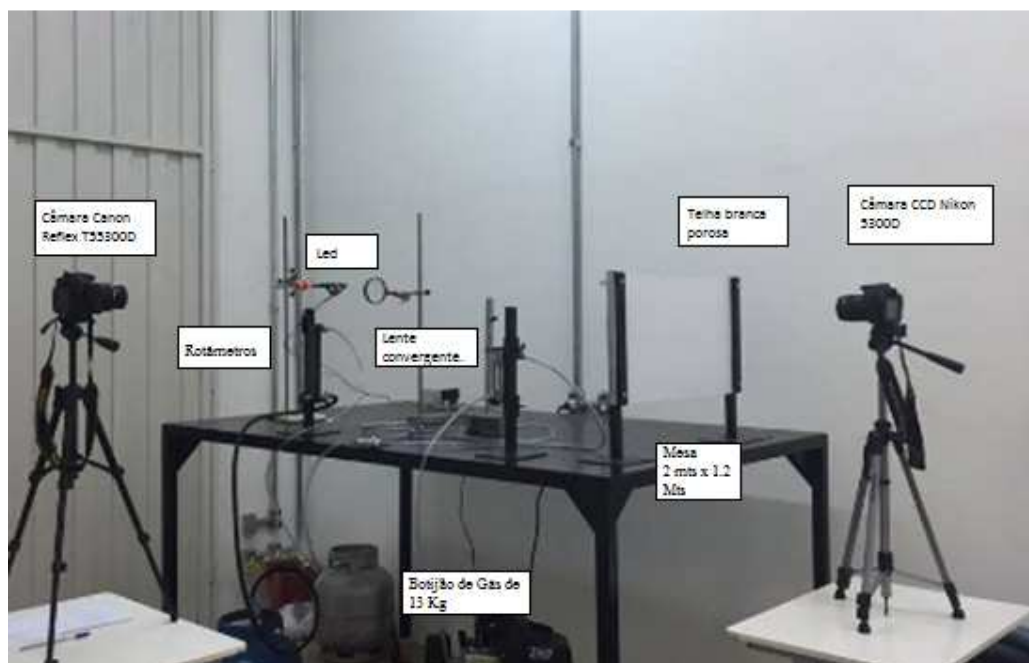


Figura 3-19 Montagem de Schlieren Direito e Shadowgraph.

A figura 3-19, mostra a bancada de visualização simultânea do método shadowgraph (a câmera atrás do suporte com tela para a projeção da sombra) e no lateral a montagem com a câmera para a imagem de visualização direta.

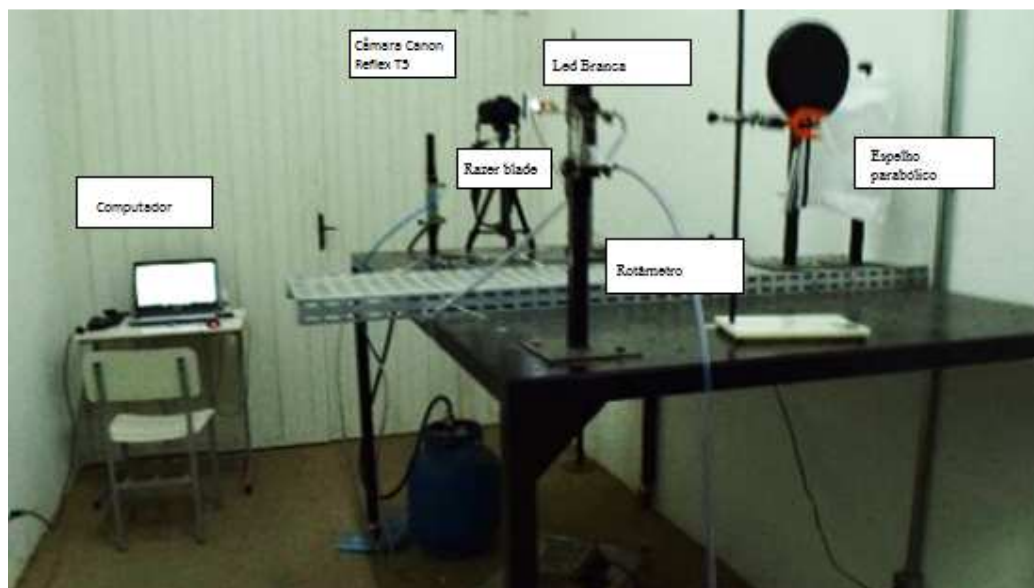


Figura 3-20 Montagem com bancada e Schlieren.

Na imagem da figura 3-20 se mostra a montagem com espelho parabólico newtoniano, led e pinhole junto com a câmara configurada para a medição dos ângulos do cone por meio da metodologia Schlieren.

3.2.5 Sistema de medição de vazão.

Para medir a vazão de entrada do combustível e comburente, foram usados três tipos de rotômetros, ilustrados na Figura 3-21.



Figura 3-21 Rotômetros Usados para o Experimento

Para o planejamento padrão (Gás GLP), foi usado um rotômetro que mede intervalos de 0 – 1 LPM, pois sua massa específica é alta, comparado com os outros gases que fizeram parte destes testes. No caso do gás de biomassa, de massa específica menor, o qual mede

intervalos desde 1 até 5 LPM. Para o ar foi usado um rotâmetro com intervalos desde 1 até 10 LPM. Os parâmetros destes equipamentos são apresentados na Tabela 3-17:

Tabela 3-17 Parâmetros Operacionais dos Rotômetros

Tipo de Fluido	GLP	Gás Pobre	Ar Comprimido.
Características do gás	Gás composto por uma mistura de Propano e Butano, com massa esp. De 2.2 Kg/m ³	Poder calorífico de 5 MJ/Nm ³ para uma concentração de CO de 20%, de H ₂ de 17% e CH ₄ de 2% 62% de N ₂	79% N ₂ 21% O ₂
Pressão de Operação:	100 PSIG máx. a 21 °C (70 °F)	100 PSIG máx. a 21 °C (70 °F)	100 PSIG máx. a 21 °C (70 °F)
Temperatura normal é máxima:	65 °C (150 °F) máx. a 0 PSIG	65 °C (150 °F) máx. a 0 PSIG	65 °C (150 °F) máx. a 0 PSIG
Faixa de vazão desejada se for gás:	Vazão necessária condensada: 0 – 1 LPM	Vazão necessária condensada: 10 LPM	Vazão necessária condensada: 10 LPM

3.2.6 Sistema de aquisição de imagens.

A bancada para a visualização da frente da chama neste trabalho encontra-se locado no novo prédio do NEST, junto com a bancada testes e o gaseificador de leito fixo co-corrente. O propósito desta montagem é capturar as imagens do cone da chama gerada pelas diferentes geometrias de queimadores tipo Bunsen.

Após da realização das provas de conceito foi feita a compra de uma lente parabólica de 150 mm de diâmetro, a qual foi ajustada com um suporte à bancada para cumprir com os requerimentos do projeto. Também, foram adquiridos os sistemas de medição das vazões e projetados os queimadores de pré-mistura, depois de varias tentativas só foi usado o queimador tipo Bunsen vertical de ½ Polegadas de diâmetro externo e 9 mm de diâmetro interno, com câmara de pré-mistura e isolamento para evitar as perdas da temperatura.

As duas técnicas pesquisadas na literatura “schlieren” e “shadowgraph” são usadas neste trabalho e comparadas com a observação direta para o planejamento padrão, com o objeto de minimizar o erro nas medições. A seguir Tabela 3-18 são mostrados os equipamentos que foram usados nestas montagens.

Tabela 3-18 Equipamentos Precisos para Montagem de Schlieren Direto, Shadowgraph Básico e Observação Direta.

Schlieren direto	Shadowgraph básico	Observação Direta
<ul style="list-style-type: none"> - Câmera Canon Reflex T5. - Lâmina de metal corta luz. - Espelho esférico. - Suporte para o Espelho. - 2 Tripés. - Led de luz branca de baixa potência. 	<ul style="list-style-type: none"> - Câmera CCD Nikon 5300D - Uma lente convergente. - 1 Telha branca porosa para refletir a sombra do objeto. - 2 Tripés. - Led de luz branca de baixa potência. 	<ul style="list-style-type: none"> - Câmera Canon Reflex T55300D - 1 Tripé. - Espaço com baixo conteúdo de Luz.

Um esquema básico da bancada de “schlieren direto” pode ser visto na figura.

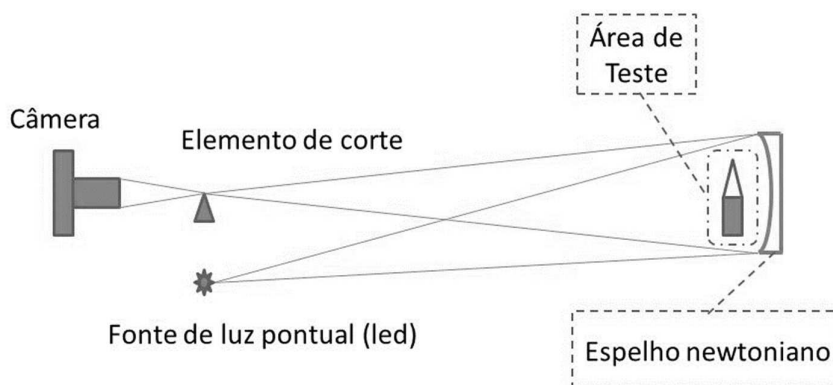


Figura 3-22 Montagem Schlieren direto.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 Testes com o experimento Padrão.

4.1.1 Prova de conceito.

Os testes com GLP foram realizados no prédio do novo galpão do NEST, sobre uma estrutura projetada para a bancada, apresentada na seção 3.2.4. Antes de realizar esses testes, foi necessário elaborar uma prova de conceito, a fim de ajustar aspectos iniciais do experimento projetado e dos fenômenos de visualização de imagens “schlieren” e “shadowgraph”, para atingir o objetivo do projeto.

Quando a montagem foi aprovada, foram testados inicialmente os fluxos de misturas Ar/GLP. A seguir na Figura 4-1 se ilustra o teste com GLP utilizando as duas técnicas de aquisição de imagens e a observação direta.



Figura 4-1 Comparativo observação direta, shadowgraph, schlieren.

Os ângulos do cone da queima controlada para a prova de conceito foram registrados com o método de observação direta. Para se obter estabilidade na combustão, considerando-se a faixa de medição dos rotâmetros e os limites de retorno de chama e deslocamento, foi usada uma vazão de gás de 0,15 LPM (corregida 0,11 LPM) em queima conjunta com 5 vazões de ar apresentadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Dados da prova de conceito

\dot{V} Ar l/min	Φ	\dot{V} Mistura m ³ /s	V_u m/s	α	S_L cm/s
3	1,04	5,1813E-05	0,7275	22	13,9
3,5	0,89	6,0147E-05	0,8445	32,5	23,6
4	0,78	6,8480E-05	0,9615	33,13	27,4
4,5	0,69	7,6813E-05	1,0785	30	27,9
5	0,62	8,5147E-05	1,1956	26,9	27,8

Na Figura 4-2 são apresentados os resultados obtidos para os testes com a visualização direta da chama, onde se observa a correlação negativa entre a razão de equivalência e a velocidade de chama, pois quando o ϕ aumenta a S_L diminui. O gráfico que representa o diagrama completo de S_L versus Φ é parecido com uma parábola, e contém correlações positivas e negativas. Neste trabalho só foi medida a parte da distribuição com menores vazões.

Os valores obtidos do S_L estão em uma faixa de 0,14 -0,28 m/s, embora os dados da literatura apontem na orden de 0,4 m/s; encontrados por outros autores na literatura por Razus *et al.*, (2010) e Akram; Kumar; Saxena, (2013). A tendência dos dados é homogênea; todavia, observa-se um afastamento com relação à razão de equivalência, apresentando os maiores valores de velocidade de chama fora de $\phi = 1$, o que era o esperado. Isto, pois quando a queima é estequiométrica a velocidade de chama deve ser maior.

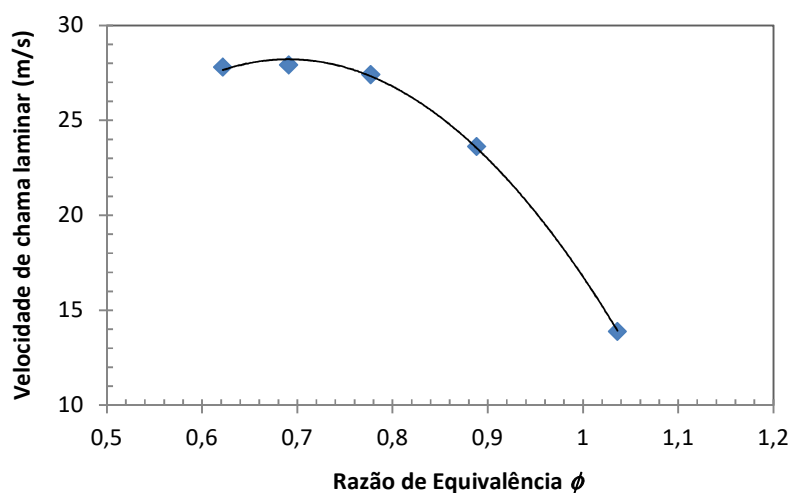


Figura 4-2 - Valores de velocidade de chama laminar para o GLP.

Estas alterações que diferenciam a figura resultante dos resultados na literatura provavelmente ocorreram pelo fato do queimador não ter sido projetado para as características do GLP e sim do gás pobre. Dessa forma não foi possível estabilizar a chama para razões de equivalência maiores, apresentando características turbulentas e o fenômeno do descolamento da chama.

Na Tabela 4-2 foram avaliados dois parâmetros, o Sig (Bilateral) a qual é uma variável que mede a possibilidade que as amostras tomadas não pertençam a uma distribuição linear (quando for maior ou igual de 0,05) e que não exista correlação forte entre elas, e a correlação de Pearson, variável que avalia a relação das amostras se a distribuição fora linear.

Tabela 4-2 Análise de correlação linear entre a velocidade de chama e o ângulo do cone

		Φ	S_L
Φ	Correlação de Pearson	1	-.326
	Sig. (bilateral)		.592
	N	5	5
S_L	Correlação de Pearson	-.326	1
	Sig. (bilateral)	.592	
	N	5	5

Para esta análise, usa-se a correlação de Pearson assumindo a hipótese que o comportamento da distribuição é linear, o qual é controvertido com os resultados como é mostrado no gráfico da Figura 4-2, onde os coeficientes de sig que indicam que não existe a possibilidade que os dados sigam este tipo de distribuição. A distribuição de maior ajuste segundo a forma da tendência é um polinômio de terceiro grau.

Estes resultados são validados nos testes do planejamento padrão na secção 4.1.2.

4.1.2 Resultados dos Testes com Planejamento Padrão.

Nesta secção, são apresentados os resultados da velocidade de chama para três arranjos de testes feitos com as ferramentas de visualização de imagens: observação direta, “shadowgraph”, “schlieren”.

- **Resultados com a visualização usando o método de visualização direta**

Os resultados deste método conseguem medir ângulos do cone desde 2,85 até 6,76. A velocidade de chama máxima registrada em média se encontra no último caso, que contém as amostras desde 31 – 34 com razão de equivalência de 0,629, apresentando 0,30 m/s. A velocidade de chama média é 0,20 m/s e a ϕ média é 0,76. Os resultados do caso 6 não foram incluídos devido a uma percentagem de erro nas amostras, detalhes dos resultados na .

Tabela 4-3.

Tabela 4-3 Velocidade de Chama Calculada com Observação Direta

Resultados do Método observação direta					
Casos	ϕ	V_m (m/s)	$\alpha/2$	S_L (m/s)	S_L Média (m/s)
1-5	0,90	1,892	2,845	0,094	0,108
			3,145	0,104	
			3,340	0,110	
			3,260	0,108	
			3,715	0,123	
6-10	0,84	2,023	3,360	0,119	0,130
			4,005	0,141	
			3,550	0,125	
			3,620	0,128	
11-14	0,79	2,154	4,190	0,157	0,169
			4,760	0,179	
			4,865	0,183	
			4,215	0,158	
15-19	0,74	2,285	4,820	0,192	0,243
			6,425	0,256	
			6,750	0,269	
			5,795	0,231	
20-25	0,70	2,416	6,680	0,266	0,261
			6,170	0,260	
			6,445	0,271	
			6,105	0,257	
31-34	0,63	2,677	6,030	0,254	0,301
			6,210	0,261	
			6,355	0,296	
			6,340	0,296	
			6,485	0,302	
			6,755	0,315	
			6,295	0,294	

Com estes dados e ajustando a distribuição do fenômeno, o gráfico dos resultados ilustrado na Figura 4-3, coincide em grande proporção com os resultados coletados na

literatura. O gráfico é uma representação parcial do comportamento da queima do GLP em temperatura e pressão normais (CNTP).

