



FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Termometria em chamas utilizando técnica de espalhamento Rayleigh

Guaratinguetá-SP

2015

Ana Elidia Oliveira Ferraz

**Termometria em chamas utilizando a técnica de
espalhamento Rayleigh**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gilberto Barreta
Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a. Marisa Andreatta Whitaker

Guaratinguetá-SP
2015

F381t Ferraz, Ana Elidia Oliveira
Termometria em chamas utilizando a técnica de espalhamento
Rayleigh / Ana Elidia Oliveira Ferraz – Guaratinguetá, 2015.
53 f. : il.
Bibliografia : f. 45-46

Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Dr. Luiz Gilberto Barreta
Coorientadora: Profa. Dra. Marisa Andreta Whitaker

1. Termômetro e termometria 2 Espalhamento (Física) 3. Chama
(Combustão) I. Título

CDU 536.5

Ana Elidia Oliveira Ferraz

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM FÍSICA LICENCIATURA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Prof. Dr. DÉNIS DALMAZI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Luiz Gilberto Barreta
Orientador/TEAv-11A



Prof. Dr. Marisa Andreatta Whitaker
UNESP-FEG



Prof. Dr. Roberto Yuzumi Honda

Membro Externo

Novembro de 2015

Dedico a meus pais, Cirene e Moíses (in memoriam) e a minha irmã, Juana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Cirene e Moises (in memoriam), a minha irmã, Juana, por estarem ao meu lado e me apoiarem sempre.

Agradeço meu orientador Luiz Gilberto Barreta pela oportunidade de fazer iniciação científica, e a minha co-orientadora Marisa Andreata Whintaker por me orientarem neste trabalho de graduação, pela dedicação e conhecimento transmitido, ao longo de tantos anos

Agradeço ao Instituto de Estudos Avançados pela oportunidade e espaço, aos professores Demerval Carinhana Jr, Maria Esther Sbampato que tanto contribuíram com comentários e sugestões.

Agradeço aos meus professores da faculdade: Isabel, Honda, Marisa, Amorim, Alberto Gaspar, Valéria e Olívia, Marco Aurélio, Cornetti.

Agradeço a meus amigos que estiveram sempre presentes nos momentos da faculdade, e por muito me ajudarem durante todo o curso.

Agradeço ao colégio Fênix pela oportunidade de estágio.

Agradeço a CNPq (Conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico) pelo apoio financeiro.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

Este trabalho contou com o apoio do CNPq através do processo nº 145122/2015-8

FERRAZ, A. E. O., Termometria em chamas utilizando a técnica de espalhamento Rayleigh. 2015. 54 f. Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Métodos não intrusivos de diagnóstico, como a técnica de espalhamento Rayleigh possuem a vantagem de não provocar distúrbio na queima combustível e comburente. Neste trabalho foi usado a técnica de espalhamento Rayleigh para determinação da temperatura em chamas de GLP/O₂/ar e metano/O₂/ar. Inicialmente foi feita a calibração dos rotâmetros para o GLP, O₂, ar e para o metano. Foram realizadas medições em chamas de GLP/O₂/ar ao longo do eixo radial, de 1,0 em 1,0mm, a 3,0 cm acima do queimador, para diferentes razões de equivalência de $\Phi=1,0$, $\Phi=0,83$ e $\Phi=1,2$. Realizaram-se medições em chamas de metano/O₂/ar ao longo do eixo radial, de 1,0 mm em 1,0 mm, a 2,0 cm acima do queimador, e para diferentes razões de equivalência de $\Phi=1,0$, $\Phi=0,83$ e $\Phi=1,3$. Os resultados foram comparados com os obtidos pelo GASEQ, que fornece valores simulados de temperatura de uma chama adiabática. Os resultados foram comparados com outra técnica, conhecida como Fluorescência Induzida por Laser, LIF-“*Laser Induced Fluorescence*” ;(SANTOS,2005) e (MATOS,2012); e apresentaram dados concordantes dentro dos erros experimentais. As temperaturas para a chama de GLP/O₂/ar variam de 2000K a 2200K para $\Phi=1,0$; de 1800K a 2000K para $\Phi=0,83$ e de 1500K a 1900K para $\Phi=1,2$, nas regiões centrais. As temperaturas para a chama de metano/O₂/ar variam de 2400K a 2500K para $\Phi=1,0$; de 1600K a 2000K para $\Phi=0,83$ e de 1890K a 2040K para $\Phi=1,3$, nas regiões centrais

PALAVRAS-CHAVE: Diagnóstico de chamas, Espalhamento, Temperatura.

FERRAZ, A. E. O., Termometry in flame using the Rayleigh scattering technique, 2015. 54 f End of Course Work (Graduate Degree in Physics) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Non-intrusive diagnostic methods, such as Rayleigh scattering technique have the advantage of not causing disturbance in the burning fuel and oxidant. This work used the Rayleigh scattering technique to determine the temperature burning of LPG / O₂ / air and methane / O₂ / air. Initially, we made the calibration of flow meters for LPG, O₂, air and methane. Measurements were performed in flame LPG / O₂ / air along the radial axis, of 1.0 to 1.0 mm, to 3.0 cm above the burner, for different reasons equivalence $\Phi = 1.0$, $0 = \Phi$, 83 and $\Phi = 1.2$. Measurements were performed in flame methane / O₂ / air along the radial axis, 1.0 mm by 1.0 mm to 2.0 cm above the burner, and for different reasons equivalence $\Phi = 1.0$, $\Phi = 0.83$ and $\Phi = 1.3$. The results were compared with those obtained by GASEQ that provides simulated values of adiabatic temperature of the flame. The results were compared with another technique, known as Laser Induced Fluorescence, LIF- "Laser Induced Fluorescence", (SANTOS, 2005) and (Matos, 2012); and showed consistent data within the experimental error. Temperatures for calls LPG / O₂ / air range from 2000K to 2200K for $\Phi = 1.0$; from 1800K to 2000K for $\Phi = 0.83$ and 1500K to 1900K for $\Phi = 1.2$, in the central regions. Temperatures for the flame of methane / O₂ / air range from 2400 K to 2500 K to $\Phi = 1.0$; 1600 K the of 2000 K for $\Phi = 0.83$ and the 1890 K of 2040 K for $\Phi = 1.3$, in the central regions

KEYWORDS: Diagnostic and flames, Spreading, Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1-(A) Laser Nd-YAG. (B) Foto da montagem experimental para obtenção do espalhamento Rayleigh.....	20
Figura 3.2 – Montagem experimental para obtenção do sinal Rayleigh	21
Figura 4.1 – Curva de calibração do rotômetro de GLP.....	24
Figura 4.2 – Curva de calibração do rotômetro de O ₂	25
Figura 4.3 – Curva de calibração do rotômetro de N ₂	25
Figura 4.4 – Curva de calibração do rotômetro de CH ₄	26
Figura 4.5 – Chama estequiométrica de GLP/O ₂ /ar	31
Figura 4.6-Simulação GASEQ para chama estequiométrica (propano+O ₂ +ar) (MORLEY, 2002)	32
Figura 4.7 – Chama pobre em combustível de GLP/O ₂ /ar.....	33
Figura 4.8 – Simulação GASEQ para chama pobre em combustível (propano+O ₂ +ar) (MORLEY, 2002)	34
Figura 4.9 – Chama rica em combustível de GLP/O ₂ /ar.....	35
Figura 4.10 – Simulação GASEQ para chama rica em combustível (propano+O ₂ +ar) (MORLEY, 2002)	36
Figura 4.11 – Comparativo das temperaturas de GLP/O ₂ /ar	37
Figura 4.12 – Chama estequiométrica em combustível de CH ₄ /O ₂ /ar	37

Figura 4.13–Simulação GASEQ para chama estequiométrica em combustível ($\text{CH}_4+\text{O}_2+\text{ar}$) (MORLEY, 2002)	38
Figura 4.14– Chama pobre em combustível de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$	39
Figura 4.15 – Simulação GASEQ para chama pobre em combustível ($\text{CH}_4+\text{O}_2+\text{ar}$) (MORLEY, 2002)	40
Figura 4.16 – Chama rica em combustível de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$	41
Figura 4.17 – Simulação GASEQ para chama rica em combustível ($\text{CH}_4+\text{O}_2+\text{ar}$) (MORLEY, 2002)	41
Figura 4.18 – Comparativo das temperaturas de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Refratividade molar $R_L(\lambda)$, taxa de polarização $\rho_0(\lambda)$ e seção de choque diferencial $\left(\frac{d\sigma(\lambda)}{d\Omega}\right)$ para a maioria das espécies de combustão e para o ar a 532 nm e nas condições normais de pressão e temperatura (STP)	17
Tabela 3.1 –Cálculo das vazões volumétricas de combustível (GLP) e oxidante	22
Tabela 3.2 –Cálculo das vazões volumétricas de combustível (CH ₄) e oxidante	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEAv	Instituto de Estudos Avançados
u.a	Unidade arbitrária
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
LIF	Fluorescência Induzida por laser (<i>Inglês “Laser Induced Fluorescence”</i>)
PLIF	Fluorescência Induzida por laser planar (<i>Inglês “Planar Laser Induced Fluorescence”</i>)
LPG	Gás Liquefeito de Petróleo (<i>Inglês “Liquefied Petroleum Gas”</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

O ₂	Oxigênio
K	Kelvin
T	Temperatura (em Kelvin)
CH ₄	Gás metano
k	Constante de Boltzmann
Φ	Razão de equivalência
%	Porcentagem
S	Sinal de espalhamento Rayleigh
n	Eficiência da coleção óptica
I	Intensidade do Laser incidente
N	Densidade das partículas
V	Constante que descreve o volume observado
$\Delta\Omega$	Ângulo sólido subtendido pela coleção óptica.
X _i	Fração molar da espécie
N ₂	Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Água
H ₂	Hidrogênio
CO	Óxido de Carbono
mW	Miliwatt, é a unidade de medida correspondente 10 ⁻⁶ watts
m	Metro
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
mmHg	Pressão em milímetros de Mercúrio
cm	Centímetro
μm	Micrômetro
R _L (λ)	Refratividade molar
ρ_0	Taxa de polarização
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$	Seção de choque efetiva
m/min	Milímetros por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. ASPECTOS TEÓRICOS DO ESPALHAMENTO RAYLEIGH	16
3. METODOLOGIA	19
3.1.EQUIPAMENTOS E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	19
3.2.CÁLCULO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS ROTÂMETROS.....	24
4.2. EQUAÇÕES QUÍMICAS DAS REAÇÕES DE COMBUSTÃO E CÁLCULO DAS SEÇÕES DE CHOQUE PARA GLP/O ₂ /AR.....	26
4.3. EQUAÇÕES QUÍMICAS DAS REAÇÕES DE COMBUSTÃO E CÁLCULO DAS SEÇÕES DE CHOQUE PARA CH ₄ /O ₂ /ar	28
4.4.RESULTADOS.....	31
5 CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE 1-Dados experimentais de temperatura	47

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a busca por novas fontes energéticas e a preocupação com o meio ambiente são temas discutidos mundialmente, o processo de combustão desde os primórdios se mostra como alvo principal de interesse da humanidade, e com isso seus parâmetros são imprescindíveis para melhor caracterização desse sistema.

Diversos parâmetros concorrem para uma maior eficiência do sistema de combustão e devem ser levados em consideração. Dentre eles podem ser citados a temperatura, a pressão, a composição e as concentrações de combustíveis e comburentes. Os métodos de diagnósticos aplicados no estudo da combustão são os mais diversos, e podem ser classificados em métodos intrusivos, como a utilização de termopares para determinação da temperatura, e métodos não intrusivos, basicamente, os métodos ópticos. Estes últimos apresentam a vantagem de não perturbarem o escoamento das substâncias que reagem durante a combustão, não interferirem no próprio processo de queima e a maioria desses métodos apresentarem alta resolução temporal e espacial, o que permite mapear a zona de reação e identificar os diversos estados em que se formam os radicais transientes (BARRETA, 1993).

Como alternativa ao uso de técnicas intrusivas, o monitoramento de propriedades óticas de espécies químicas presentes no escoamento tem se mostrado bastante atrativo: emissão natural, espalhamento, absorção, fluorescência (induzida ou natural), variação de índice de refração, etc.; são alguns exemplos de fenômenos físico-químicos associados aos componentes do escoamento que podem fornecer informações sobre sua temperatura e velocidade.

O espalhamento Rayleigh é um processo de espalhamento elástico, ou seja, não há quantidade de energia trocada entre a radiação incidente e as moléculas atingidas ou partículas. Portanto, o comprimento de onda da luz espalhada não é modificado e o sinal espalhado é proporcional à intensidade incidente da soma ponderada da secção de choque diferencial. Por esta razão, o espalhamento Rayleigh não pode ser usado para determinar concentrações individuais das espécies, mas somente para medir a densidade do número de todas as espécies juntas. (SBAMPATO *et al*;2010).

O presente trabalho teve como objetivo determinar a temperatura experimental no eixo radial das chamas GLP/O₂/ar e metano/O₂/ar, a fim de compará-las com valores teóricos obtidos através do programa GASEQ, que simula uma temperatura de uma chama adiabática, e compará-la também com a literatura.

Os aspectos teóricos serão apresentados no segundo capítulo.

No terceiro capítulo, serão apresentados os cálculos das razões de equivalência e a montagem experimental para obtenção do sinal de espalhamento.

Os resultados e discussões serão apresentados no quarto capítulo: curvas de calibração dos rotâmetros, os cálculos de equilíbrio das reações de combustão e o cálculos das secções de choque.

Por fim, no quinto capítulo será apresentada a conclusão geral.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

O espalhamento Rayleigh é um fenômeno físico muito utilizado para medida de temperatura e concentração dos produtos de uma combustão, também pode ser usado para medir a densidade. Adotando-se pressão constante, a temperatura pode ser derivada da Lei do Gás ideal ou pela largura de linha do espalhamento Doppler (CHILDS *et al*, 2000).

No espalhamento Rayleigh a luz capturada pela fotomultiplicadora é polarizada, a seção de choque pode ser definida como a área de uma partícula, molécula ou átomo, que sofrerá interação com a luz incidente de um laser, por exemplo.

Na prática, os diagnósticos Rayleigh sofrem de uma falta de especificidade molecular. Por isso, a técnica tem tido aplicações muito limitadas e tem sido empregada somente em chamas muito limpas. Porém, a maior vantagem reside na força de sinal relativamente alta (a seção de choque é cerca de 1000 vezes maior que a seção de choque Raman vibracional) (BENHACHMI *et al*, 1983).

O espalhamento Rayleigh é de interesse desde que a seção de choque seja tipicamente três vezes maior que a magnitude para o espalhamento vibracional Raman.

O sinal total do espalhamento Rayleigh coletado por um detector é descrito por (SUTTON *et al*, 2006):

$$S = nINV \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{mix} d\Omega \quad (2.1)$$

Onde:

S- Sinal do espalhamento

n - Eficiência da coleção óptica

I- Intensidade do laser incidente

N- Densidade das partículas (moléculas).