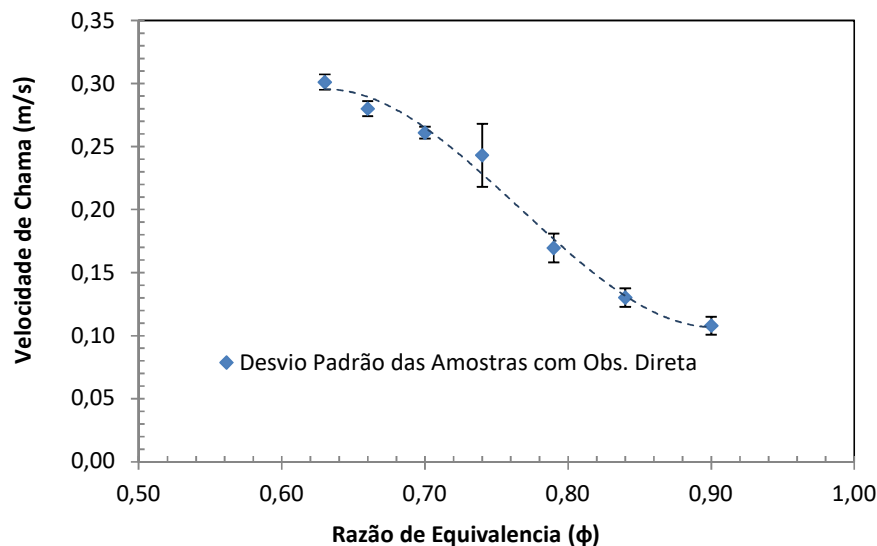


Figura 4-3 - Velocidades de chama usando observação direta

- **Resultados com a visualização usando o método do “shadowgraph”.**

O método do “shadowgraph” emite uma sombra da medição real, então esta técnica não emite imagens, os fenômenos de deslocamento dos feixes de luz podem gerar erros nas medições. Por isso, ao final do seu uso foi medido o desvio padrão dos dados comparados com a técnica “schlieren”,

Na Tabela 4-4 foram achados os valores da velocidade da mistura não queimada os quais ao serem multiplicados pelo seno do ângulo meio da chama pré-misturada fornecem como resultado a velocidade de chama nos pontos selecionados. A câmara usada para as amostras foi a Nikon® 5300D com baixa exposição para minimizar o efeito da luz nas amostras.

Os resultados deste método registram medições dos ângulos meios do cone medidos em graus, desde 2,12 até 6,35, e a velocidade de chama máxima registrada em média se encontra no caso 7, que contém as amostras desde 31 – 34 com razão de equivalência de 0,63 apresentando 27 cm/s. A velocidade de chama média registrada foi 20 cm/s com ϕ média de 0.75.

Tabela 4-4 Velocidade de chama calculada com “shadowgraph”

Resultados do método “shadowgraph”					
Amostras	(ϕ)	V_u (m/s)	$a/2$	S_L (m/s)	S_L Média (m/s)
1-5	0,898	1,892	2,52	0,083	0,175
			3,3	0,109	
			6,555	0,216	
			8,04	0,265	
			6,19	0,204	
6-10	0,838	2,023	2,535	0,089	0,137
			2,12	0,075	
			3,415	0,120	
			6,655	0,234	
			4,74	0,167	
11-14	0,786	2,154	2,72	0,102	0,137
			2,8	0,105	
			3,195	0,120	
			5,845	0,219	
15-19	0,740	2,285	5,52	0,220	0,222
			5,35	0,213	
			6,96	0,277	
			5,65	0,225	
			4,35	0,173	
20-25	0,699	2,416	5,28	0,222	0,217
			5,735	0,241	
			6,43	0,271	
			4,39	0,185	
			3,9	0,164	
26-30	0,662	2,547	4,185	0,186	0,222
			5,13	0,228	
			5,4	0,240	
			4,965	0,220	
			5,31	0,236	
31-34	0,629	2,677	6,055	0,282	0,270
			5,31	0,248	
			6,345	0,296	
			5,965	0,278	
			5,305	0,248	

Na literatura esta distribuição de dados é comparada com gráficos polinomiais. Os resultados da velocidade de chama seguem uma distribuição e a tendência dos dados a seguir na figura 4-4.

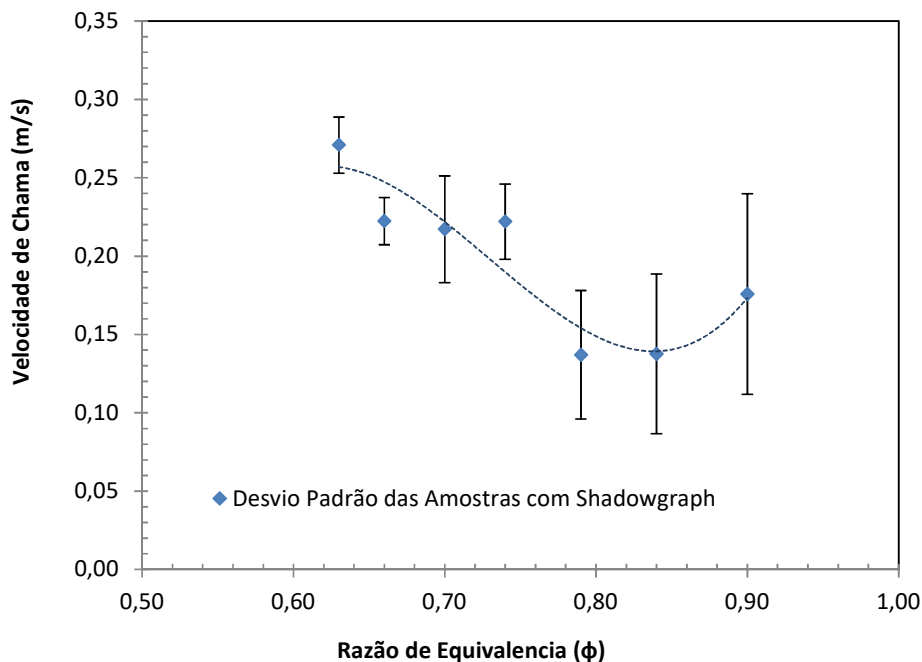


Figura 4-4 Velocidade de Chama Usando Shadowgraph

4.1.3 Resultados com a visualização usando o método do “Schlieren”

A percentagem de erro dos dados obtidos a través de Schlieren é menor comparada com as outras técnicas usadas. A seguir na tabela 4-5 os resultados destas medições:

Tabela 4-5 Velocidade de chama calculada pelo método Schlieren.

Resultados do Método Schlieren					
Amostras	f	V_u (m/s)	$a/2$	V_m (m/s)	S_L Média (m/s)
1-5	0,90	1,892	3,575	0,118	0,120
			3,585	0,118	
			3,860	0,127	
			3,560	0,117	
			3,555	0,117	
6-10	0,8	2,023	4,120	0,145	0,149
			4,095	0,144	
			3,565	0,126	
			4,575	0,161	
			4,720	0,166	
			4,570	0,172	
			4,320	0,162	
			5,055	0,190	

Amostras	f	V _u (m/s)	a/2	V _m (m/s)	SL Média (m/s)
15-19	0,74	2,285	6,610	0,263	0,256
			6,665	0,265	
			5,585	0,222	
			6,665	0,265	
			6,705	0,267	
20-25	0,70	2,416	7,130	0,300	0,275
			5,995	0,252	
			6,645	0,280	
			6,735	0,283	
			6,230	0,262	
26-30	0,66	2,547	6,665	0,296	0,306
			6,760	0,300	
			7,045	0,312	
			7,165	0,318	
			6,845	0,304	
31-34	0,63	2,677	7,395	0,345	0,300
			6,060	0,283	
			6,345	0,296	
			5,595	0,261	
			6,630	0,309	

Os resultados deste método atingem ângulos do cone desde 3,56 até 7,40 graus e a velocidade de chama máxima registrada em média se encontra no caso 7, que contém as amostras desde 31 – 34 com relação de equivalência de 0,63, apresentando 30 cm/s. A média da velocidade de chama é 22 cm/s e da ϕ 0,75, a tendência destas amostras, Figura 4-5.

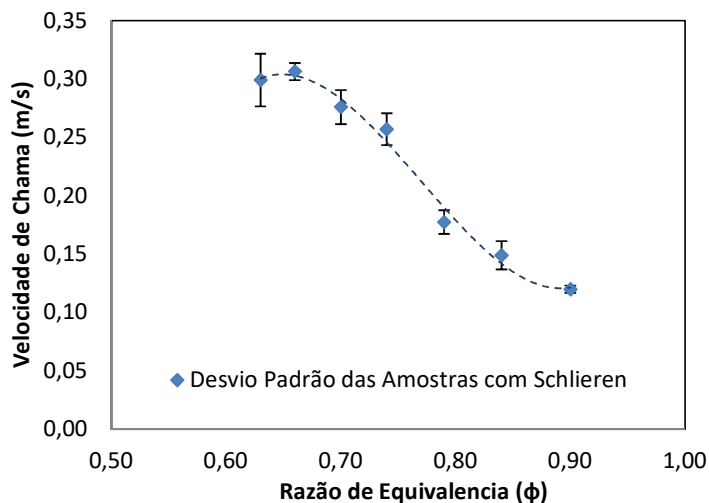


Figura 4-5 Velocidade de chama calculada através da técnica“Schlieren”

4.2 Testes com o experimento objeto de estudo.

4.2.1 Prova de conceito com o gás objeto de estudo.

A prova de conceito da adaptação da montagem para os testes com o gás objeto de estudo foi feita através do método de observação direta, pela sua simplicidade.

Para os testes com gás pobre houve a necessidade de substituir o rotâmetro do combustível, (para as amostras com GLP foi usado um rotâmetro de 0 – 1 LPM). Utilizou-se então, um com fundo de escala de 5 LPM.

Inicialmente, o controle de vazão se mostrou difícil, pois o gás estava chegando com muita variação devido a problemas operacionais do sistema de gaseificação. Posteriormente, esse problema foi corrigido e foi possível realizar os testes, obtendo-se uma chama adequada à medição com o cone de frente de chama fechado.

Durante os testes, foi monitorada a fração volumétrica de cada componente do gás combustível. Sendo o perfil da composição apresentado na Figura 4-6, observa-se uma variação significativa no teor de CO, o que não é comum para esse tipo de reator. Todavia o seu valor se manteve a maior parte do tempo acima dos 20%. As frações de hidrogênio e metano se mantiveram praticamente inalteradas. Estas mudanças podem ser atribuídas a mudanças nos parâmetros operacionais do gaseificador.

Para efeito dos cálculos dos parâmetros que dependem dessas medidas foram considerados os valores médios de CO, H₂ e CH₄, respectivamente, 21%; 15%; 1,8%.

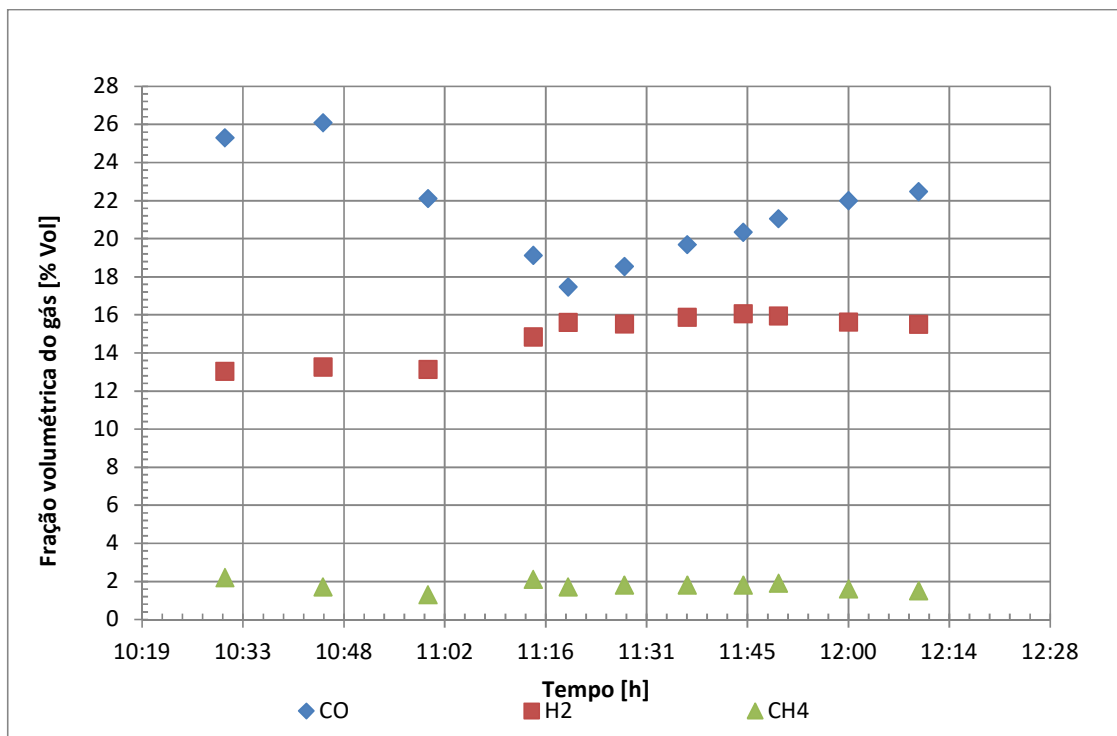


Figura 4-6 – Fração volumétrica do gás para os testes realizados

As temperaturas apresentadas no gráfico da Figura 4-7 foram obtidas pelo uso de termopares, cujas extremidades se encontram próximas as paredes internas do reator. O posicionamento adequado seria no centro; entretanto, como os mesmos são posicionados radialmente a sua secção, se eles atingissem o centro haveria problemas com relação ao deslocamento do combustível no seu interior durante a operação. Isso pode ser resolvido com a adoção de um sistema de medição de temperatura que posicione uma sonda de forma longitudinal à secção do reator, mas, mesmo assim, como o diâmetro do reator é pequeno, poderia haver problemas com relação ao deslocamento da biomassa,

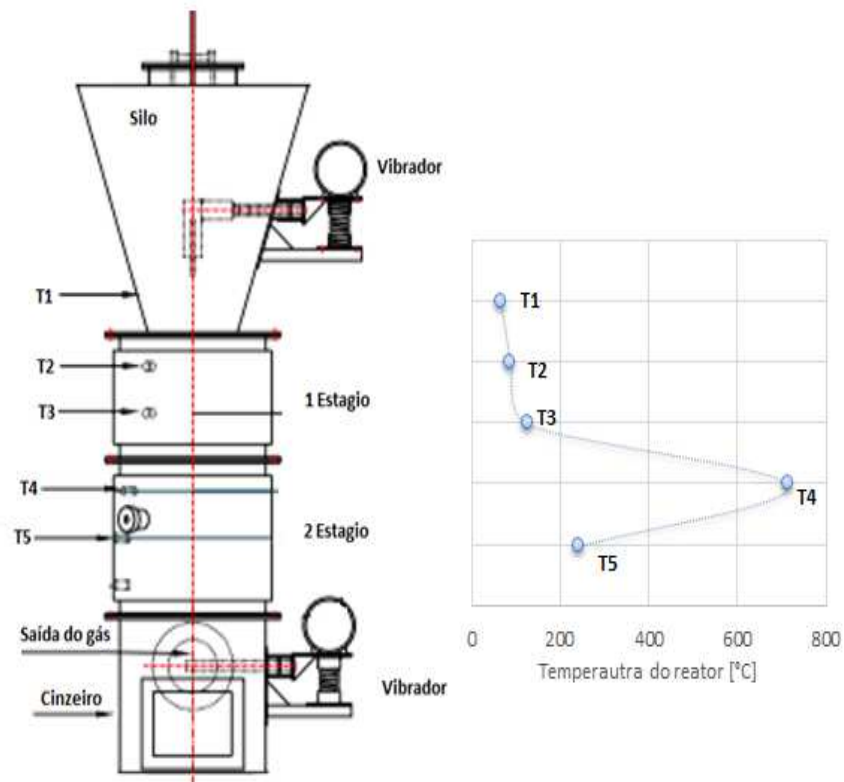


Figura 4-7 – Temperatura no leito próximo a parede interna do reator

Na Tabela 4-6 são apresentados os resultados obtidos para os valores da velocidade de chama para o gás pobre (S_L) utilizando-se o método de observação direta para registro do cone de chama. Nesta tabela observa-se que S_L assume valores desde 0,19 m/s a 32 m/s em dependência da razão de equivalência (ϕ).

Tabela 4-6 Resultado a partir do registro direto da prova de conceito.