V- Constante que descreve o volume de observação

$\Delta\Omega$ - Ângulo sólido subtendido pela coleção óptica.

$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{mix}$ - Seção de choque efetiva média da mistura.

A seção de choque diferencial de uma mistura de gases é determinada pela soma ponderada de todas as espécies presentes no volume de observação (BENHACHMI *et al*, 1983):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{eff} = \sum_i x_i \left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega}\right) \quad (2.2)$$

Onde:

X_i - Fração molar da espécie

A tabela 2. 1 mostra as seção de choque diferencial das espécies indicadas na coluna, e desta forma foram calculados os valores médios (SUTTON *et al*, 2006).

Tabela 2. 1 – Refratividade molar $R_L(\lambda)$, taxa de polarização $\rho_0(\lambda)$ e seção de choque diferencial $\left(\frac{d\sigma(\lambda)}{d\Omega}\right)$ para a maioria das espécies de combustão e para o ar a 532 nm e nas condições normais de pressão e temperatura (STP) (SUTTON *et al*, 2006).

Espécies	$R_L(\lambda)(\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	$\rho_0(\lambda)$	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right), 10^{28} \text{cm}^2$
N₂	4,4840	0,0201	6,29651 E-28
O₂	4,0650	0,0544	5,39576 E-28
CO₂	6,6900	0,0752	1,50029 E-28
H₂O	3,7820	0,0005	4,37685 E -28
H₂	2,0860	0,0178	1,35887 E -28
CO	5,0340	0,0107	7,84689 E-28
Ar	4,2290	0	5,46877 E-28

Fonte: Próprio autor.

Nesse experimento é medido o sinal de espalhamento mínimo e máximo para a mistura de gás presente no trabalho e para o ar.

$$S(T_1) = nIN_1V \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Ar} \Delta\Omega \quad (2.3)$$

$$S(T_2) = nIN_2V \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Chama} \Delta\Omega \quad (2.4)$$

Para uma combustão com uma mistura estequiométrica, a variação na seção de choque citada é negligenciada, e a seção de choque pode ser assumida constante por toda a chama. Desta forma, reduz-se o procedimento para medir a intensidade espalhada de Rayleigh para cada ponto de interesse relativo ao de referência, ou seja, ar na temperatura ambiente (SILVA, 2012).

Lembrando que a densidade de espécies pode ser utilizada a partir da lei dos gases ideais:

$$N_1 k T_1 = N_2 k T_2 \Rightarrow T_2 = \frac{N_1}{N_2} T_1 \quad (2.5)$$

k-Constante de Boltzmann;

Combinando as equações (2.3) - (2.4) é possível escrever:

$$T_2 = \delta \frac{S(T_1)}{S(T_2)} T_1 \quad (2.6)$$

$$\delta = \frac{(\partial \sigma / \partial \Omega)_{mix\ chama}}{(\partial \sigma / \partial \Omega)_{Ar}} \quad (2.7)$$

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as descrições das unidades experimentais e o cálculo da razão de equivalência.

3.1. EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O fluxo do gás foi conduzido por meio de tubos até o queimador, foi medido por meio de rotômetros produzidos pela marca Cole-Parmer, fabricados pela empresa Allorg Instrumentes; sendo que, para o Metano e para o GLP foi utilizado o modelo FM 012-10, para o ar o modelo FM 023-92 e para o oxigênio um rotômetro da marca Gilmont modelo B 4928. O rotômetro foi calibrado por meio de um calibrador, marca Teledyne HBM-1^a.

O programa “QTi Plot”, um programa gráfico de análise estatística, *software freeware*, foi utilizado para os cálculos que envolvem a calibração dos rotômetros, e também para a elaboração dos gráficos de análise das temperaturas.

O programa GASEQ, é um programa que permite o cálculo no equilíbrio químico, da temperatura e a concentração de espécies de chamas de diversos combustíveis, partindo de dados termodinâmicos é um software encontrado gratuito.

Para obtenção do sinal Rayleigh foi utilizado um sistema que consiste de um Laser de Nd-YAG, da marca Quantel Twins, que pode operar no infravermelho (1064 nm), visível (532 nm) e luz ultravioleta (266 nm).

Um queimador de pré-mistura tipo Y, polarizador, lentes, monocromador da marca Optometrics LLC; modelo MC1-01, fotomultiplicadora da marca Hamamatsu; modelo R 446, fonte de tensão da marca Hamamatsu; modelo C3350 e um osciloscópio da marca Agilent Technologies, placa de meia onda e um fotodiodo.

A figura 3.1 apresenta o esquema experimental para detecção do espalhamento Rayleigh.

O comprimento de onda do feixe do laser, está na região do visível em 532nm, este segue em direção ao queimador com o auxílio dos prismas. Para colimar o feixe é utilizada uma lente convergente de distância focal de 1,20 m.

Uma placa de meia onda foi utilizada com a finalidade de polarizar o feixe de luz do laser, de forma que este tivesse a direção de propagação na vertical, a qual incidiu na

chama. A luz espalhada é coletada perpendicularmente à direção de propagação do feixe de incidência, por uma de lente de 10 cm de distância focal.

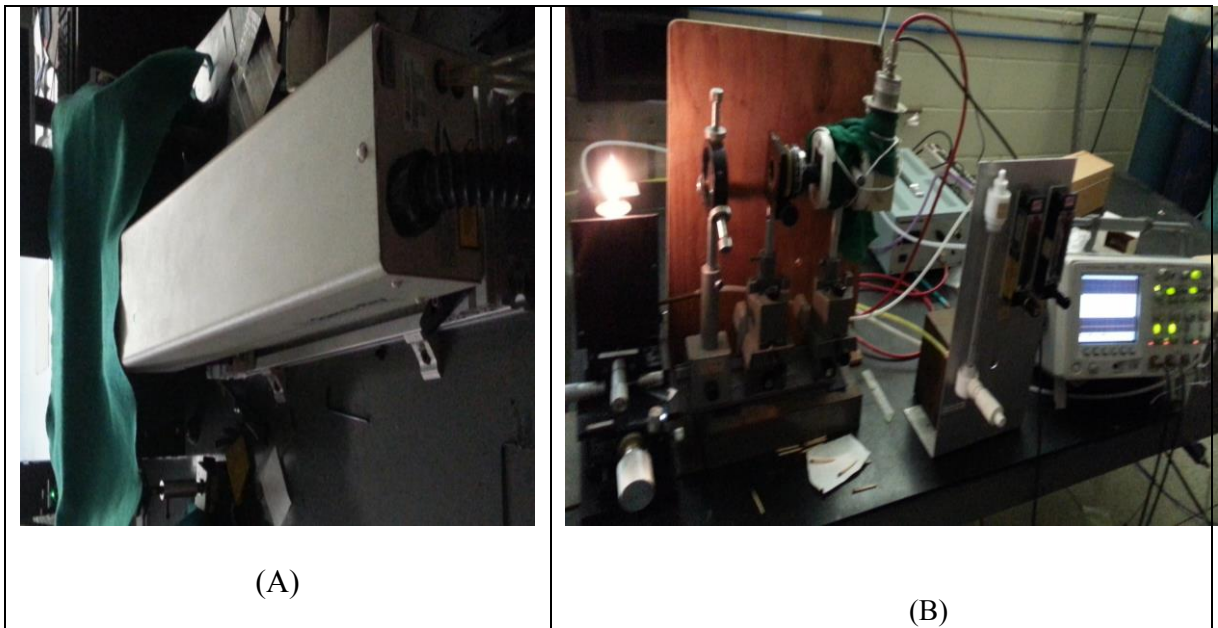
Para eliminar a contribuição de radiação espúria e da contribuição da fuligem, instalamos o polarizador na frente do detector e medimos o espalhamento em 90° (sinal máximo) e 0° (sinal de fundo) e subtraímos uma da outra.

O monocromador que é utilizado como um filtro na faixa de 532 nm, com uma fenda de $300 \mu\text{m}$, é acoplado a fotomultiplicadora. A fotomultiplicadora é ligada a uma fonte de tensão de 1000Volts de modo a receber essa luz espalhada e a transformando em sinal luminoso para o osciloscópio que nada mais é, que um sistema de processamento de sinal.

O osciloscópio utiliza um dos canais para o sinal de disparo, através do fotodiodo e outro para medir o sinal de luz espalhada, realizando assim a interface entre o sinal detectado pela fotomultiplicadora e o analisador.

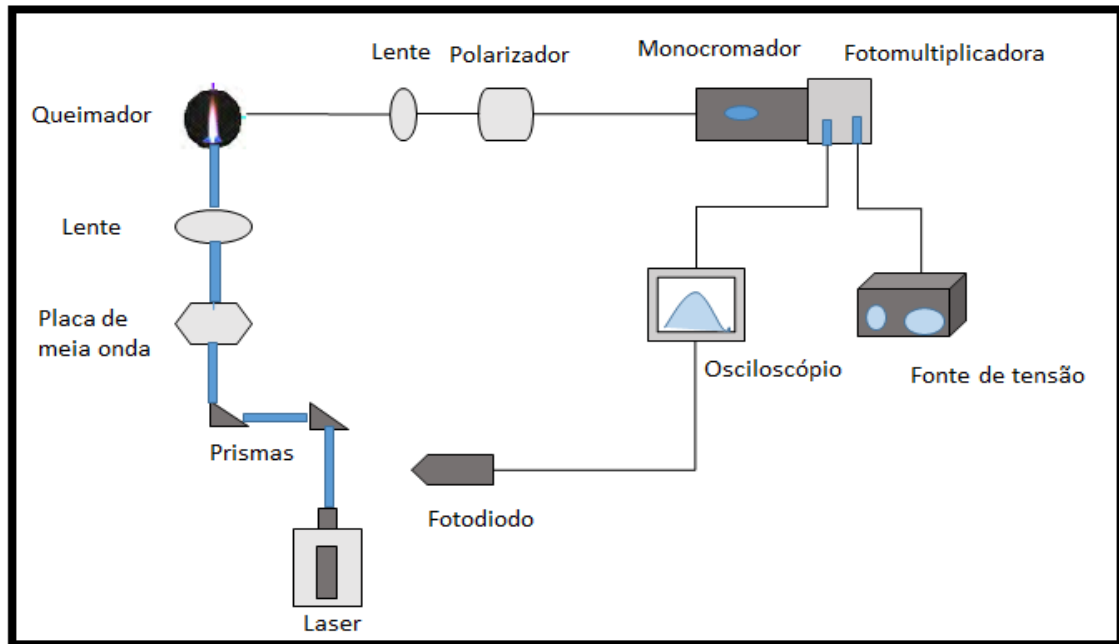
O espalhamento Rayleigh é obtido das diferenças entre os dois sinais.

Figura 3.1- (A) Laser Nd-YAG. (B) Foto da montagem experimental para obtenção do espalhamento Rayleigh.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.2-Montagem experimental para obtenção do sinal Rayleigh.



Fonte: Próprio autor.

3.2 CÁLCULO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA

A razão de equivalência é um dos fatores mais importantes para a determinação do desempenho de um sistema de combustão. É muito utilizada para indicar quantitativamente se uma mistura de combustível é rica, pobre ou estequiométrica. A razão de equivalência é definida como:

$$\Phi = \frac{(Comb/Oxid)_{reação}}{(Comb/Oxid)_{esteq}} \quad (3.1)$$

Sendo:

Oxid – Oxidante

Comb – Combustível

Desta definição, pode-se observar que para misturas ricas em combustível, $\Phi > 1$, para misturas pobres em combustível $\Phi < 1$ e para misturas estequiométricas Φ é igual a 1 (LACAVA, 2010).

Para o presente trabalho, foi utilizada uma vazão fixa para o GLP de 77 ml/ min e para o ar de 500 ml/min, considerando a mistura de ar composta por 21% de O_2 e 79% de N_2 , que precisa ser levado em consideração para o cálculo de Φ .

Para o O_2 variaram-se as vazões de modo a obter uma mistura estequiométrica com 280ml/min, para uma mistura pobre em combustível utilizou-se uma vazão de 355 ml/ min e para uma mistura rica em combustível fez uso de uma vazão de 220 ml/min.

Na tabela 3.1 são apresentadas as respectivas razões de equivalência, vazões e composição de cada mistura de GLP, que no presente trabalho considerou o propano como o principal componente do GLP.

Tabela 3.1 – Cálculo das vazões volumétricas de combustível (GLP) e oxidante.

Vazão GLP (ml/min)	Vazão Ar (ml/min)	Vazão O_2 (ml/min)	Razão de Equivalência (Φ)	Composição (%)
		280	1,0	9,04 %GLP; 44,7% O_2 ;46,0% N_2
77	500	355	0,83	8,26%GLP; 49,4% O_2 ;42,3% N_2
		220	1,2	9,66%GLP; 40,8% O_2 ; 49,6% N_2

Fonte: Próprio autor.

Para o presente trabalho, foi utilizada uma vazão fixa para o CH_4 de 160 ml/ min e para o ar de 150 ml/min, considerando a mistura de ar composta por 21% de O_2 e 79% de N_2 , que precisa ser levado em consideração para o cálculo de Φ .

Para o O_2 variaram-se às vazões de modo a obter uma mistura estequiométrica com 286 ml/min, para uma mistura pobre em combustível utilizou-se uma vazão de 357 ml/ min e para uma mistura rica em combustível fez uso de uma vazão de 210 ml/min.

Na tabela 3.2 estão representadas as respectivas razões de equivalência, vazões e composição de cada mistura de CH_4 ,

Tabela 3.2 – Cálculo das vazões volumétricas de combustível (CH₄) e oxidante.

Vazão CH₄ (ml/min)	Vazão Ar (ml/min)	Vazão O₂ (ml/min)	Razão de Equivalência (Φ)	Composição (%)
		286	1,0	26,8%CH ₄ ; 53,3%O ₂ ;19,9% N ₂
160	150	357	0,83	23,9%CH ₄ ; 58,2%O ₂ ;17,9 % N ₂
		210	1,3	30,8%CH ₄ ; 46,5%O ₂ ; 22,8% N ₂

Fonte: Próprio autor.

Foram realizadas medidas de um em um milímetro, de um lado ao outro da chama no eixo radial, tanto para as misturas de GLP quanto para as misturas de CH₄. Devido a diferença de altura das chamas foi mantida uma altura fixa de três centímetros do queimador para as reações de GLP e uma altura fixa de dois centímetros do queimador para as reações de CH₄.