Vazão de combustível [LPM]	$[\phi]$	S_L [m/s]	α	$\alpha/2$
2,12	1,09	0,22	26	13
	0,87	0,27	29	14,5
	0,73	0,19	18	9
Vazão de combustível [LPM]	$[\phi]$	S_L [m/s]	α	$\alpha/2$
3,18	1,31	0,21	16	8
	1,09	0,25	18	9
	0,93	0,29	19	9,5
	0,82	0,26	16	8
	0,73	0,26	15	7,5
Vazão de combustível [l/min]	$[\phi]$	S_L [m/s]	α	$\alpha/2$
4,24	1,24	0,25	14	7
	1,09	0,28	15	7,5
	0,97	0,26	13	6,5
	0,87	0,25	12	6
	0,79	0,27	12	6
	0,73	0,23	10	5
Vazão de combustível [l/min]	$[\phi]$	S_L [m/s]	α	$\alpha/2$
5,30	1,36	0,21	10	5
	1,21	0,27	12	6
	1,09	0,28	12	6
	0,99	0,32	13	6,5
	0,91	0,28	11	5,5
	0,84	0,32	12	6

Foi tomada uma amostra para cada um dos casos estabelecidos para a prova de conceito. As chamas geradas e as velocidades obtidas para cada razão estequiométrica usando o método de visualização direta, encontram-se nas tabelas 4-7,4-8,4-9 e 4-10, para cada vazão objeto de estudo.

Tabela 4-7 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 2,11 l/min de gás

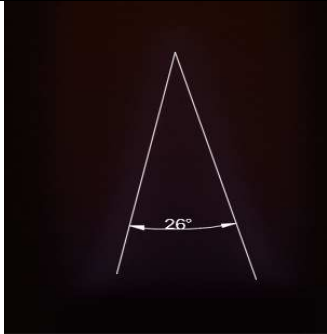
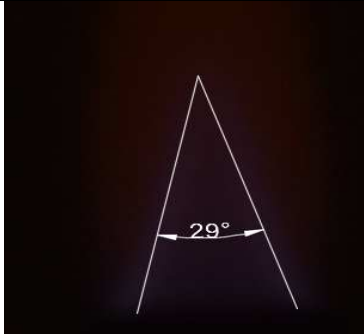
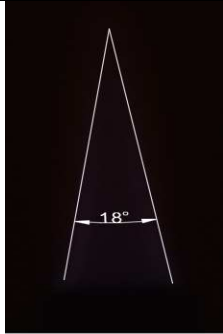
2 l/min ar	2,5 l/min ar	3 l/min ar
		
$\phi = 1,01$	$\phi = 0,87$	$\phi = 0,73$
$S_L = 0,22$ [m/s]	$S_L = 0,27$ [m/s]	$S_L = 0,19$ [m/s]

Tabela 4-8 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 3,18 l/min de gás

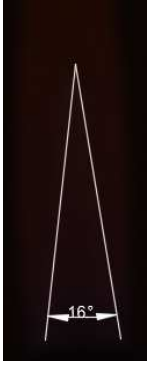
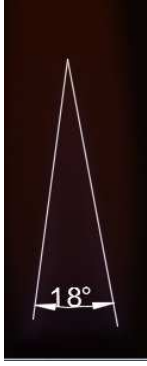
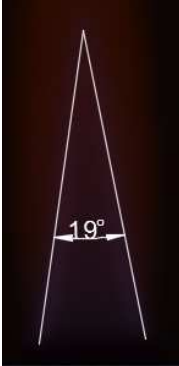
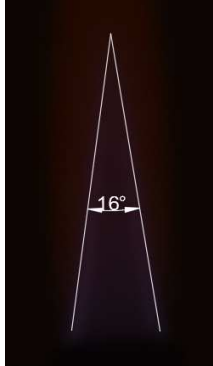
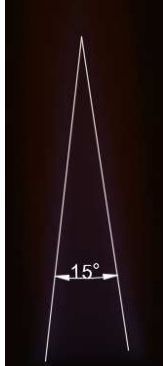
2,5 l/min ar	3 l/min ar	3,5 l/min ar	4 l/min ar	4,5 l/min ar
				
$\phi = 1,31$	$\phi = 1,09$	$\phi = 0,93$	$\phi = 0,82$	$\phi = 0,73$
$S_L = 0,21$ [m/s]	$S_L = 0,25$ [m/s]	$S_L = 0,29$ [m/s]	$S_L = 0,26$ [m/s]	$S_L = 0,26$ [m/s]

Tabela 4-9 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 4,24 l/min de gás


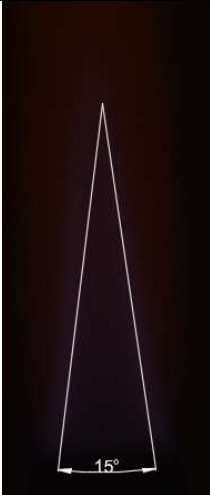
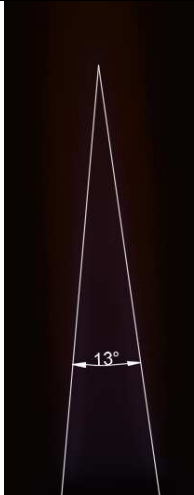
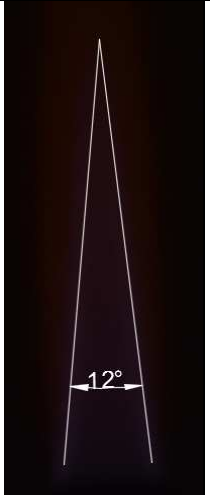
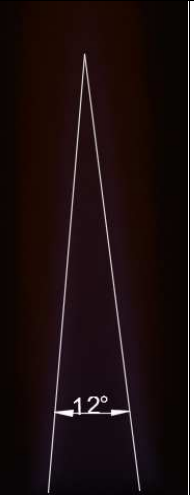
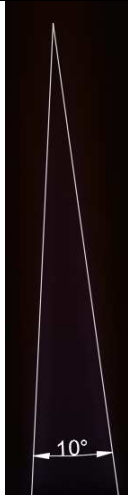
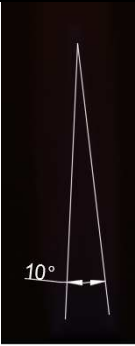

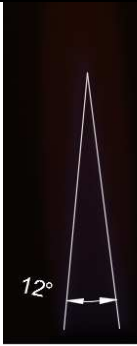
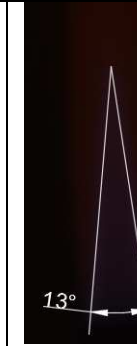
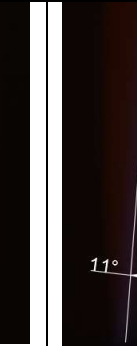
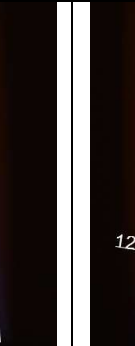
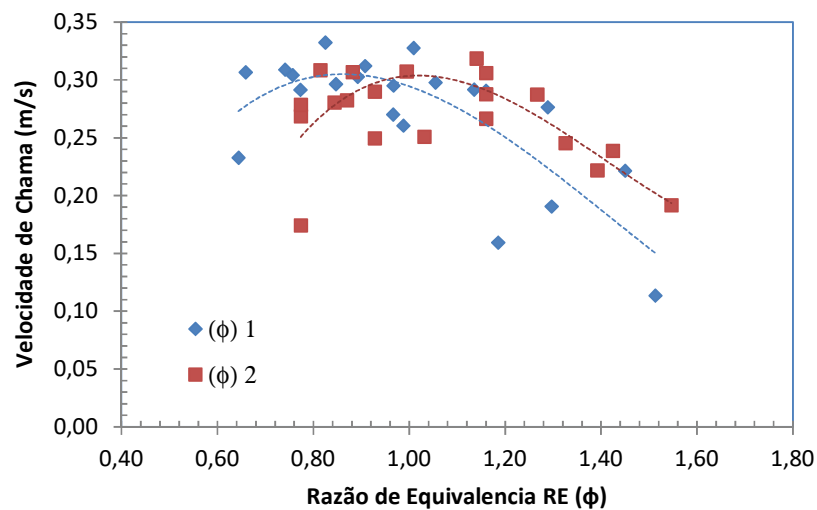
3,5 l/min ar	4 l/min ar	4,5 l/min ar	5 l/min ar	5,5 l/min ar	6 l/min ar
					
$\phi = 1,24$	$\phi = 1,09$	$\phi = 0,97$	$\phi = 0,87$	$\phi = 0,84$	$\phi = 0,77$
$S_L = 0,25$ [m/s]	$S_L = 0,28$ [m/s]	$S_L = 0,26$ [m/s]	$S_L = 0,25$ [m/s]	$S_L = 0,24$ [m/s]	$S_L = 0,21$ [m/s]

Tabela 4-10 Registro direto da velocidade de chama para as amostras com 5,30 l/min de gás

4 LPM ar	4,5 LPM ar	5 LPM ar	5,5 LPM ar	6 LPM ar	6,5 LPM ar
					
$\square = 1,36$	$\square = 1,21$	$\square = 1,09$	$\square = 0,99$	$\square = 0,91$	$\square = 0,84$
$S_L = 0,21$ [m/s]	$S_L = 0,27$ [m/s]	$S_L = 0,28$ [m/s]	$S_L = 0,32$ [m/s]	$S_L = 0,28$ [m/s]	$S_L = 0,32$ [m/s]

4.2.2 Resultados dos Testes com o Gás Objeto de Estudo.

O conjunto das amostras coletado e classificado segundo a sua velocidade de chama para diferentes razões de equivalência, poder ser visto na Figura 4-8. As amostras possuem o mesmo comportamento estatístico, o que é visível, pois de ambos processos o mesmo tipo de gráfico foi obtido, o que indica a repetitividade do experimento. Mesmo que existam diferenças na composição das amostras, estas são mínimas e podem ser usadas em uma distribuição de dados agrupados como parte de um conjunto.

Figura 4-8 – Gráfico com valores de S_L para diferentes valores de vazão de gás pobre

Posteriormente, a análise individual das amostras, estas foram divididas segundo as vazões de combustível envolvidas na queima. Na Figura 4-9 são apresentados os resultados obtidos para os valores da velocidade de chama para o gás pobre (S_L), diferenciados segundo a quantidade de gás incluída na mistura e utilizando-se o método do “Schlieren” para registro do cone de chama. Nele se observa que S_L assume valores desde 0,11 m/s a 0,30 m/s, variando em função da razão de equivalência (ϕ). Também, mostra-se uma relação direta entre o aumento da vazão de combustível e o aumento da velocidade de chama.

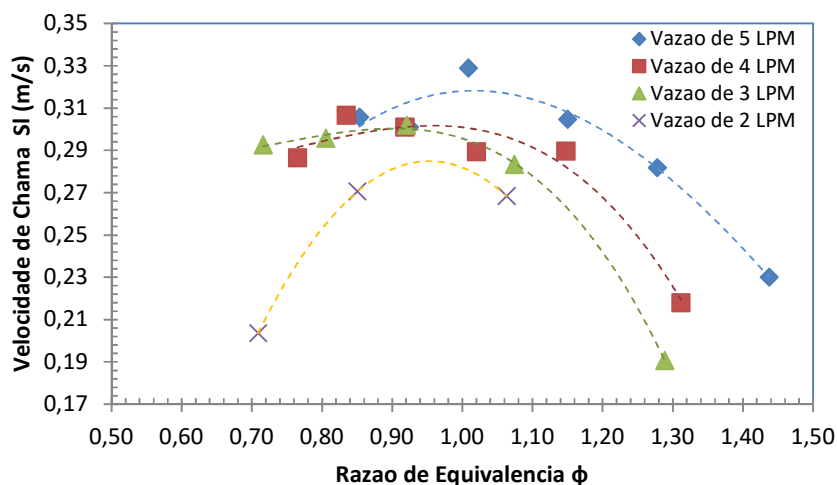


Figura 4-9 – Gráfico com valores de S_L para diferentes valores de vazão de gás pobre método “schlieren”

Observam-se vários fenômenos na Figura 4-9; o primeiro é o aumento da velocidade de chama enquanto foi aumentada a quantidade de combustível na mistura, o que não aconteceu quando o teste foi feito com GLP. Também, mostram-se tendências das medições similares com comportamento de uma distribuição polinomial de segundo ou terceiro grau, às amostras de gás GLP, isto, pois ambas distribuições pertencem a uma distribuição normal de dados contínuos.

Contudo, observa-se que quando existem razões de equivalência próximas da unidade, as velocidades de chama aumentam. Este comportamento se deve ao princípio da máxima taxa de liberação da energia interna quando a queima é estequiométrica, fenômenos que não foi possível observar nas amostras do GLP, por causa do deslocamento na distribuição devido ao queimador usado. Como os dados pertencem a uma distribuição de dados agrupados a partir da Tabela 4-11, os mesmos são apresentados em função dos valores médios da velocidade de chama para as vazões de ar e combustível corrigidos para as condições normais de temperatura e pressão (25°C, 103, 325 kPa), das duas amostras.

Tabela 4-11 Resultados médios obtidos para o gás pobre a partir da utilização do método “schlieren”

Casos	\dot{V} de Gás (LPM)	\dot{V} de ar (LPM)	ϕ Médio	Sl Médio (m/s)
1	5	4	1,44	0,23
2	5	4,5	1,28	0,28
3	5	5	1,15	0,30
4	5	5,5	1,01	0,33
5	5	6	0,92	0,30
6	5	6,5	0,85	0,31
7	4	3	1,53	0,15
8	4	3,5	1,31	0,22
9	4	4	1,15	0,29
10	4	4,5	1,02	0,29
11	4	5	0,92	0,30
12	4	5,5	0,83	0,31
13	4	6	0,76	0,29
14	3	2,5	1,29	0,19
15	3	3	1,07	0,28
16	3	3,5	0,92	0,30
17	3	4	0,81	0,30
18	3	4,5	0,72	0,29
19	2	2	1,06	0,27
20	2	2,5	0,85	0,27
21	2	3	0,71	0,20

Os resultados da média da velocidade de chama para os dois grupos de amostras se encontram na Figura 4-10, onde mostra-se a influência da mudança das razões de equivalência na velocidade de chama. Esta característica foi estudada com maior detalhe na seção de discussão dos resultados.

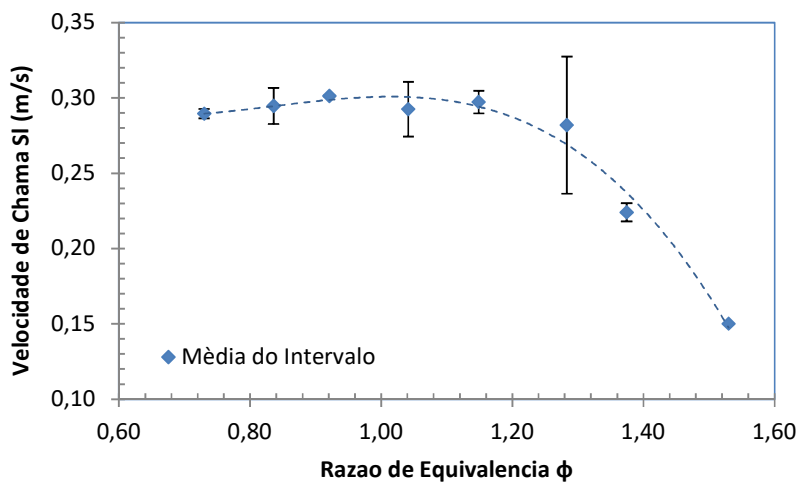


Figura 4-10 Velocidade de chama média para o planejamento com gás de biomassa.

As diferenças entre as composições dos dias 1 e 2 não são significativas para considerar que as amostras não são homogêneas. Contudo, é importante ressaltar fatores relevantes nas mudanças na composição e a velocidade de chama destas amostras que não foram medidos, como o teor de umidade nas amostras dos dias 1 e 2 e o conteúdo de carvão remanescente no dia 2, produto da gaseificação do dia 1. Além de parâmetros operacionais do gaseificador, não considerados neste trabalho.

CAPITULO 5: DISCUSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.

5.1 Análise de Incerteza

5.1.1 Planejamento padrão.

Um padrão importante para determinar a homogeneidade das amostras é o desvio padrão, uma medida de tendência central que tem como função principal determinar a variabilidade de um grupo de dados. No presente trabalho foi usada como referência, a norma ABNT / Inmetro (INMETRO - DIMCI, 2008).

Na seção seguinte foi calculado o desvio padrão para cada uma das amostras, para de garantir a qualidade das medições. Inicialmente, são comparadas as metodologias, a fim de padronizar o processo. Na Figura 5-1, encontram-se os resultados de velocidade de chama para cada uma das técnicas, sendo o registro direto e “schlieren” aquelas com maior aproximação ao fenômeno real.