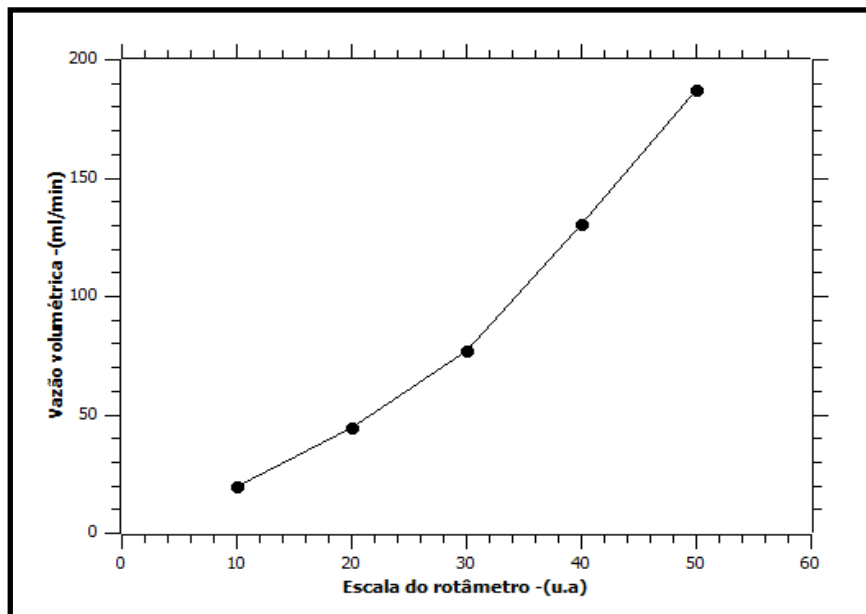
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentadas: as curvas de calibração dos rotômetros, os cálculos das equações utilizadas e os resultados e suas respectivas análises.

4.1 CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS ROTÔMETROS

A leitura da escala dos rotômetros é constituída de unidades arbitrárias (u.a.), que serão transformadas em unidades de medida de vazão volumétrica (ml/min) por meio da equação da curva de calibração.

Figura 4.1 – Curva de calibração do rotômetro de GLP



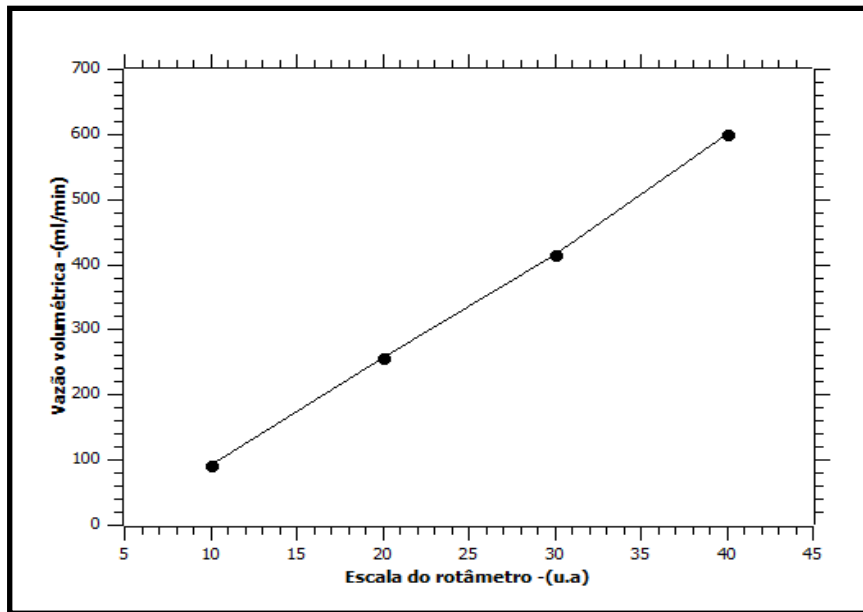
Fonte: Próprio autor.

A equação (4.1) permite o cálculo direto da vazão volumétrica do gás GLP por meio da escala do rotômetro:

$$y = 4,2118X - 34,481 \quad (4.1)$$

A curva de calibração obtida para o rotômetro de medição da vazão do O₂ está representada na figura 4.2, que corresponde ao comportamento da equação (4.2).

Figura 4.2-Curva de calibração do rotâmetro de O₂.



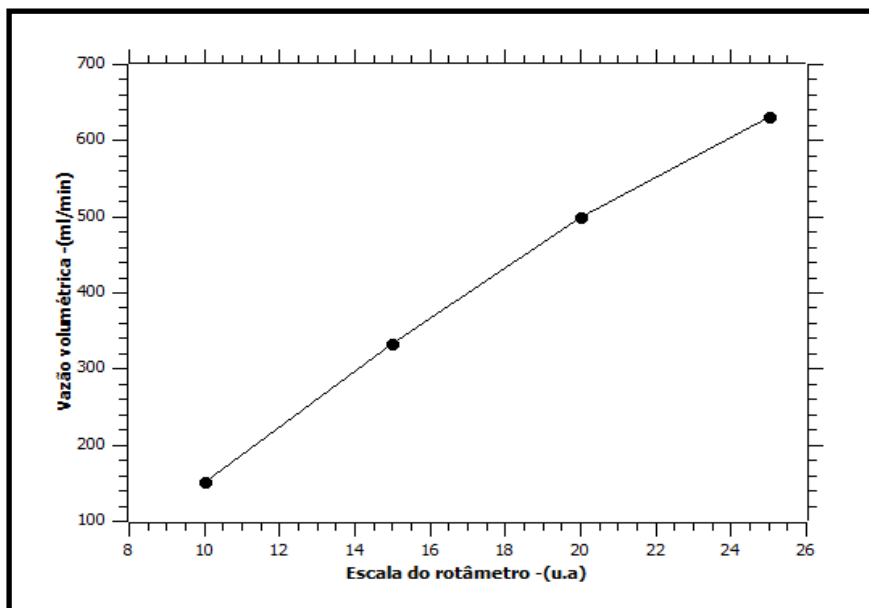
Fonte: Próprio autor.

A equação (4.2) permite o cálculo direto da vazão volumétrica do gás O₂ por meio da escala do rotâmetro:

$$y = 16,837X - 80,73 \quad (4.2)$$

A curva de calibração obtida para o rotâmetro de medição da vazão do ar está representada na figura 4.3, que corresponde ao comportamento da equação (4.3).

Figura 4.3- Curva de calibração do rotâmetro de ar.



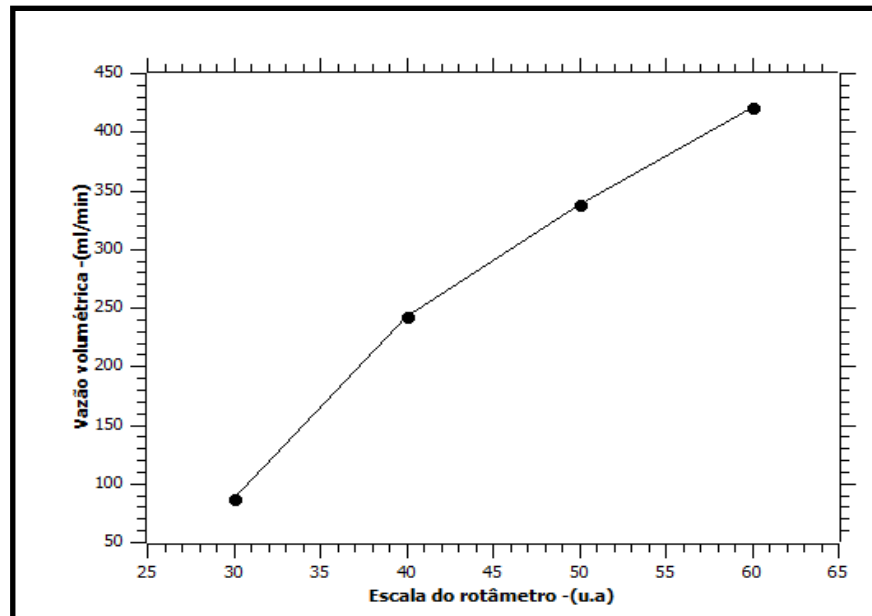
Fonte: Próprio autor.