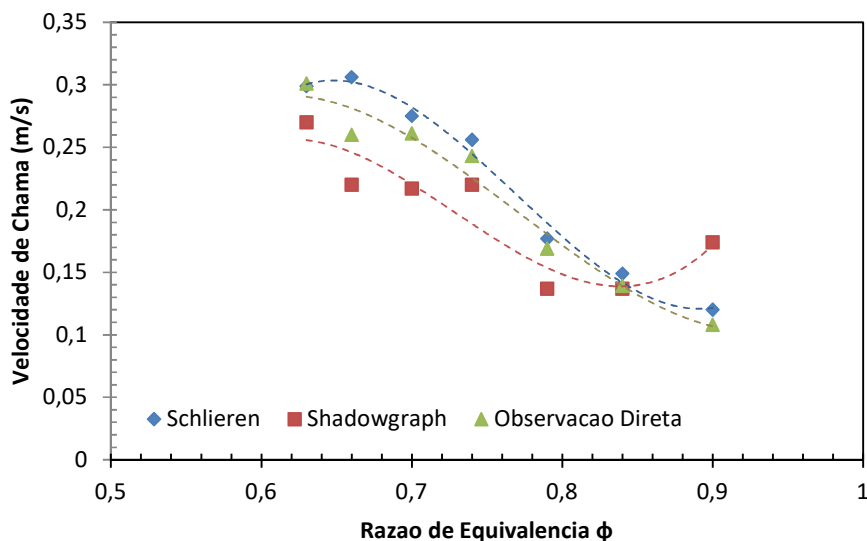


Figura 5-1 Comparação dos três métodos de aquisição de imagens para o GLP

No gráfico da figura 5-1, também é visível a diferença entre os dados dos resultados das médias de cada caso usando cada técnica, sendo “schlieren” e observação direta técnicas com distribuições mais parecidas e “shadowgraph” apresentou um perfil diferente. Os resultados destas medições para cada metodologia a seguir.

No caso do “shadowgraph”, apresentam-se velocidades chama de cerca de 0,14 até 0,27 m/s, como pode ser observar na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 Resultados de toma de amostras com “shadowgraph”

Caso	(ϕ)	S _L (m/s)	Desvio Padrão	CV
1	0,9	0,18	0,06	0,3608
2	0,84	0,14	0,05	0,3692
3	0,79	0,14	0,04	0,3016
4	0,74	0,22	0,02	0,1056
5	0,7	0,22	0,03	0,1550
6	0,66	0,22	0,01	0,0674
7	0,63	0,27	0,02	0,0671

O desvio padrão deve ser avaliado em companhia do coeficiente de variabilidade (CV), que representa o porcentual do desvio padrão sobre a média dos dados agrupados. Se for ≥ 1 , significa que os dados não são homogêneos; nesses casos, não podem ser avaliados dentro da mesma distribuição estatística. Neste estudo, os dados das amostras de “shadowgraph” representam amostras homogêneas; contudo, entre os distintos casos existe muita variabilidade nos resultados. Isto, porque a sombra projetada por esta técnica apresenta um grande nível de incerteza no ângulo, que aumenta o nível de erro nas amostras.

Para as amostras usando o método de observação direta, observam-se menores coeficientes de variabilidade nas amostras o que pode ser observado nas amostras coletadas, resumidas na Tabela 5-2 a seguir:

Tabela 5-2 Resultados da aplicação do método da observação direta

Caso	(ϕ)	S _L (m/s)	Desvio Padrão	CV
1	0,9	0,11	0,007	0,0651
2	0,84	0,13	0,007	0,0562
3	0,79	0,17	0,011	0,0674
4	0,74	0,24	0,025	0,1027
5	0,7	0,26	0,005	0,0174
7	0,63	0,30	0,006	0,0215

O erro desta técnica é atribuído a incapacidade da câmara de captar uma chama tridimensional, sendo expressa uni-dimensionalmente. Observa-se também que o ângulo da frente laminar pode ser confundido com a luz produzida pela chama. Mesmo assim o erro do método de observação direta é menor do que o encontrado no fenômeno anterior. Para essas amostras só existe um valor elevado do CV, no caso 4, mas ainda se encontra afastado de 1, então foi incluído no estudo.

Finalmente, os resultados obtidos com a técnica “schlieren” apresentam valores para S_L maiores e mais compatíveis da literatura, além de valores de desvios padrão menores aos obtidos com as outras duas técnicas, devido ao seu baixo nível de erro na medição e sua maior aproximação à distribuição que caracteriza o comportamento da combustão. Os desvios destas amostras podem ser observados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 Resultados do desvio padrão pelo método “Schlieren”

Caso	(ϕ)	S_L (m/s)	Desvio Padrão	CV
1	0,9	0,12	0,003	0,0257
2	0,84	0,15	0,012	0,0819
3	0,79	0,18	0,010	0,0571
4	0,74	0,26	0,014	0,0532
5	0,7	0,28	0,015	0,0529
6	0,66	0,31	0,007	0,0241
7	0,63	0,30	0,023	0,0755

Os maiores desvios da tendência se encontram quando aumenta a velocidade de chama, pois, o método mede a mudança da temperatura, pressão e massa específica dos combustíveis queimados, propriedades que aumentam quando se obtém maiores velocidades de chama.

Logo desta análise foi decidido que o “schlieren” seria usado como técnica de obtenção de imagens para as amostras do gás objeto de estudo. A seguir, a análise da velocidade de chama deste gás.

5.1.2 Planejamento com o gás objeto de estudo.

A análise do desvio padrão da queima controlada de biomassa deve ser feito de forma diferente do GLP, pois neste foram alteradas a vazão de ar e combustível na mistura. Esta

condição adiciona dissonância ao sistema que maximiza a probabilidade de erro nas medições.

Assim, para uma análise sistemática, os dados agrupados foram organizados por meio de uma distribuição de frequência expressa em um histograma, considerando a mediana e não a média como medida de tendência central predominante. Isto, para eliminar o erro produzido pelas alterações no início e no final das medições, causadas pela manipulação das variáveis iniciais e ter um gráfico com uma tendência mais próxima da realidade.

Definir uma distribuição de frequência requer uma organização das amostras, para uma distribuição de 21 amostras o número de classes é igual à sua raiz quadrada como apresenta a equação (5-1)

$$\text{Número de classes} = \sqrt{n} \quad (5-1)$$

A distribuição objeto de estudo tem 5 classes, o número de classes e o equivalente as divisões dos dados agrupados num histograma. Para conhecer o tamanho de cada classe existem um indicador chamado intervalo, o intervalo de uma classe é calculado por meio da média dos dados agrupados dividido pelo número de classes previamente calculado, como for expresso na equação (5-2)

$$\text{Intervalo de Clase} = \frac{\mu}{\text{Número de classes}} \quad (5-2)$$

Depois estas informações podem ser organizadas as medidas de tendência central e as medidas de dispersão da amostragem na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 Medidas de tendência central e de dispersão da amostragem.

Intervalos de classe para (ϕ)	Mediana dos Intervalos	Média de S_L	Desvio Padrão	CV
0,71 - 0,93	0,82	0,27	0,04	0,13
0,94 - 1,16	1,05	0,30	0,01	0,04
1,16 - 1,38	1,27	0,29	0,01	0,04
1,38 - 1,61	1,50	0,21	0,04	0,16

Finalmente, na Figura 5-2 observa-se a frequência relativa de cada intervalo para a distribuição de probabilidade que ilustra o fenômeno da queima controlada de gás de biomassa.

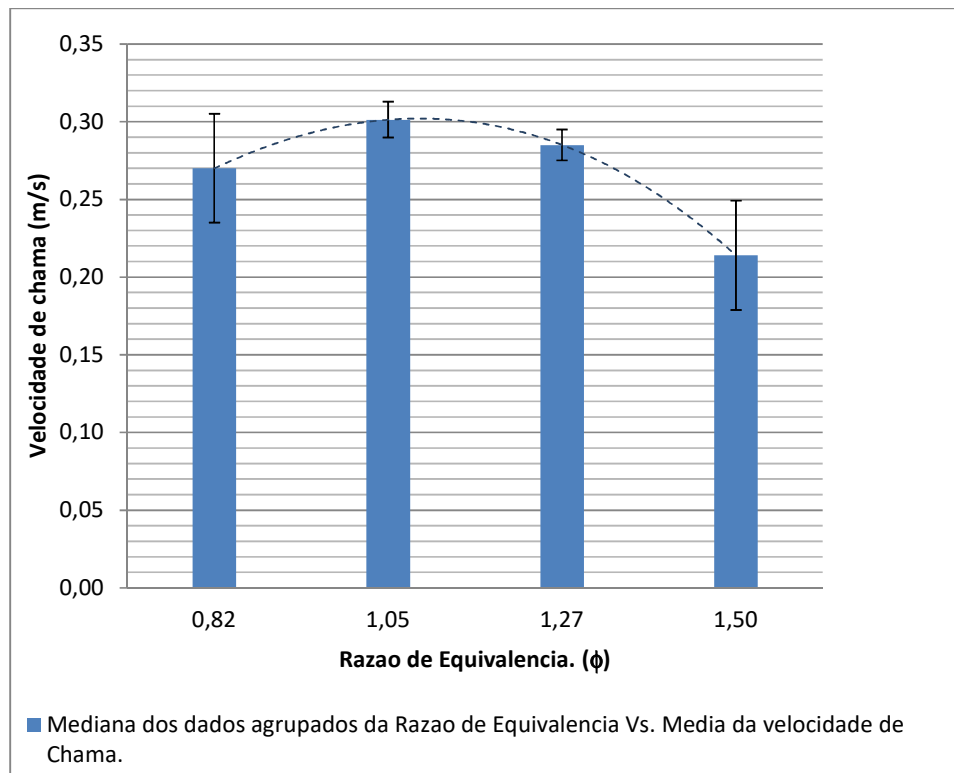


Figura 5-2 Mediana e desvio padrão dos intervalos de frequência da velocidade de chama.

Nestes resultados é usada a mediana para expressar a distribuição de probabilidade da razão de equivalência, pois é uma medida mais adequada para expressar resultados de trabalhos experimentais devido ao baixo erro associado à eliminação dos extremos das amostras, afetados por fenômenos externos.

Para uma melhor análise foram agrupados os intervalos com razões de equivalência similar numa faixa mais estreita. Isto com o objetivo de comprovar que a amostra consegue criar uma distribuição polinomial de terceiro grau ou similar e possa ser caracterizada como uma função normal.

O primeiro intervalo de classe está ocupado pelas amostras com (ϕ) entre 0,71 e 0,93; a mediana desses dados é 0,82 e os dados que compõem estas medições se encontram nas tabelas 5;5,5-6 e 5-7. A média da sua velocidade de chama é 0,28 m/s.

Tabela 5-5 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,73.

Vazão de Gás (LPM)	Vazão de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
2	3	1,5	0,71	0,73	0,20	0,27	0,00	0,01
3	4,5	1,5	0,72		0,29			
4	6	1,5	0,76		0,29			

Tabela 5-6 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,84.

Vazão de Gás (LPM)	Vazão de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
3	4	1,33	0,81	0,84	0,30	0,29	0,0120	0,04
4	5,5	1,38	0,83		0,31			
2	2,5	1,25	0,85		0,27			
5	6,5	1,30	0,85		0,31			

Tabela 5-7 Características do primeiro intervalo para amostras com ϕ média de 0,92.

Vazão de Gás (LPM)	Vazão de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
4	5	1,25	0,92	0,92	0,30	0,30	0,0004	0,01
3	3,5	1,17	0,92		0,30			
5	6	1,20	0,92		0,30			

O seguinte intervalo de classe compõe das razões de equivalência entre 0,94 e 1,16, os quais são apresentados nas tabelas 5-8 e 5-9; nestes pontos, a velocidade de chama se incrementa quando as razões de equivalência se encontram mais próximos da unidade. Assim, este intervalo apresenta a máxima velocidade de chama do estudo 0,30 m/s e o desvio padrão entre os intervalos é muito baixo. A mediana deste estudo é 1,05. Este intervalo contém as maiores velocidades obtidas no estudo.

Tabela 5-8 Características do segundo intervalo para amostras com ϕ média de 1,04.

Vazão de Gás (LPM)	Vazão de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
5	5,5	1,10	1,01	1,04	0,33	0,29	0,0182	0,06
4	4,5	1,13	1,02		0,29			
2	2	1,00	1,06		0,27			
3	3	1,00	1,07		0,28			

Tabela 5-9 Características do segundo intervalo para amostras com ϕ média de 1,15.

Vazão de Gás (LPM)	Vazão de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
4	4	1,00	1,15	1,15	0,29	0,30	0,0075	0,03
5	5	1,00	1,15		0,30			

O seguinte intervalo corresponde as amostras entre 1,17 e 1,38. A mediana deste intervalo é 1,27. Estas amostras evidenciam o declive da velocidade de chama apresentando uma média de 0,29 m/s, exposto nas tabelas 5-10 e 5-11.

Tabela 5-10 Características do terceiro intervalo para amostras com ϕ média de 1,28.

\dot{V} Gás (LPM)	\dot{V} ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
5	4,5	0,90	1,28	1,28	0,28	0,28	0,0456	0,16
3	2,5	0,83	1,29		0,19			

Tabela 5-11 Características do terceiro intervalo para amostras com ϕ média de 1,37.

\dot{V} Gás (LPM)	\dot{V} ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S _L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
4	3,5	0,88	1,31	1,37	0,22	0,22	0,0060	0,03
5	4	0,80	1,44		0,23			

O último intervalo expressado na Tabela 5-12, para razões de equivalência entre 1,38 e 1,61 só contém um resultado, o qual descreve a menor velocidade de chama, registrando um valor de 0,15 m/s e a máxima relação combustível / ar.

Tabela 5-12 Características do quarto intervalo para amostras com ϕ média de 1,53.

\dot{V} Gás (LPM)	\dot{V} de ar (LPM)	Relação Combustível/Ar Real	ϕ Média	Média do Intervalo	S_L Média (m/s)	Média do Intervalo	Desvio Padrão	CV
4	3	0,75	1,53	1,53	0,15	0,15	0,0000	0,00

Este caso se encontra fora dos intervalos de maior probabilidade de ocorrência, apresentando uma razão de eq. (ϕ) fora da média deste estudo. É por isso que contém só um conjunto de amostras, e assim, não é possível calcular o coeficiente de variabilidade para este intervalo.

5.2 Validações e Discussão dos Resultados.

5.2.1 Comparação dos resultados com a literatura e análise de sensibilidade para o gás padrão.

Para o gás Padrão, parte-se das seguintes premissas para discussão dos resultados:

- Em nenhum dos métodos se atingiu a velocidade de chama máxima na estequiometria, e todos os métodos utilizados tiveram um deslocamento na curva da velocidade de chama versus razão de equivalência. Este desvio se deve a dois fatores:
- O queimador usado para os testes foi projetado especificamente para a queima laminar e pré-misturada de gás de biomassa.
- A pressão, a temperatura e as precipitações (fenômenos do ambiente) não foram consideradas.

Contudo, estas considerações não impediram que o fenômeno se apresentasse como foi especificado na literatura, visualizando o coeficiente de desvio angular das três curvas muito próximas em torno de $r^2 = 0,98$. A tendência é apresentada e comparada com outros trabalhos na Figura 5-3.

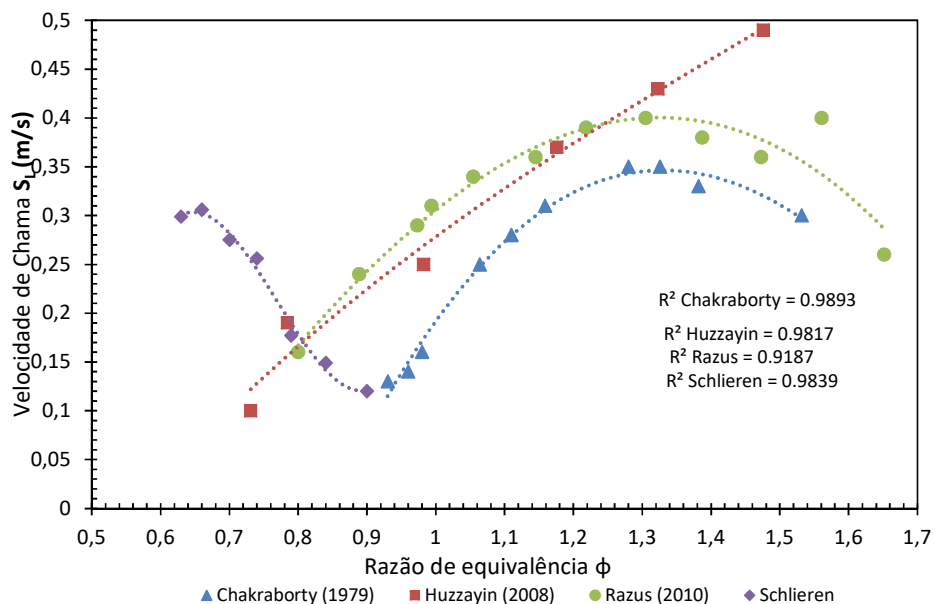


Figura 5-3 - Comparação do método Schlieren com os resultados da literatura.

Os resultados obtidos são similares aos reportados na literatura, embora haja diferenças nas condições operacionais, a tendência é igual à exposta por diferentes trabalhos, o que se comprova comparando os desvios angulares dos trabalhos de outros autores. Contudo, não foram atingidos os valores máximos registrados para a velocidade de chama, a velocidade máxima obtida foi 0,31 m/s. versus 0,40 m/s em média, registrada por diversos autores; mas, estas situações têm sido atribuídas as distintas premissas mencionadas anteriormente neste trabalho. Também, mostra-se que os autores com valores de velocidade de chama máximos em razões estequiométricas perto de 1,4; tem altos conteúdos de butano em sua composição, como é mostrado na Tabela 5-13.

Tabela 5-13 Composições dos Gases com Maiores Velocidades de Chama em Razões de Equivalência superiores a 1.

	C₂H₆	C₃H₈	C₄H₁₀	C₅H₁₂
Chakraborty (1979)	2,2%	30,1%	67,7%	0,0%
Hyzzayin (2008)	0,0%	26%	74%	0,0%
Razus (2010)	0,0%	12,0%	87,0%	1,0%

Algumas considerações de possíveis causas deste fenômeno poderiam ser atribuídas também à umidade no ambiente; pois, todos os dias que foram realizados testes houve precipitações na UNIFEI e a diminuição da temperatura da mistura afeta negativamente a velocidade de chama. Mas o impacto desta variável não foi quantificado no estudo.

Para a análise de sensibilidade do gás padrão foram avaliados os parâmetros de maior relevância no cálculo da velocidade de chama usando a ferramenta Crystall ball® usando a análise de tipo tornado.

Crystall ball® é uma ferramenta de Oracle®, pela qual com dados agrupados se analisam tendências a fim de prever, otimizar e entender o funcionamento de sistemas complexos. A ferramenta análise de tornado mede o impacto de parâmetros específicos, variando-se em uma faixa estabelecida pelo usuário do software. No caso deste trabalho, a variação das amostras máxima para minimizar o erro estatístico foi estabelecida em +/- 10%.

A finalidade da análise de tipo tornado é avaliar a influência da mudança de um fator na variável de resposta de um experimento. Neste caso, foram escolhidas as variáveis: ângulo do cone, vazão volumétrica de ar, pressão do ar, vazão de gás, R do gás e R do ar. As variáveis ângulo do cone e pressão do ar operam igual para o experimento com biomassa, pois seu comportamento está delimitado pelo tipo de queimador e a pressão do compressor, principalmente.

A análise de tornado indicou que as principais variáveis que influenciam a velocidade de chama são o ângulo do cone, a vazão de ar na mistura e a pressão do ar na entrada do processo. Esta relação pode ser explicada na Figura 5-4, onde se mostra a mudança da velocidade de chama quando se variam os parâmetros descritos.

A mudança do primeiro parâmetro (o ângulo) varia segundo o tipo de queimador e o diâmetro do bico usado, este fator foi constante no experimento. A importância deste fator explica os inúmeros resultados para velocidade de chama para os mesmos tipos de gases encontrados na literatura; pois, a relevância do diâmetro do queimador é o fator principal para a determinação da velocidade de chama.

O segundo parâmetro e a razão de equivalência, expressada no experimento como a mudança na vazão de ar, e a vazão de gás no planejamento padrão. Isto, também explica as flutuações dos resultados da velocidade de chama entre trabalhos nas mesmas condições e o mesmo tipo de gás, dependendo da quantidade do ar na entrada do processo, a velocidade de chama.

Assim, para a análise de sensibilidade foi mudada a pressão do ar em um +/-10%, partindo de condições de CNTP

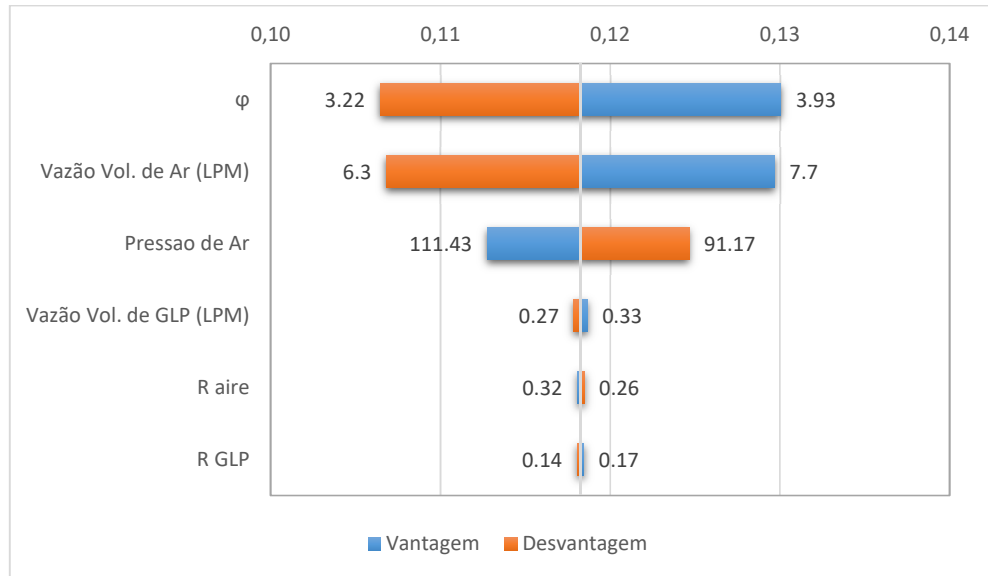


Figura 5-4 Gráfico de tornado para o gás padrão.

O diagrama de tornado na parte superior mostra a variação positiva e negativa da variável de resposta (S_L), depois na parte inferior os fatores submetidos a consideração e de cor laranja o impacto de sua diminuição e de cor azul o impacto de seu acréscimo.

Variáveis no experimento como as mudanças na massa específica (expressas na mudança do R do gás) e a vazão de GLP na mistura (a qual no experimento foi fixa), não apresentam influência significativa. O ar é o parâmetro determinante nestes testes, isso por a proporção de ar/ combustível na mistura, onde mais de 90% da pré-mistura foi composta por ar.

Esta relação de parâmetros pode ser explicada especificamente no gráfico tipo spider da Figura 5-5, onde se mostra as mudanças da variável de resposta ao longo do estudo quando os parâmetros foram extrapolados +/- 10% para medir o comportamento da velocidade de chama.

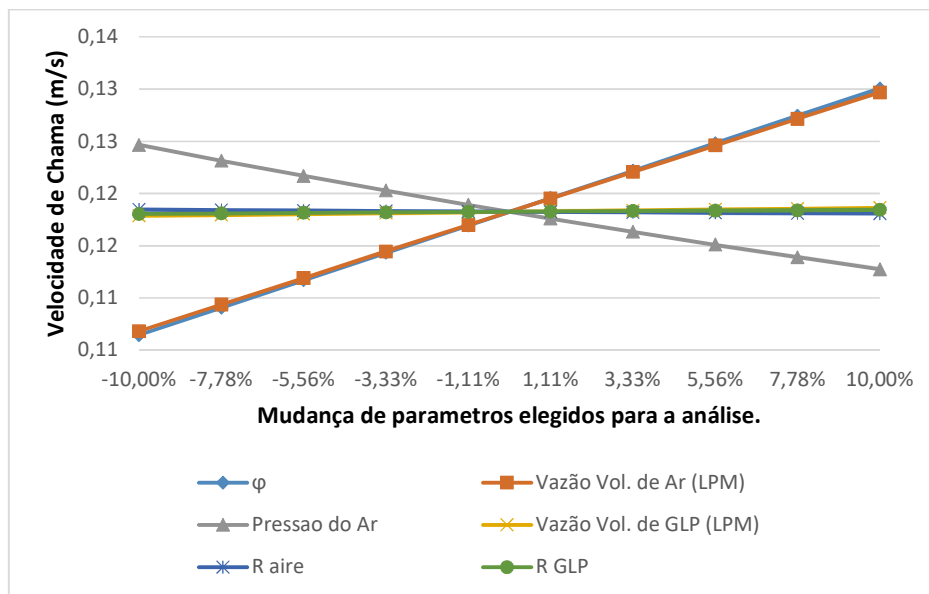


Figura 5-5 Diagrama spider da influência dos parâmetros escolhidos na velocidade de chama.

Neste gráfico, mostra-se que tanto a vazão como a pressão do ar dentro do experimento são variáveis que determinam o aumento e a diminuição da velocidade de chama. Esta análise expressa preliminarmente correlações negativas entre a velocidade de chama e a pressão e positivas entre a velocidade de chama e o ângulo do cone e a vazão de ar.

Assim, conforme aos resultados da análise, foi escolhido como o fator sensível a pressão do gás no processo com três cenários apresentados na tabela 5-14.

Tabela 5-14 Cenários propostos para a análise de sensibilidade de gás padrão.

Análise de Cenários		Mínimo	Médio	Máximo	Tendência
Cenários Alternos	Avaliação do aumento na pressão do ar.	91.17	101.3	111.43	Ascendente

Pressões inferiores ao ambiente geram velocidades de chama maiores; observa-se um aumento de 2 cm/s na velocidade de chama quando a pressão cai 10% em comparação com a pressão ambiente, como pode ser visto na Figura 5-6. Também neste gráfico mostra-se a influência da vazão de ar como fator que se relaciona com o aumento desta variável. Existe uma marca ascendente na velocidade de chama entre 8 e 8,5 L/m que mostra o aumento da velocidade de chama na proximidade da estequiometria para a queima de 0,22 L/min de combustível.

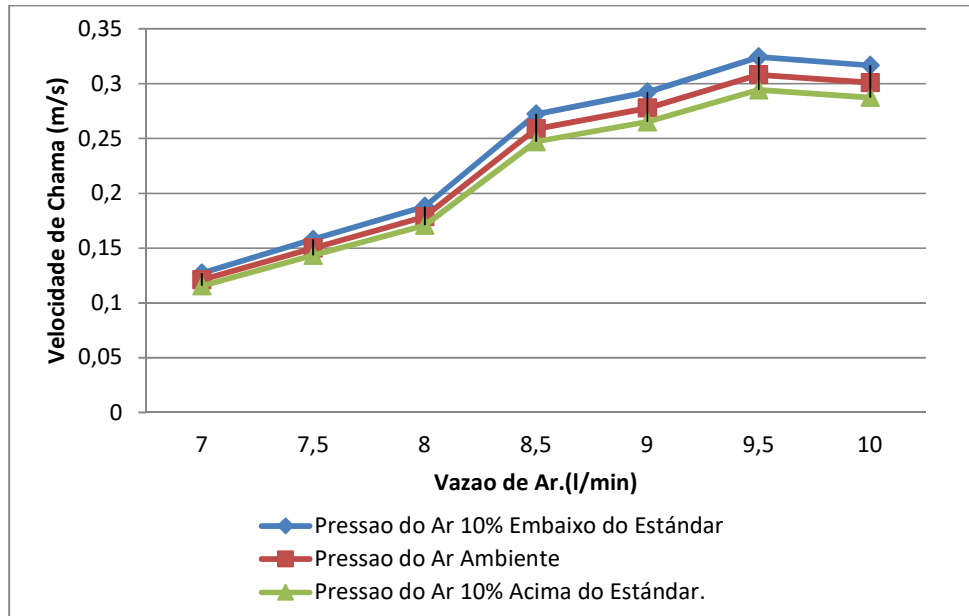


Figura 5-6 Aumento da velocidade de chama quando a pressão de entrada do ar no queimador varia

Na literatura os trabalhos de Burbano et. al., 2011 e Amell, et. al., 2014 suportam esses resultados, obtendo velocidades de chama maiores com pressões abaixo do ambiente.

5.2.2 Comparação dos resultados com a literatura e análise de sensibilidade para o gás objeto de estudo.

A análise destes resultados foi diferente comparada com o gás padrão, pois não houve deslocamento nos resultados da velocidade de chama para o gás objeto de estudo quando for comparado com a literatura, apresentando as maiores velocidades de chama em razões de equivalência próximas da condição de estequiometria, tal situação pode ser observada na Figura 5-7 sendo comparado o presente trabalho dois homologos que estudam gases com características similares.

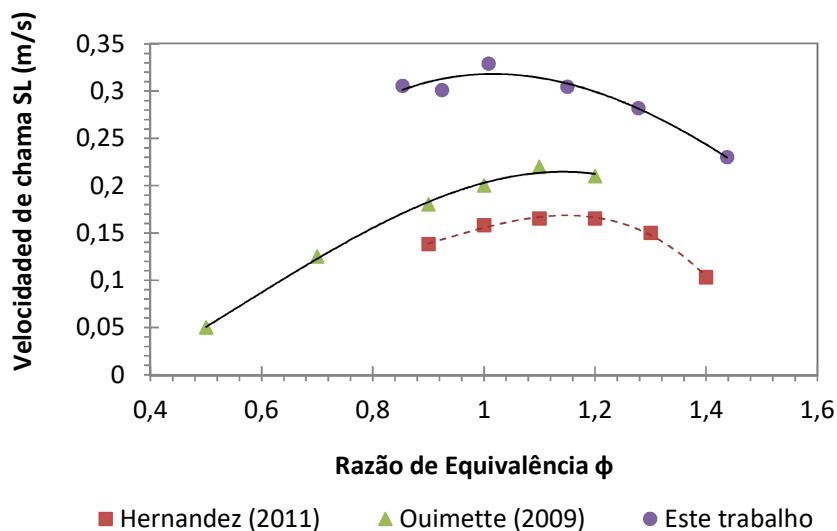


Figura 5-7 Comparação dos resultados dos testes do gás de biomassa com a literatura.

Nos trabalhos de (HERNANDEZ; BARBA; ARANDA, 2012) e (OUIMETTE; SEERS, 2009) a composição apresentava teores inferiores de H_2 e maior conteúdo de inertes sendo comparadas com o presente trabalho, o que se apresenta na Tabela 5-15 e na Figura 5-7. Esta situação diminui a velocidade de chama do gás usado como padrão de comparação. Também, maior conteúdo de inertes aumenta o poder calorífico, como foi no caso do gás do presente trabalho.

O trabalho de apresenta uma composição similar ao trabalho de Hernandez, mas a relevância da composição na velocidade de chama é um fator estudado na análise de sensibilidade deste trabalho, em seções posteriores.

Tabela 5-15 Fração volumétrica de compostos principais no combustível.

Oimette 2009		Hernandez (2011)		Este trabalho	
CO	14,2	CO	16	CO	20
H_2	10,7	H_2	11	H_2	16
CH_4	3,5	CH_4	3	CH_4	1,8
PCI [MJ/kg]	4,20	PCI [MJ/kg]	4,28	PCI [MJ/kg]	4,90

Para a análise de sensibilidade também existem diferenças em relação ao avaliado no planejamento padrão, as variáveis medidas na análise de tipo tornado foram as relacionadas com as vazões de ar e gás, como se mostra a seguir na Figura 5-8:

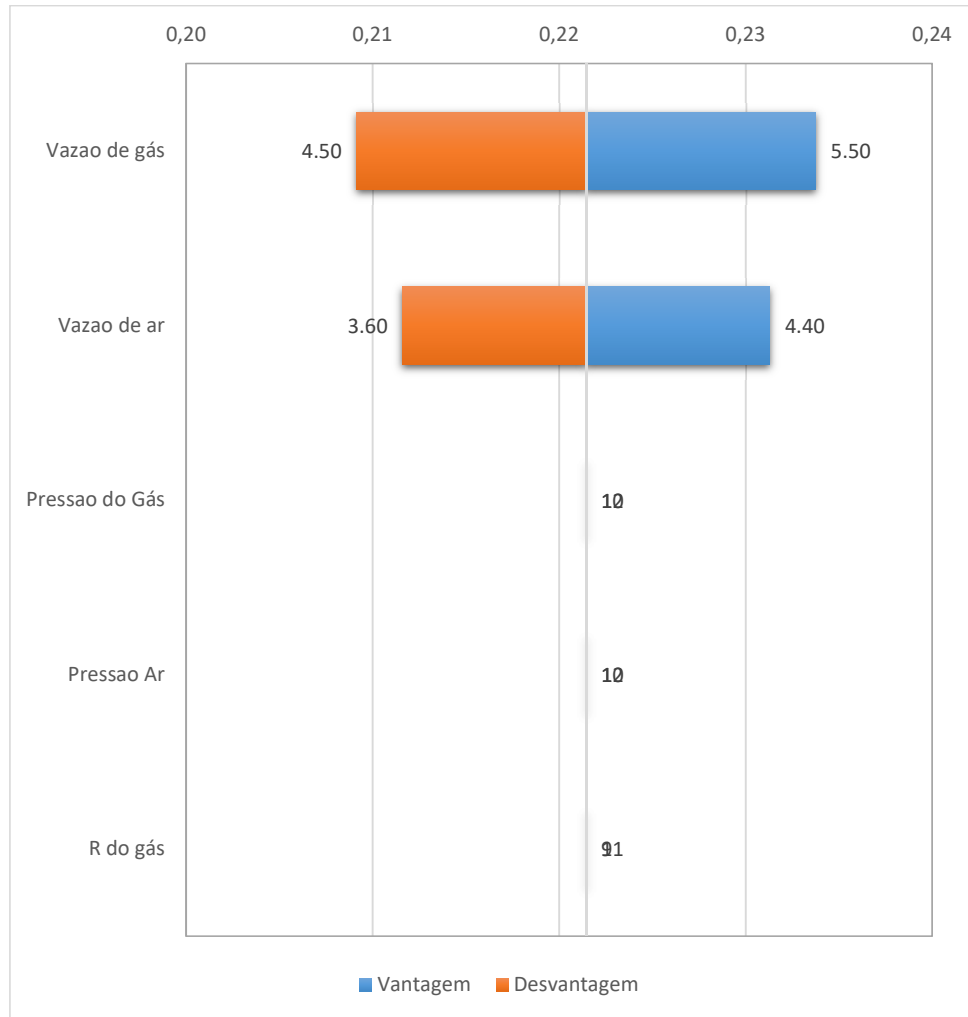


Figura 5-8 Análise de tornado das variáveis associadas ao gás de biomassa.