A equação (4.3) permite o cálculo direto da vazão volumétrica do ar por meio da escala do rotâmetro:

$$y = 32,114X - 157,79 \quad (4.3)$$

A curva de calibração obtida para o rotâmetro de medição da vazão do CH₄ está representada na figura 4.4, que corresponde ao comportamento da equação (4.4).

Figura 4.4- Curva de calibração do rotâmetro para o CH₄.



Fonte: Próprio autor.

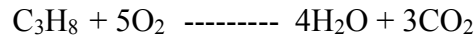
A equação (4.4) permite o cálculo direto da vazão volumétrica do gás O₂ por meio da escala do rotâmetro:

$$y = 10,993x - 222,71 \quad (4.4)$$

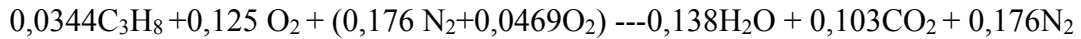
4.2 EQUAÇÃO QUÍMICA DAS REAÇÕES DE COMBUSTÃO E CÁLCULO DAS SEÇÕES DE CHOQUE PARA A CHAMA DE GLP/O₂/AR.

Nessa seção vamos calcular o equilíbrio da reação de combustão para as chamas de GLP/O₂/ar, considerando o propano como componente principal do GLP.

A reação global da reação de GLP e O₂ é dada por:



Realizando-se o equilíbrio químico, com a utilização de O₂ e ar na pré-mistura, para $\Phi=1,0$, obtém-se a reação:



E as frações molares:

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{0,103}{0,417} = 0,247$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,138}{0,417} = 0,331$$

$$X_{\text{N}_2} = \frac{0,176}{0,417} = 0,422$$

As seções de choque de cada produto e reagente são fornecidas por (SUTTON *et al*, 2006), segundo a tabela 2.1.

Para a mistura, portanto, realiza-se o cálculo como segue (SUTTON *et al*, 2006):

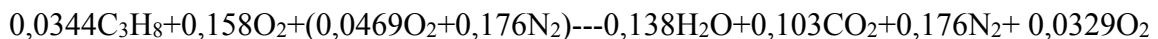
$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{ mistura} = \sum_i \frac{\partial \sigma_i}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} X_i \quad (4.5)$$

Para chama estequiométrica, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é realizado por (SUTTON *et al*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{ mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{\text{N}_2} + 15,0029 \times 10^{-28} \times X_{\text{CO}_2} + 4,37685 \times 10^{-28} \times$$

$X_{\text{H}_2\text{O}}$)

Para chama pobre em combustível com $\Phi=0,83$, o equilíbrio químico é dado por:



Obtendo-se as frações molares dos produtos:

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{0,103}{0,449} = 0,229$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,138}{0,449} = 0,307$$

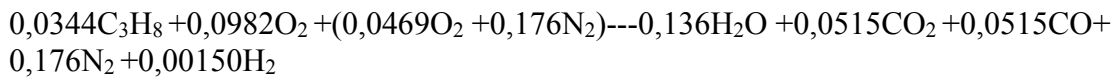
$$X_{O_2} = \frac{0,0329}{0,449} = 0,0733$$

$$X_{N_2} = \frac{0,176}{0,449} = 0,392$$

Para chama pobre, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é (SUTTON *et al*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{ mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{N_2}) + (15,0029 \times 10^{-28} \times X_{CO_2}) + (4,37685 \times 10^{-28} \times X_{H_2O}) + (5,39576 \times 10^{-28} \times X_{O_2})$$

Para chama rica em combustível com $\Phi=1,2$, o equilíbrio químico é dado por:



Obtendo-se as frações molares:

$$X_{CO_2} = \frac{0,0515}{0,417} = 0,124$$

$$X_{CO} = \frac{0,0515}{0,417} = 0,124$$

$$X_{H_2O} = \frac{0,136}{0,417} = 0,326$$

$$X_{H_2} = \frac{0,00150}{0,417} = 0,00359$$

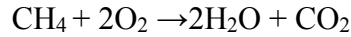
$$X_{N_2} = \frac{0,176}{0,417} = 0,422$$

Para chama rica em combustível com $\Phi=1,2$, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é (SUTTON *et al*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{ mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{N_2}) + (15,0029 \times 10^{-28} \times X_{CO_2}) + (4,37685 \times 10^{-28} \times X_{H_2O}) + (7,84689 \times 10^{-28} \times X_{CO}) + (1,35887 \times 10^{-28} \times X_{H_2})$$

4.3.EQUAÇÃO QUÍMICA DAS REAÇÕES DE COMBUSTÃO E CÁLCULO DAS SEÇÕES DE CHOQUE PARA A CHAMA DE CH₄/O₂/AR.

A reação global da combustão do metano é apresentada abaixo:



Realizando-se o equilíbrio químico, com a utilização de O₂ e ar na pré-mistura para uma chama de $\Phi=1,0$, obtém-se a reação estequiométrica:



Obtendo-se as frações molares:

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{0,0714}{0,266} = 0,268$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,142}{0,266} = 0,533$$

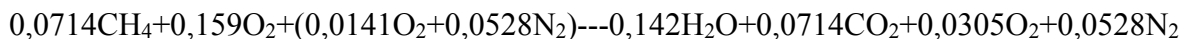
$$X_{\text{N}_2} = \frac{0,0528}{0,266} = 0,198$$

As seções de choque de cada produto e reagente são fornecidas por (SUTTON *et al*, 2006), tabela 2.1.

Para chama estequiométrica, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é (SUTTON *et al*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{Mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{\text{N}_2}) + (15,0029 \times 10^{-28} \times X_{\text{CO}_2}) + (4,37685 \times 10^{-28} \times X_{\text{H}_2\text{O}})$$

Realizando-se o equilíbrio químico, com a utilização de O₂ e ar na pré-mistura para uma chama de $\Phi=0,83$ obtém-se a reação pobre em combustível:



Determina-se as frações molares:

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,142}{0,297} = 0,478$$

$$X_{CO_2} = \frac{0,0714}{0,297} = 0,240$$

$$X_{O_2} = \frac{0,0305}{0,297} = 0,103$$

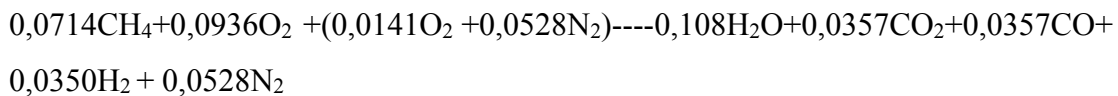
$$X_{N_2} = \frac{0,0528}{0,297} = 0,178$$

As seções de choque de cada produto e reagente são fornecidas por (SUTTON *et al*, 2006), ver tabela 2.1.