Variáveis como o ângulo do cone ou a pressão foram desconsideradas nesta análise, pois foram medidas para o gás padrão e registram comportamentos similares.

Esta análise mostra a importância da vazão de gás na mistura como fator principal para variar sua velocidade de chama. Como as vazões de ar e gás foram reguladas neste trabalho, então foi feita a análise de sensibilidade, a fim de comprovar as hipóteses alternativas geradas ao início deste trabalho relacionado com a composição do gás eram certas ou erradas. Estas hipóteses são expostas como segue:

- Os gases com maior conteúdo de compostos inertes terão menores velocidades de chama.

- Quando a presença de Hidrogênio na mistura aumenta são obtidas maiores velocidades de chama.

A fim de comprovar essas hipóteses, foram coletados durante o processo de gaseificação 11 amostras do gás, para analisar suas características, os compostos foram submetidos a uma simulação de amostras por meio da ferramenta SPSS®, software da IBM® que analisa estatisticamente fenômenos com distribuições conhecidas e padroniza possíveis respostas, simulando corridas de números com a mesma tendência estatística dentro de um desvio padrão conhecido.

Para esta simulação foram elaboradas 1000 corridas com desvio padrão foi 95%. As medidas de tendência central foram calculadas considerando as informações coletadas na operação do gaseificador, como seguem na tabela 5-16.

Tabela 5-16 Evolução da fração volumétrica dos compostos no processo de gaseificação classificada por hora.

Hora	CO	H₂	CH₄	O₂
10:31	25,29	13,04	2,2	1,11
10:45	26,08	13,25	1,7	0,37
11:00	22,1	13,13	1,3	0,27
11:15	19,12	14,83	2,1	0,35
11:20	17,46	15,59	1,7	0,22
11:28	18,53	15,52	1,8	0,21
11:37	19,68	15,87	1,8	0,23
11:45	20,33	16,05	1,8	0,38
11:50	21,04	15,94	1,9	0,23
12:00	22	15,61	1,6	0,28
12:10	22,46	15,5	1,5	0,19

Estas informações fornecem ao software a distribuição de probabilidade dos dados, a qual permite simular seu comportamento e calcular as medidas de tendência central necessárias para estabelecer correlações, se existissem, entre os compostos envolvidos. É importante enfatizar que o software não conhece as reações internas no processo termoquímico, ele modela as informações fornecidas pelo observador do fenômeno, que foram coletadas com os equipamentos de medição de vazão e temperatura do NEST, para o gaseificador usado. As medidas de tendência central e dispersão calculadas, como segue na Tabela 5-17.

Tabela 5-17 Medidas de dispersão e tendência central das amostras do gás de biomassa.

CO	Média	22.9
	Desvio padrão	3.36
	N	11
H2	Média	15.54
	Desvio padrão	1.39
	N	11
CH4	Média	1.90
	Desvio padrão	0.33
	N	11

Os resultados são compatíveis com os dados da literatura para este tipo de gás sendo comparados com estudos dentro do NEST como, por exemplo, os trabalhos de (Galindo, 2012; Martínez et. al., 2009) que apresentaram gases com conteúdo do CO, H₂ CH₄ de 21%, 15% e 1,8% respectivamente, e com outros trabalhos de gaseificação na literatura como a pesquisa de Hernandez *et.al.*, (2012) descrito previamente neste trabalho. Isto comprova que o SPSS mesmo que não possui informação sobre o fenômeno pode padronizar as variáveis estatísticas e obter tendências similares as obtidas na literatura e em trabalhos experimentais.

Para o planejamento padrão foi determinado que não existe correlação linear entre a velocidade de chama e o ângulo do cone resultante desta medição, no capítulo de resultados, secção 4.1.1. Nesta avaliação se pretende por meio da mesma ferramenta determinar se existe correlação linear entre os compostos do gás de biomassa, os dados da análise da correlação de Pearson que aparece na Tabela 5-18, a seguir:

Tabela 5-18 Avaliação de correlação linear dos compostos do gás de biomassa usando SPSS.

		CO	CD CO	H2	CD H2	CH4	CD CH4
CO	Correlação de Pearson	1	1	-0,705	49,70%	-0,011	0,01%
	Sig. (bilateral)	NA	NA	0,015		0,975	
	N	11					
H2	Correlação de Pearson	-0,705	49,70%	1	1	0,004	0,02%
	Sig. (bilateral)	0,015		NA	NA	0,99	
	N	11					
CH4	Correlação de Pearson	-0,011	0,01%	0,004	0,002%	1	1
	Sig. (bilateral)	0,975		0,99		NA	NA
	N	11					

Estes resultados mostram correlações de Pearson negativas fortes entre o CO e o H₂, da ordem do 49,7% o que significa que mudanças negativas em uma das duas afetam positivamente o desempenho da outra. Este comportamento pode ser ilustrado graficamente quando foram monitoradas as amostras no processo de gaseificação, na Figura 5-9 e coincide com o registrado na literatura por (SILVA et al; *et al.*, 2012), que aparece posteriormente na Figura 5-10.

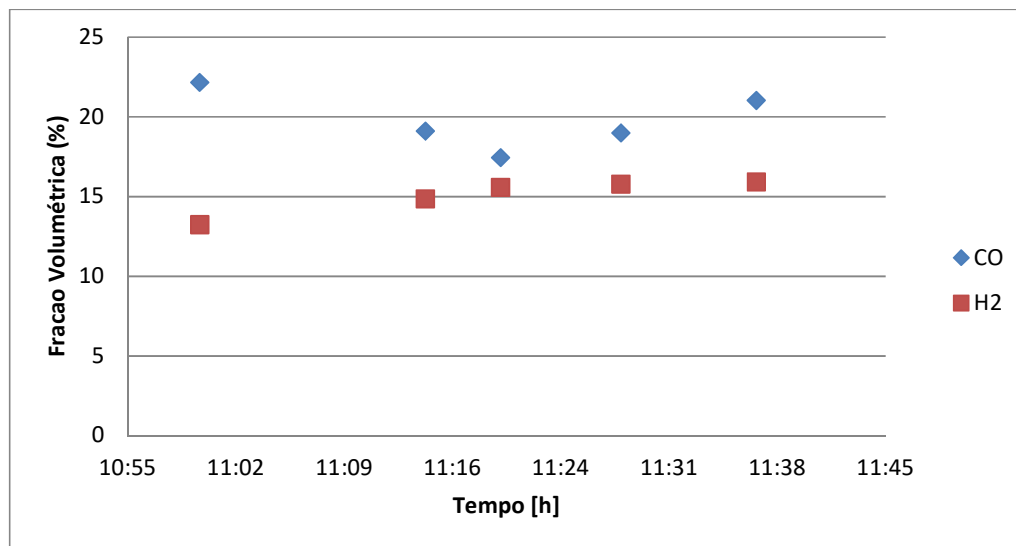


Figura 5-9 Correlação entre o CO e H2

No caso do CH₄ para todas as amostras obteve coeficientes de Sig. maiores do estabelecido, o que quer dizer que não existe relação linear entre a mudança do CO e do H₂ e a alteração deste composto.

Com respeito à hipótese que afirma que altos conteúdos de H₂ influenciam na velocidade de chama, é válido afirmar que devido à correlação forte entre o H₂/CO não é possível avaliar só o parâmetro do aumento de H₂ para determinar seu impacto na velocidade de chama. Contudo, para avaliar a influência de um parâmetro composto seria necessário realizar estudos mais aprofundados sobre o processo de gaseificação que não foram feitos neste trabalho.

Sobre o conteúdo de inertes, é feita a análise de correlação entre as mudanças dos compostos enquanto o gaseificador, conforme apresentado na Tabela 5-19. Esta correlação é diferente da anterior, pois inclui as interações dos compostos já estudados com o oxigênio e

os inertes produto do processo de gaseificação; observa-se como a dinâmica de correlações muda quando o oxigênio e os inertes são introduzidos na análise:

Tabela 5-19 Análise de correlação incluída os percentuais de inertes e oxigênio no gás de biomassa.

		CO	H2	CH4	O2	INERTES
CO	Correlação de Pearson	1	-0,598	-0,451	0,123	-0,716
	Sig0, (bilateral)	N0,A	0,287	0,445	0,844	0,174
	N	5				
H2	Correlação de Pearson	-0,598	1	0,695	-0,460	-0,117
	Sig0, (bilateral)	0,287	N0,A	0,193	0,436	0,851
	N	5				
CH4	Correlação de Pearson	-0,451	0,695	1	0,302	-0,147
	Sig0, (bilateral)	0,445	0,193	N0,A	0,622	0,814
	N	5				
O2	Correlação de Pearson	0,123	-0,460	0,302	1	0,106
	Sig0, (bilateral)	0,844	0,436	0,622	N0,A	0,866
	N	5				
INERTES	Correlação de Pearson	-0,716	-0,117	-0,147	0,106	1
	Sig0, (bilateral)	0,174	0,851	0,814	0,866	N0,A
	N	5				

Neste caso, quando os inertes são introduzidos no resultado, a distribuição não pode ser considerada como linear, pois para todos os casos os coeficientes de sig. (em vermelho) foram superiores a 0,05, o que quer dizer que a correlação linear entre estes dados é zero.

Para calcular a influência dos inertes na velocidade de chama com um nível de incerteza conhecido é necessário desenvolver um planejamento experimental complexo, onde sejam consideradas as reações envolvidas no processo de gaseificação. Trabalhos como Silva *et al.*, (2012) mostram os comportamentos das reações nos processos de gaseificação em função da variabilidade das frações volumétricas dos compostos mais importantes da mistura quando a temperatura aumento no sistema, esta tendência é ilustrada na Figura 5-10 a seguir:

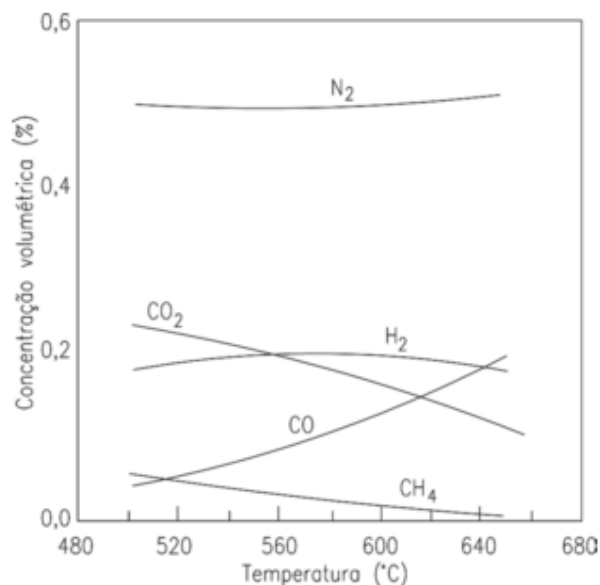


Figura 5-10 Efeito da temperatura de reação na composição do gás combustível utilizando um modelo heterogêneo. Reproduzida de Cousins (1978). A theoretical study of wood gasification processes. New Zealand Journal of Science, 21(2):175-183.

Considerando que os resultados da análise de sensibilidade não foram conclusivos, foi feita uma análise superficial das alterações das amostras quando as frações volumétricas dos compostos envolvidos na gaseificação deste material foram alteradas e comparadas os resultados do poder calorífico e a velocidade de chama obtida para estas amostras.

A informação obtida destas análises, relacionam-se na Tabela 5-20 os conteúdos de 5 amostras de um período de operação normal de gaseificação com suas respectivas velocidades de chama e seus poderes caloríficos, como segue:

Tabela 5-20 Comparação da composição do gás de biomassa vs. a velocidade de chama e o poder calorífico do gás.

AMOSTRAS		CO	H ₂	CH ₄	O ₂	H ₂ /CO	INERTES	SI	PCI
11:00	5	22,17	13,25	1,3	0,27	0,60	63,01	0,27	4,34
11:15	6	19,12	14,86	2,01	0,35	0,78	63,66	0,28	4,39
11:20	7	17,46	15,59	1,7	0,22	0,89	65,03	0,21	4,16
11:28	8	19	15,8	1,7	0,22	0,83	63,20	0,22	4,363
11:37	9	21,04	15,93	1,9	0,23	0,76	60,90	0,2	4,68

As premissas finais desta análise são descritas, como segue:

- Existe uma correlação negativa entre o conteúdo de CO e H₂, como é observado na Figura 5-10 que influencia a velocidade de chama a qual é percebida quando os inertes são retirados da análise.
- As amostras com menor poder calorífico têm os menores níveis de CO e de O₂, e também são as que apresentam a maior relação de H₂/CO. Estas amostras são as do caso 7, com velocidade de chama de 0,21 m/s.
- Dentre das amostras com maior poder calorífico, obteve-se a menor velocidade de chama (0,2 m/s), também, esta amostra contém menor quantidade de inertes e o maior conteúdo de H₂. Esta amostra corresponde ao caso 9. Contrariamente do que foi exposto na literatura, a amostra a diminuição de inertes não mostrou relação com a velocidade de chama, sugere-se aumentar para próximos estudos, o número de amostras.
- As amostras com maior velocidade de chama (0,27 m/s) têm a menor fração volumétrica de H₂, e o maior conteúdo de CO, e também apresenta o menor conteúdo de metano e a menor relação de H₂/CO.

CAPITULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

6.1 Conclusões.

A metodologia projetada caracteriza a velocidade de chama laminar e ajuda a avaliar este parâmetro com níveis de incerteza conhecidos cumprindo com o objetivo deste trabalho. Esta pode ser aplicada para distintos tipos de gases, sendo validada em um gás de referência e aplicada em um gás pouco caracterizado na literatura.

Sobre os testes da prova de conceito para o gás padrão, os ângulos medidos foram coletados por meio do método de visualização direta, a velocidade de chama máxima registrada foi 0,28 m/s com a razão de equivalência de 0,69, o gráfico que descreve o comportamento da função mesmo que possua o mesmo desvio angular das apresentadas na literatura, tem um deslocamento e uma assimetria do lado direito; isto, por causa do projeto dos queimadores, que foram especialmente elaborados para queimar gás pobre. Este fenômeno de deslocamento também foi visto nas amostras experimentais do planejamento padrão.

Para as amostras experimentais do gás padrão, os resultados que coincidiram com a literatura em maior proporção e os usados como referência foram os testes usando “schlieren”. A velocidade de chama máxima registrada foi 0,31 m/s atingida no caso 6, com as amostras 26-30, o desvio padrão destes resultados teve um coeficiente de variabilidade de 2%.

O comportamento da velocidade de chama do gás de biomassa foi similar ao contido na literatura, não apresentando deslocamento nem assimetria na distribuição de probabilidade. A velocidade de chama máxima na prova de conceito foi 0,32 m/s com $\phi=1$.

Com relação às amostras experimentais, os casos foram divididos em intervalos com variável ϕ parecidas. Assim, foi atingida a velocidade máxima de chama no intervalo de $0,94 > \phi < 1,16$; registrando 0,30 m/s como média do intervalo e o caso 4 (na tabela 4-11) apresentou o pico das velocidades registradas com $\phi 1,01$, atingindo 0,33m/s.

Apresentaram-se menores valores de velocidade de chama quando foi diminuída a vazão de combustível na mistura.

Sobre a influência da quantidade de H_2 e inertes na velocidade de chama, foram tomadas 9 amostras com composições diferentes. Os resultados indicam que quando os níveis de H_2 aumentam a velocidade de chama diminui, o que foi observado na análise superficial de 5 amostras de gás de biomassa. A amostra com maior fração volumétrica de H_2 obteve a menor velocidade de chama, e amostra com menor fração obteve a máxima velocidade registrada. Estes resultados não coincidem com a literatura, mas o experimento não foi planejado para medir essa variável, então sugere-se realizar um estudo específico para provar esta hipótese.

Contudo, os estudos mostraram a impossibilidade de medir a fração de H_2 de forma independente como fator de prova, pois existe uma correlação forte entre o conteúdo de H_2/CO no processo de gaseificação. Os resultados demonstraram que quando se obteve a maior relação de H_2/CO , foi obtido o mínimo poder calorífico no combustível.

No caso dos inertes, seu aumento não teve relevância na velocidade de chama, mas se mostraram importantes relações com o poder calorífico, mostrando o maior poder calorífico quando for mínima a fração volumétrica de inertes na mistura. Estas mudanças na composição são analisadas nesta seção quando da validação dos resultados.