Para chama e, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é (SUTTON *et al*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{ mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{N_2}) + (15,0029 \times 10^{-28} \times X_{CO_2}) + (4,37685 \times 10^{-28} \times X_{H_2O}) + (5,39576 \times 10^{-28} \times X_{O_2})$$

Para chama rica em combustível com $\Phi=1,3$, o equilíbrio químico é dado por:



Obtém-se as frações molares:

$$X_{CO_2} = \frac{0,0357}{0,267} = 0,134$$

$$X_{CO} = \frac{0,0357}{0,267} = 0,134$$

$$X_{H_2O} = \frac{0,108}{0,267} = 0,404$$

$$X_{H_2} = \frac{0,0350}{0,267} = 0,131$$

$$X_{N_2} = \frac{0,0528}{0,267} = 0,198$$

Para chama rica em combustível com $\Phi=1,3$, o cálculo da diferencial da seção de choque para os produtos de combustão é (SUTTON *et al*, 2006):

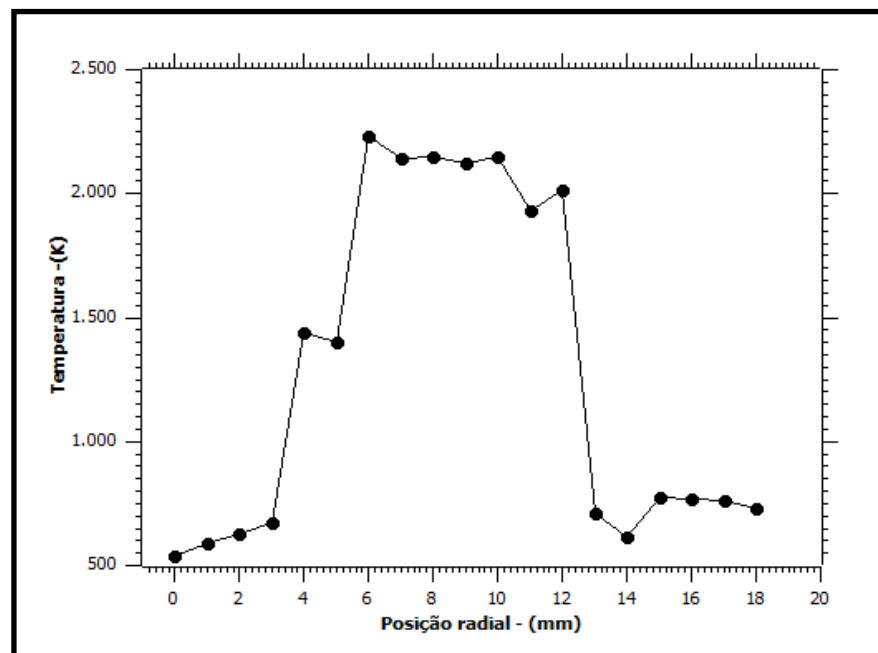
$$\frac{\partial \sigma(\lambda)}{\partial \Omega(\text{cm}^2)} \text{mistura} = (6,29651 \times 10^{-28} \times X_{\text{N}_2}) + (15,0029 \times 10^{-28} \times X_{\text{CO}_2}) + (4,37685 \times 10^{-28} \times X_{\text{H}_2\text{O}}) + (7,84689 \times 10^{-28} \times X_{\text{CO}}) + (1,35887 \times 10^{-28} \times X_{\text{H}_2})$$

4.4 RESULTADOS

Os valores de temperatura experimental encontrados para a chama de GLP/ O₂/ar, estequiométrica, ou seja, $\Phi=1,0$, são mostrados na figura 4.5.

Os valores próximos a interface ar ambiente ficaram entre 500K e 750K, valores esses acima da temperatura ambiente de 300K.

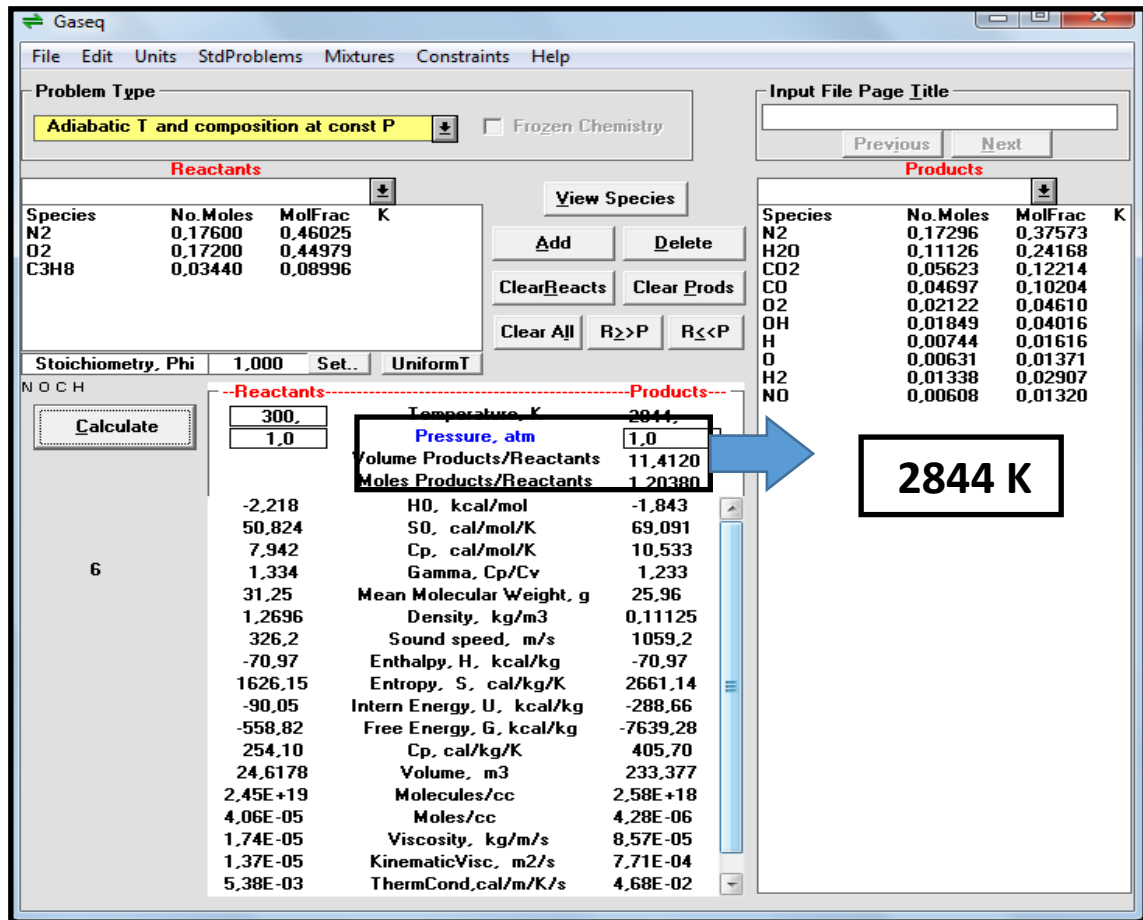
Figura 4.5- Chama estequiométrica $\Phi=1,0$, de GLP/O₂/Ar



Fonte: Próprio autor.