Existem aspectos similares entre o comportamento da queima do GLP e do gás de biomassa. Por exemplo, a distribuição estatística não linear e normal para os resultados e a importância da vazão de ar no processo da queima. Considerando que as duas amostragens de queima controlada usaram ar como comburente.

Parâmetros comuns no experimento para ambos planejamentos foram: o diâmetro do bico de Bunsen (que se associa com a necessidade de ter escoamentos de tipo laminar, com número de Reynolds inferior a 2300) da queima controlada e a pressão do ar.

Para o gás padrão seus resultados de velocidade de chama foram comparados com gases de 3 autores diferentes com composições similares, ignorando o deslocamento por causa do tipo do queimador. O comportamento das 4 distribuições estatísticas segue a mesma tendência, e coeficientes angulares muito similares foram obtidos, sendo assim comprovado que a metodologia descreve o comportamento da velocidade de chama quando for mudada a razão de equivalência.

Foram analisados também os fatores que influenciam a velocidade de chama, encontrando importantes correlações entre a pressão da entrada do ar e do ambiente na queima controlada do GLP. Assim, mostra-se que a partir de relações S_L versus ϕ para misturas queimadas em condições inferiores da pressão do ambiente são obtidos maiores valores para a velocidade de chama. Apresentando de valores 0,02 m/s a mais, quando foram comparadas com as distribuições calculadas com a pressão normal (1 bar).

No caso do planejamento objeto de estudo, a análise de sensibilidade foi elaborada a fim de validar a influência da mudança do H_2 e inertes na velocidade da queima do gás. Os resultados mostraram estreitas relações lineares entre o conteúdo de CO e H_2 , o que quer disser que o aumento ou diminuição do conteúdo de CO, depende da quantidade de H_2 na reação e vice-versa, este tipo de relação pode ser observado quando não for avaliado o conteúdo de inertes.

Quando os inertes foram introduzidos no estudo, o comportamento da distribuição de probabilidade deixa de ser linear. Por este motivo, deve ser analisado com mais detalhe e consiste em material a considerar para trabalhos futuros. Contudo, existem tendências estatísticas fortes que relacionam o conteúdo de inertes com o poder calorífico que são suportadas na literatura.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros.

As limitações e dificuldades do presente trabalho foram oportunidades para projetar futuras pesquisas na área, a fim de aprofundar nos fenômenos caracterizados, as recomendações são feitas, a seguir:

- Parâmetros como a pressão e a temperatura no fenômeno são importantes e podem dar um valor agregado a futuros trabalhos, para estudar possíveis aplicações do gás, como, por exemplo, a possibilidade de intercambiar ele com outros gases em acionadores mecânicos. Para isso, é necessário adicionar a consideração a fenômenos como a difusividade térmica e coeficientes de difusão molecular, que seriam parâmetros suficientes para calcular o número de Lewis destes processos de queima controlada e obter maiores informações sobre a estabilidade de queima destes gases.

- A variável do índice de Woobe (o que calcula a quantidade de energia por unidade de volume que pode passar por um furo numa queda de pressão) também seria uma variável interessante a ser considerada, pois fornece informação sobre a capacidade de um gás de ser substituído por outro em um dispositivo.
- Estudos de velocidade de chama laminar em queima controlada de compostos separados (como H_2 , CH_4 ,) e comparação dos seus resultados com a queima controlada de gás de biomassa nas mesmas condições. Assim, como estudos da relação H_2/CO e $CO/Inertes$ na velocidade de chama e no poder calorífico da mistura combustível.
- Estudos com gás de síntese para validar a influência do H_2/CO na queima controlada.
- Incluir cálculos da influência de alcatrão presente no gás na velocidade de chama laminar e a medição do material particulado e um maior monitoramento do sistema de limpeza dos gases. Além de proporcionar maior informação sobre o comportamento do gás, forneceria ferramentas para analisar se este gás cumpre com a regulação vigente para este tipo de combustível no Brasil.
- Projeto de um modelo de otimização multicritério que determine padrões operacionais para a gaseificação que maximizem a velocidade de chama do gás produzido em queima conjunta com outros gases com iguais coeficientes de Woobe e que maximizem a eficiência em MACI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOUANE, Belkacem et al. **Gas turbine combustor for biomass derived LCV gas , a first approach towards fuel-NO x modelling and experimental validation.** v. 22, n. x, p. 959–970, 2002.

AGNEW, J T. **The Pressure Dependence of Laminar Burning Velocity by the Spherical Bomb Method.** n. May, 1960.

AKRAM, Mohammad; KUMAR, Sudarshan; SAXENA, Priyank. **Experimental and Computational Determination of Laminar Burning Velocity of Liquefied Petroleum Gas-Air Mixtures at Elevated Temperatures.** Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 135, n. 9, p. 91501, 2013.

AMELL, Andrés. **Fenomenos de combustión en llamas de premezcla.** p. 1–47, 2009.

AMELL, Andrés et al. **Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural Influence of the altitude on the burning velocity of the natural gas.** p. 72–81, 2004.

AMELL, Andres a.; YEPES, Hernando a.; CADAVID, Francisco J. **Numerical and experimental study on laminar burning velocity of syngas produced from biomass gasification in sub-atmospheric pressures.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 16, p. 8797–8802, 2014.

ARIELLO, Ana Flavia; ZANOELO, Fernando. **Simulação de Auto- Ignição e Propagação de Chamas Laminares de Etanol, N-Heptano e Isoctano com Modelos Cinéticos Detalhados.** 2010. 1689-1699 f. Universidade Federal de Paraná, 2010.

BAUKAL, Charles E; LONDERVILLE, Stephen. **The Coen and Hamworthy Combustion Handbook: Fundamentals for Power, Marine & Industrial Applications.** 2. ed. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2013. v. 2.

BELGIORNO, V et al. **Energy from gasification of solid wastes.** v. 23, p. 1–15, 2003.

BENJUMEA, Pedro; HIGUITA, Carlos; CÓRDOBA, Camilo. **Medición De La Velocidad De Propagación De Llamas Premezcladas De Metano-Aire Y Gas Natural Guajira – Aire Utilizando El Método del angulo del cono.** 2004.

BERG, Magnus; JOHANSSON, E Magnus; JÄRÅS, Sven G. **Catalytic combustion of low heating value gas mixtures : comparison between laboratory and pilot scale tests.** v. 59, p. 117–130, 2000.

BIDABADI, Mehdi; FEREDOONI, Jalil. **Modelling ignition temperature and burning time of a single aluminium nanoparticle.** Micro & Nano Letters, IET, v. 8, n. 5, p. 783–787, 2013.

BRIDGWATER, A. **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass.** Chemical Engineering Journal, v. 91, n. 2–3, p. 87–102, 2003.

BRIZUELA, Eduardo; ROMANO, S D. **Teoria de Llamas.** In: FACULTAD DE INGENIERIA UBA (Org.) . Combustión. Departamen ed. Buenos Aires: Facultad de Ingenieria UBA, 2003. p. 76–93.

BURBANO, Hugo J.; PAREJA, Jhon; AMELL, Andrés a. **Laminar burning velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 36, p. 3243–3252, 2011.

CASTRO, Pablos et al. **Determination of Experimental Correlations for Estimating the Properties of Solid Biofuels from Immediate and Elementar Analysis.** 2013, Logroño: [s.n.], 2013. p. 9.

CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. **Termodinamica Cengel.** 6th. ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2009.

CHOPRA, Sangeeta; JAIN, Ak. **A review of fixed bed gasification systems for biomass.** Agricultural Engineering International: CIGR ..., v. IX, n. 5, p. 1–23, 2007.

D.VLASSOV. **Fundamentos de Combustão.** v. 1, p. 69, 2008.

DALZIEL, Stuart B; O HUGHES, Graham; SUTHERLAND, Bruce. **Synthetic schlieren.** 1998, Sorrento, Italy: Springer, 1998. p. 6.

DANILIN, Oscar. **Combustión.** Departamento de Ingenieria Química. La Plata: Universidad Tecnológica Nacional. , 1999

DASAPPA, S. et al. **Biomass gasification - A substitute to fossil fuel for heat application.** Biomass and Bioenergy, v. 25, n. 6, p. 637–649, 2003.

DÍAZ, Carlos; AMELL, Andrés; CARDONA, Luís Fernando. **Estudio Experimental de la velocidad de Llama de Biogas en un sistema de Premezcla**. Revista Energética - ISSN 0120-9833, v. 39, 2008.

DONG, Chen et al. **Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures**. Fuel, v. 88, n. 10, p. 1858–1863, 2009.

ETSII - POLITÉCNICO DE MADRID. **Combustibles y Combustión** Definiciones. 2011.

FRANCISCO, Roberto; MARTINS, Amir. **Desenvolvimento de Método de Medição Simultâneo de Velocidade de Chama Laminar e Energia de Ativação Aparente e Aplicação em Misturas Combustíveis com Baixo Poder Calorífico**. 2014. 293 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

GALINDO, Ana. **Análise Dos Efeitos Das Condições Operacionais De Um Gaseificador Co- Corrente De Duplo Estágio Na Qualidade Operacionais De Um Gaseificador Co-**. p. 129, 2012.

GARY SETTLES. **Schlieren and Shadowgraph Imaging in the Great Outdoors**. 2001, Honolulu, USA: Springer, 2001. p. 1–14.

GILES, Daniel E; SOM, Sibendu; AGGARWAL, Suresh K. **NO x emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with airstream dilution**. v. 85, n. x, p. 1729–1742, 2006.

GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard. **Combustion**. 4th. ed. San Diego, California: El Sevier, 2008.

GUPTA, M C; NAIR, M.R.S. **Burning Velocity Measurement by Bomb Method**. v. 221, n. I 974, p. 219–221, 1974.

HARGATHER, Michael J.; SETTLES, Gary S. **A comparison of three quantitative schlieren techniques**. Optics and Lasers in Engineering, v. 50, n. 1, p. 8–17, 2012.

HERNANDEZ, J.J; BARBA, J; ARANDA, G. **Combustion characterization of producer gas from**. v. 14, n. 2, p. 125–132, 2012.

IEA. Clean energy: IEA **Input to the Clean Ministerial**. International Energy Agency. Paris: [s.n.], 2011.

- IEA. **Recent trends in OECD CO 2 emissions from fuel combustion**. . Paris: [s.n.], 2015.
- INMETRO - DIMCI. **A Estimativa da Incerteza de Medição Pelos Métodos do ISO GUM 95 e de Simulação de Monte Carlo**. p. 34, 2008.
- KUO KENNET. **Principles of Combustion**. [S.l: s.n.], 1967.
- KUŠAR, Henrik M J; ERSSON, Anders G; JÄRÅS, Sven G. **Catalytic combustion of gasified refuse-derived fuel**. v. 45, n. X, p. 1–11, 2003.
- LAMOUREUX, N; DJEBA, N; PAILLARD, C. **Laminar flame velocity determination for H 2 – air – He – CO 2 mixtures using the spherical bomb method**. v. 27, p. 385–393, 2003.
- LONDOÑÓ, Luis Fernando; LOPEZ, Carlos Esteban; CADAVID, Francisco. **Determinación de la velocidad de deflagración laminar empleando el método del cono y la emisión espontánea de CH en llamas metano –aire** Luis Fernando Londoño. p. 2–4, 2011.
- LOO, Sjaak Van; KOPPEJAN, Jaap. **The Handbook of Biomass Combustion and Co - firing**. [S.l: s.n.], 2015. v. 1.
- MAC AN BHAIRD, Seán T. et al. **Bubbling fluidised bed gasification of wheat straw–gasifier performance using mullite as bed material**. Chemical Engineering Research and Design, v. 97, p. 36–44, 2015.
- MAHALLAWY; DIN HABIK. **Fundamentals and Technologies of Combustion**. 1. ed. Kidlington, Oxford: El Sevier, 2002.
- MARQUEZ, F et al. 2001 **Estudio Del Potencial Energético De Biomasa Pinus caribaea Smith (Es), Eucalyptus citriodora Hook (Ec) y Eucalytus pellita F . Muell (Ep)**; Revista chapingo, v. 7, n. Dc, p. 83–89, 2001.
- MARTÍNEZ, Juan Daniel et al. **Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor**. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 8, p. 3465–3480, 2011.
- MARTÍNEZ, Juan Daniel et al. **Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines**. Renewable Energy, v. 38, n. 1, p. 1–9, 2012.
- MARTINEZ, Juan; SILVA, Electo; VIEIRA, Rubenildo. **Estudo Experimental do**

Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão. 2009. 216 f. 2009.

MAUTONE, José. Combustão. Disponível em: <http://www.mautone.eng.br/apostilas/combustao/Combustao_8_ModelosCombustaoA.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2016.

MCKENDRY, Peter. **Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies.** Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p. 55–63, 2002.

MELO, Braulio Almeida. **Avaliação Computacional de um Sistema de Gaseificação em leite Fluidizado utilizando o software CSFB.** p. 138, 2008.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira Exercício de 2014. 2015.**

MIT. **Visualization based on Refractive-Index Affects.** 1975.

MUKUNDA, HS. **Clean Heat and Power from Solid Fuels – Modern Approaches. Proceedings of the Indian National Science Academy,** v. 81, n. 4, p. 703–715, 2015.

NATARAJAN, Jayaprakash. **Experimental and numerical investigation of laminar flame speeds of H₂ / CO / CO₂ / N₂ Mixtures.** n. May, p. 152, 2008.

ORREGO, Daniel A Flórez. **Velocidad de Deflagración: Importancia en el estudio de la combustión, parámetros influyentes y técnicas para su determinación.** 2012.

OUIMETTE, P; SEERS, P. **Numerical comparison of premixed laminar flame velocity of methane and wood syngas.** Fuel, v. 88, n. 3, p. 528–533, 2009.

PANIGRAHI, P. K.; MURALIDHAR, K. **Laser Schlieren and Shadowgraph.** In: SPRINGER (Org.). Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer. SpringerBr ed. New York: Springer, 2012. p. 128.

PETERS, Norbert. **Combustion Theory.** CEFRC Summer School Princeton, 2010.

RAZUS, Domnina et al. **Burning velocity of liquefied petroleum gas (LPG)-Air mixtures in the presence of exhaust gas.** Energy and Fuels, v. 24, n. 3, p. 1487–1494, 2010.

RIBEIRO, Manuel António. **Estudo do elemento de um queimador de chama pobre com**

estabilização por chama piloto para queimadores de baixo NOx de 19 kW Tese de Mestrado. 2012a. 2012.

RINCÓN, Sonia L; GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang. **Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial**. 2011.

SETTLES, Gary S. **Schlieren und shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media - Experimental Fluid Mechanics**. 1th. ed. New York: Springer, 2001.

SILVA, Electo; VIEIRA, Rubenildo; MARTINEZ, Juan; HAIKAL, Marco; ROCHA, Mateus; VILASBOAS, Cristina. **Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. Biocombustíveis - Volume 1**. 1. ed. Itajubá: [s.n.], 2012. p. 1200.

SILVA, Electo; VIEIRA, Rubenildo; ARADAS, Corria Maria Eugenia. **Geração Elétrica em Pequena Escala a partir da Gaseificação de Biomassa**. 2004, Campinas: Scielo Proceedings, 2004. p. 10.

SINDIGAS. **Metodologia de cálculo de Emissões de Poluentes**. 2014.

SON, Young Il et al. **Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier**. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 10, p. 4215–4220, 2011.

SRIDHAR, G.; PAUL, P. J.; MUKUNDA, H. S. **Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel - An experimental analysis**. Biomass and Bioenergy, v. 21, n. 1, p. 61–72, 2001.

STATISTICAL, BP. **BP Statistical Review of World Energy 65th Edition**. BP Statistical Review of World Energy, NULL, n. June, p. 1–48, 2016.

TSE, Stephen D et al. **Optically accessible high-pressure combustion apparatus** **Optically accessible high-pressure combustion apparatus**. v. 233, n. May, 2014.

UVA, Máster en Automoción. **Resistencia en Fluidos**, 2000

V8 BRASIL. **Manual de Instruções**. [S.l: s.n.], , 2017

VIEIRA, Ana Carla. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. p. 72, 2012.

VIEIRA, Rubenildo; SILVA, Electo. **Gaseificação de Biomassa : Uma Análise Teórica e Experimental.** p. 227, 2007.

VILASBOAS, Cristina; VIEIRA, Rubenildo; SILVA, Electo. **Geração de Eletricidade A Partir Da Gaseificação de Biomassa.** . [S.l: s.n.], 2002.

VIVAS, BMM. **Determinação experimental de limites de inflamabilidade e temperatura de auto-ignição de petro e biocombustíveis em tubo de combustão.** 2012.

WITTON, J J; NOORDALLY, E; PRZYBYLSKI, J M. **Clean catalytic combustion of low heat value fuels from gasification processes.** v. 91, p. 115–121, 2003.

YEPES, Antony; TANGARIFE, Anderson. **Medición experimental de la velocidad de llama de mezclas aire-propano mediante el método del ángulo de cono.** 2014. 2014.

YEPEZ, Antony; TANGARIFE, Anderson. **Medición experimental de la velocidad de llama de mezclas aire-propano mediante el método del ángulo de cono.** 2014. 2014.

YOMA VÁSQUEZ, Jorge Luis. **Visualización de flujos no isotérmicos con un dispositivo óptico Schlieren.** Tesis.Uchile.Cl, p. 126, 2007.

ANEXOS.

8.1 ANEXO A: COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.

Tabela 8-1 Comparação de Metodologias de Aquisição de Imagens.

Autor	Conceito	Semelhanças	Diferencias	Vantagens	Desvantagens
(Settles, 2001)	<p><i>Schlieren</i> é a combinação da projeção ótica de um objeto com uma indicação de sua deflexão da luz e relaciona o a refração da luz em um objeto em duas dimensões.</p> <p><i>Shadowgraph</i> é um fenômeno que reflete sobre uma superfície lisa uma sombra de um objeto.</p>	<p>O fenômeno mostra as mudanças de temperatura ou massa específica de fluxos de alta velocidade, ou a mistura de materiais diferentes e são traduzidas em um formato que possa ser visto facilmente.</p>	<p>No <i>Schlieren</i> a imagem é ótica (real) formada por uma lente. Assim, há uma relação com o objeto direta. <i>Shadowgraph</i> é uma sombra. Assim, as dimensões e escalas não são exatas.</p>	<p><i>Schlieren</i> tem mais precisão e adaptabilidade, pois seu nível de sensibilidade às mudanças de temperatura, velocidade e massa específica são maiores.</p> <p><i>Schlieren</i> combina facilidade de instrumentação com simplicidade de análise.</p>	<p>O <i>Shadowgraph</i> muito menos sensível nas alterações da composição dos materiais estudados.</p> <p>Para o <i>Schlieren</i> os equipamentos necessários é a técnica para realizar o experimento é mais complexa.</p>
(Panigrahi; Muralidhar, 2012)	<p><i>Schlieren</i> é a deflexão do feixe luminoso em um campo de índice de refração variável em direção a uma região de maior índice de refração.</p> <p>No <i>Shadowgraph</i> o feixe de luz expandido de um laser, atravessa o campo de perturbação criando sombra.</p>	<p>As duas técnicas espalham o ponto de referência, simplificando o processo de medição.</p>	<p>Os métodos de <i>Schlieren</i> precisam de equipamentos, lentes, facas de ponta ou algum outro corte da luz refratada, <i>Shadowgraph</i> não precisa de nenhum aparelho, mas a luz deve ser refletida em uma superfície.</p> <p><i>Schlieren</i> baseia-se na deflexão em um ponto, <i>Shadowgraph</i> no deslocamento.</p>	<p>Em sua forma original, <i>Shadowgraph</i> rastreia o caminho do feixe de luz através da seção de teste e pode ser considerada a abordagem mais geral entre os dois.</p> <p>Mesmo de não ter sensibilidade elevada, o <i>Shadowgraph</i> está disponível sobre um campo de visão significativo, e uma impressão completa da imagem.</p>	<p>No <i>Schlieren</i> a análise quantitativa de imagens de sombra pode ser tediosa neste aspecto.</p> <p>Para o <i>Shadowgraph</i> erros de deslocamento do feixe (relacionados ao efeito <i>Shadowgraph</i>). Seu campo de distorção é muito alto.</p>
(Hargather; Settles, 2012)	<p><i>Schlieren</i> é produto da alteração relativa na intensidade da luz pode ser usada para inferir a densidade original e o campo de fluxo.</p> <p>O efeito <i>Shadowgraph</i> mostra as alterações de intensidade da luz e as relaciona com o deslocamento de um feixe.</p>	<p>Os métodos <i>Shadowgraph</i> e <i>Schlieren</i> são geralmente considerados como itens de aparelhos de laboratório para visualizar aspetos não homogêneos em meios transparentes.</p>			<p>A imagem de <i>Schlieren</i> requer uma lente e, em particular, um corte de raios de luz refratados.</p> <p>A montagem de <i>Shadowgraph</i> é simples e barata.</p>

Autor	Conceito	Semelhanças			Desvantagens
(MIT, 1975)	<p>O <i>Schlieren</i> visualiza a distribuição da massa específica do líquido dentro de um líquido. Regiões de gradiente de massa específica desviam feixes de luz, deslocando sua posição no plano da imagem.</p> <p><i>Shadowgraph</i> é uma sombra produto de variações na luz de deflexão ou de mudança de fase do índice de refração que passa através do fluido ou objeto criando sombras em uma tela.</p>	<p>Convertem um campo tridimensional em uma imagem planar. - Visualizam a distribuição da massa específica de um fluido e controla os índices da refração.</p>			<p>- <i>Schlieren</i> sofre a severa limitação de que a sua área de trabalho está confinada estreitamente à vizinhança do limite claro / escuro.</p> <p>- No caso do <i>Shadowgraph</i> a faixa de visão depende da capacidade de deslocamento da luz.</p>

8.2 ANEXO B: RESUMO DO ESTADO DA ARTE.

Tabela 8-2. Resumo estado de arte.

Referencia	Tipo de Mistura	Condições Iniciais	Metodologia				SL	Conclusões
			Método de Cálculo de SL	Tipo de Bancada	Procedimento	Técnica de Aquisição de Imagens		
(Benjumea; Higuaita; Córdoba, 2004)	CH ₄ - Ar/ Gás Natural - Ar	<p>Visc: 11,1. Mesp: 0,55 / Visc: 10,6. Mesp: 0,58</p> <p>Pressão e Temperatura controladas.</p>	Bico de Bunsen	Queimador de pré-mistura atmosférico de ¾ de diâmetro y 35 mm de comprimento.	<p>A faixa de concentrações foi de entre 9 e 11.5%, sendo as amostras tomadas a cada 0,5% de incremento.</p> <p>O ponto inicial para a coleta das amostras sim como sua distribuição foi aleatória. Por meio de experimentação (Não foi usando planejamento experimental).</p>	Observação direta	0,44 m/s e 0,43 m/s	<p>- As misturas com maiores velocidades de chama foram acima dos valores de estequiometria de combustão.</p> <p>- A velocidade de chama para os dois gases aumentou quando diminuiu a percentagem de gás combustível na mistura.</p> <p>- Quando o gás teve maiores quantidades de compostos inertes (N₂ e CO₂), a temperatura de chama diminuiu, e sua velocidade de propagação também.</p>
(Agnew, 1960)	Misturas de CH ₄ /Ar e três de CH ₄ /O ₂	<p>Pressão: 0,2 a 20 Atm.</p> <p>As misturas foram em condições estequiométricas.</p>	Bolha de Sabão (Volume constante)	Bomba de combustão esférica de 25,4 cm de diâmetro, feita de aço inoxidável 410. Contém dois eletrodos e um sistema de ionização.	<p>Utilizaram-se intervalos de ionização para obter os dados do raio da chama / tempo.</p> <p>Os valores de velocidade de</p>	Observação direta	2,4 m/s e 2,7 m/s com pressão de 0,5 atm.	<p>- Se mostrou um período de aceleração da frente fluante após a ignição da mistura por uma faísca. Assim, nesta investigação, verificou-se que o tempo de aceleração da frente da chama não poderia ser previsto calculando o tempo</p>

					combustão foram calculados a partir da medição da velocidade da chama utilizando as equações de Eschenbach e Agnew.			que tardaria uma onda de pressão refletida em se espalhar.
(Amell; Yepes; Cadavid, 2013)	H ₂ , CO e N ₂ (20:20:60 vols.%)	Condições ambientais foram controladas por meio de uma unidade de ar acondicionado, sendo a temperatura de 295 K e a umidade relativa de 62,6%. Condição sub-atmosférica real.	Bico de Bunsen	Queimadores retangulares com bico de tipo ranhura com tamanho de: 7 x 21 mm (Valores altos de velocidade de chama) 9,4 x 29.8 mm (Valores baixos da velocidade de chama)	As amostras foram coletadas e comparadas com os softwares, GRI-Mech 3.0 e o modelo de Li.	Quimiluminescência	N.A	- Verificou-se que a velocidade de combustão laminar aumenta a menor pressão. 2. A presença de hidrogênio na composição química do gás de síntese, melhora a velocidade de combustão laminar e estende o limite de inflamabilidade em condições enxutas.

(Yepez; Tangarife, 2014)	Misturas Ar/C ₃ H ₈	Pressão: 85193 Pa Temperatura: 295,15 K	Bico de Bunsen	Queimador Bunsen	As amostras foram coletadas e medido o ângulo do cone no Autocad, depois no Excel em uma planilha foram calculadas as velocidades do ângulo do cone e comparadas com a literatura de referência. Contudo foram usadas distribuições estadísticas para verificar os dados e as percentagens de erros nas medições	Observação direta	0,005 m/s	Os valores do fator de equivalência nestas condições de temperatura e pressão, se encontram em uma faixa de um intervalo entre 0,7 e 1,4; aos valores da velocidade nas condições especificadas foram de 15 até 52 cm/s respectivamente.
(Bouvet <i>et al.</i> , 2011)	Misturas de gás de síntese (H ₂ / CO / Ar)	Razões de equivalência (0,3 <4 <1,2)	Bico de Bunsen	Uma série de seis queimadores de aço inoxidável. Os diâmetros "d" dos queimadores testados são 3, 4, 6, 8, 12 e 16 mm. O comprimento do queimador nominal de 900 mm foi escolhido com base (Com 18 mm de diâmetro)	Usa a combinação de duas metodologias, medição por meio do FORTRAN, e o algoritmo Three Point Abel Inversion e uma medição com o método do Bico de Bunsen.	Quimiluminescência e <i>Schlieren</i> .	4 m/s para o queimador de 4 mm. 1,2 m/s para o queimador de 8 mm.	- No diâmetro de 3 mm a chama foi muito instável, caso contrário a chama de 16 mm, onde a faixa de vazões para obter chamas foi muito restrita. 2. Nas tubulações 4,6,8 e 12 mm, diminuiu a velocidade de chama enquanto aumentava o diâmetro do queimador.

(Francisco; Martins, 2014)	Pré -Misturas CH ₄ - Ar	K Temperatura atual: 295,15 K	Bico de Bunsen/ Chama Plana	Um queimador tipo Bunsen e um queimador de fenda (queimador retangular) com sistema de refrigeração.	Nenhum, as amostras foram coletadas e comparadas com GRI Mech 3.0 e Davis H ₂ /CO e o modelo de Li e a análise de propagação de erros para a RE foi realizada com base nas vazões de ar e combustível, com uma incerteza em no diâmetro da frente de chama de 1 mm.	<i>Schlieren e Shadowgraph</i> Direito	Com 0,37 m/s para o queimador Bunsen. 0,26 m/s e com o Queimador de Fenda 0,29 m/s, ambas para Ø = 1	- Quanto maior a razão de equivalência maior será a temperatura de reação (ou temperatura de chama) e, conseqüentemente, maior a velocidade de chama.
(Dong <i>et al.</i> , 2009)	Misturas de H ₂ /CO em diferentes concentrações	R C ₃ H ₈ :189	Bico de Bunsen	Dois queimadores de 4 e 5 mm de diâmetro são utilizados, o satisfaz a condição de Reynolds, ReD < 2000 para prever episódios de retorno de chama e deslocamento.	Nenhum, as amostras foram coletadas e comparadas com o modelo numéricos de Davis H ₂ /CO	Observação direta	0,19 cm/s com Ø = 1.7	- Os maiores resultados foram com razões de equivalência de 1,6 e 1,7

(Liu <i>et al.</i> , 2010)	Gases Obtidos de processos de Gaseificação, Aterro e Biodigestão	Razão de equivalência entre 0,4 e 1,8	Simulações e modelos matemáticos	A queima foi simulada respondendo aos modelos de mecanismos de cinética química de GRI e San Diego	Nenhum, a queima foi simulada a través de modelos matemáticos.	Simulação	Para gás de Biomassa produto de gaseificação de madeira em TPN calculam velocidade de chama de 0,55 m/s	- Velocidade máxima de queima em torno de 1,1 para chamas CH ₄ / ar em condições ambiente. Isto corresponde ao fato de que em condições ligeiramente ricas a temperatura da chama é mais elevada (cerca de razão de eq. 1,07)
(Razus <i>et al.</i> , 2010)	Composição 30% C ₃ H ₈ , 70% C ₄ H ₁₀ Butano	Razão de equivalência entre 0,6 e 1,6. Temperatura e Variando a pressão de 0.5 a 1.5 bar.	Bolha de Sabão.	Bomba de combustão esférica de 10 mm de feita de aço inoxidável. Contém dois eletrodos e um sistema de ionização.	Nenhum, as amostras foram coletadas e comparadas com os resultados do código computacional INSFLA desenvolvido por Warnatz.	Observação direta	Velocidade máxima 0,45 m/s	- A velocidade de chama diminui progressivamente quando for agregada menor quantidade de combustível na mistura. 2. Para a queima controlada experimental é importante garantir que cada mistura usada tem a mesma composição.
(Akram; Kumar; Saxena, 2013)	40% Propano, 60% Butano.	Razão de equivalência entre 0,6 e 1,6. Temperatura e pressão standard	Simulações e modelos matemáticos	Os resultados da velocidade de chama laminar e os detalhes sobre a estrutura da chama foram comparados com predições computacionais feitas no software PREMIX junto com USC Mech 2.0	Nenhum, os dados foram coletados e simulados por meio de softwares	Simulação	Em condições estequiométricas a velocidade de chama é 0,4 m/s	1. Os maiores resultados foram com razões de equivalência de misturas ricas. 2. Aumentando a temperatura da mistura inflamável aumenta a velocidade de chama.

(Huzayin <i>et al.</i> , 2008)	27% Propano, 73% Butano.	Razão de Equivalência ($U = 0.7-2.2$) Temperatura 295–400 K e pressão 50–400 kPa	Bomba Esférica	Bomba esférica é uma chaminé cilíndrica de 14.5 mm de diâmetro interno, a pré-mistura do combustível é feita em um vaso cilíndrico de 300 mm de comprimento.	Nenhum, as amostras foram coletadas.	Observação direta	A velocidade máxima de chama para o GLP foi 0,43 m/s com 4.5% de percentagem de combustível na mistura e RE = 1.5	- Quando a pressão aumenta, a velocidade de chama diminui, e quando a temperatura aumenta também a velocidade de chama se incrementa.
(Shahad; Yasiry, 2016)	40% Propano, 60% Butano,	Pressão (0.1-0.3 MPa) e Temperatura Inicial de 308 K.	Bomba Esférica	Consiste em uma câmara de combustão com uma chaminé esférica de 190 mm de diâmetro e 250 mm de altura, 10 mm de largura e volume de 7.2 Lts.	Nenhum, as amostras foram coletadas e comparadas com o cálculo da velocidade de chama em FORTRAN.	Schlieren	0,20 – 0,3m/s	- Maiores Percentagens de Butano nas misturas provem velocidades de chama maiores, com maiores razões de equivalência.
(Natarajan, 2008)	Misturas de $H_2/CO/CO_2/N_2$, considerando mudanças nas quantidades de CO/H_2 e H_2 desde 5-95%	Temperatura: 300 até 700 K, pressão: 1 até 15 atm.	Bico de Bunsen	Dois queimadores tipo Bunsen de 9 e 6 mm de diâmetro, com um sistema de medição das mudanças na temperatura e misturadores do combustível e comburente.	Nenhum, as amostras foram coletadas com o método de Bico de Bunsen, foram tomadas 25 amostras permitindo um desvio padrão de 5%, mas o maior desvio achado foi entorno de 3%, logo os resultados foram comparados	Quimiluminescência e Schlieren	Para o caso quando o gás tem 20% de Hidrogênio (Como o gás de Biomassa deste estudo), os resultados estão na ordem de 0,25 m/s	- Maiores Teores de Hidrogênio acrescentam a velocidade de chama. 2. O aumento da massa específica da mistura reagente com o aumento da pressão reduz a velocidade da chama. Deve notar-se aqui que a temperatura da chama é relativamente insensível à pressão (exceto as pressões muito baixas, bem abaixo das que são relevantes para a combustão da turbina de gás).

					com Chemkin PREMIX.			
(Ebaid; Alkishali, 2016)	Mistura Ar – C ₃ H ₈ com teores não especificados	Temperatura: T _u =300, 325 e 350 K, pressão: 0,5, 1 até 1,5 Bar. E razão de equivalência de 0,6 até 1,5	Bomba Esférica	Consiste em uma câmara de combustão com uma chaminé esférica de 300 mm de diâmetro.	Nenhum, as amostras foram coletadas e comparadas com o cálculo da velocidade de chama em FORTRAN.	Simulação	0,35 m/s	- Perto dos limites estequiométricos e depois, quando as misturas são ricas, as velocidades de chama aumentam.

8.3.2 Queimador Vertical de 1/2" de diâmetro externo de 9 mm de diâmetro interno.