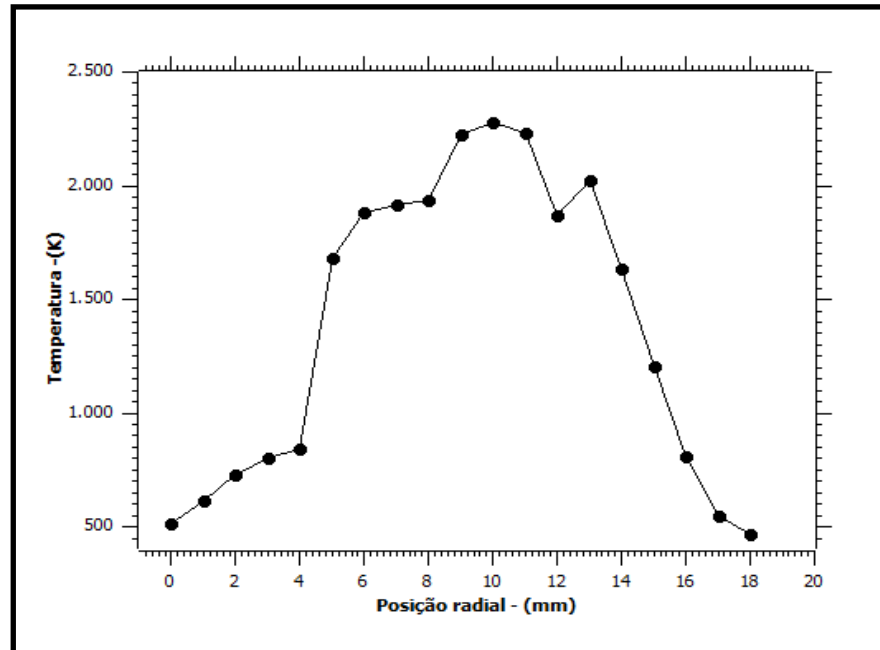
Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obteve o valor de 2844 K, representado na figura 4.6, nas mesmas condições de equivalência.

Figura 4.6– Simulação no GASEQ, para $\Phi=1,0$, ($C_3H_8+ O_2+ Ar$).



Fonte: MORLEY, 2002.

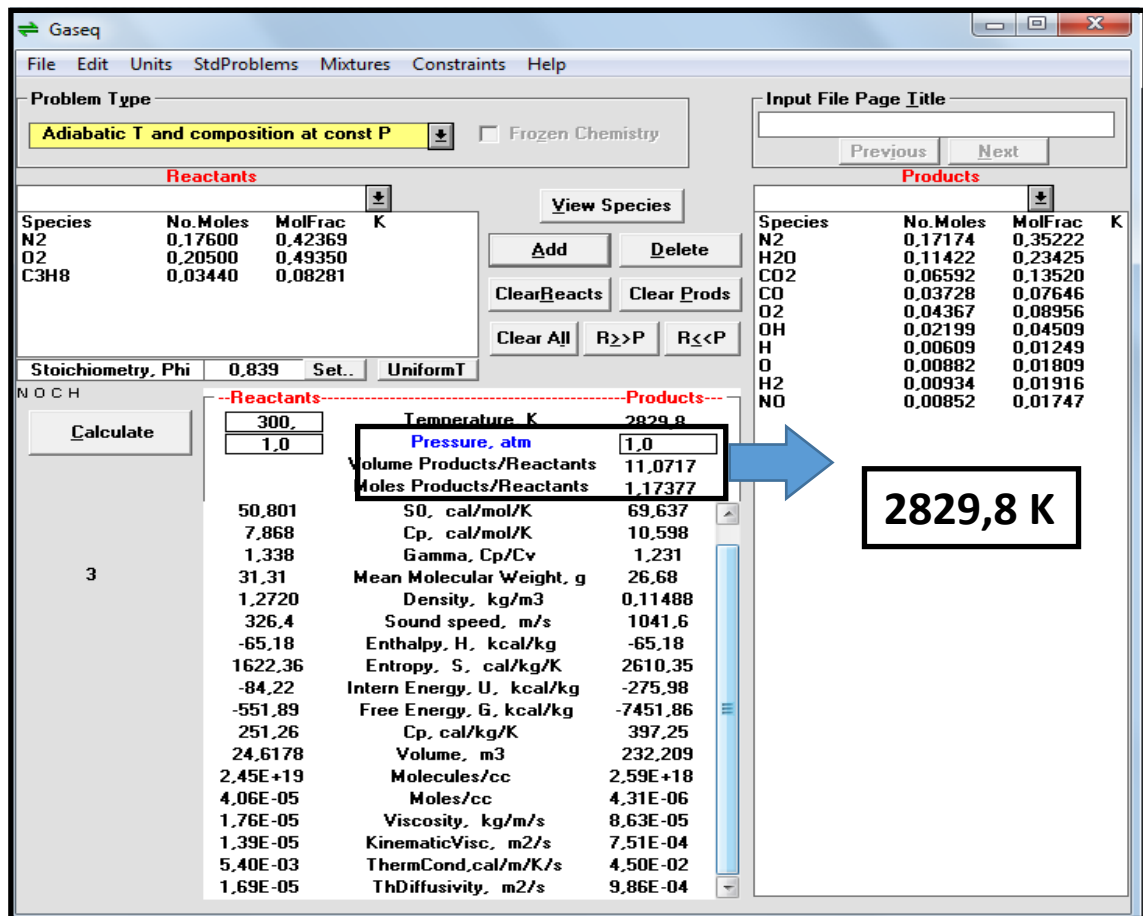
Já na chama de GLP/ O_2 /ar com $\Phi=0,83$, ou seja, pobre em combustível, representada na figura 4.7, temos valores menores de temperatura na região central com máximo de $\sim 2300K$. Para os valores nas margens da chama, ou seja, próximo ao ar ambiente temos valores aproximadamente entre $500K$ e $850 K$ para cada lado, valores estes acima da temperatura ambiente $300K$.

Figura 4.7- Chama pobre em combustível, $\Phi=0,83$, de GLP/O₂/Ar

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obteve o valor de 2829 K, representado na figura 4.8, nas mesmas condições de equivalência.

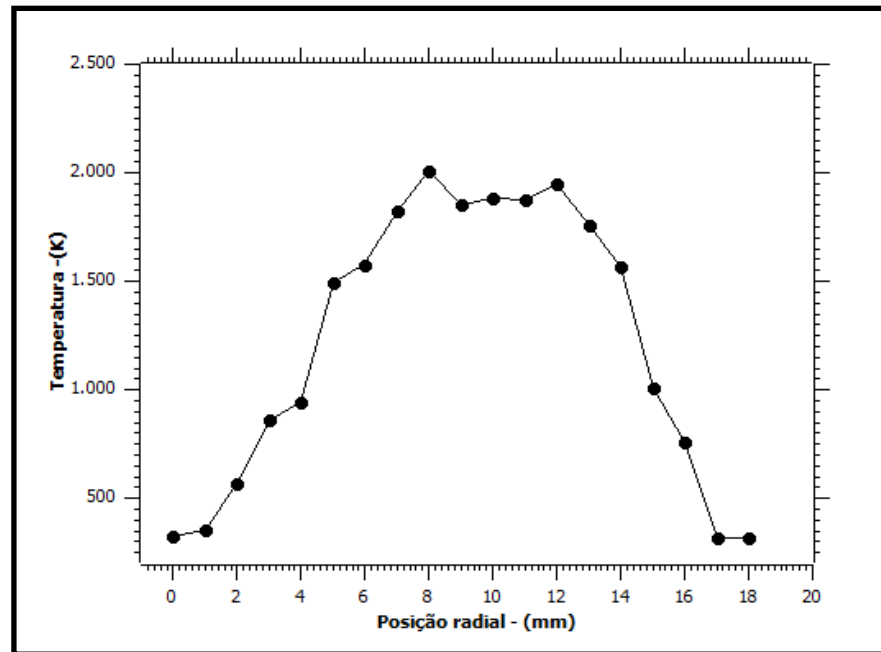
Figura 4.8– Simulação no GASEQ para $\Phi=0,83$, ($C_3H_8+O_2+ar$).



Fonte: MORLEY, 2002.

Para a chama de $GLP/O_2/Ar$, rica em combustível, representada pela figura 4.9 os valores de temperatura encontrados ao longo da chama são ainda menores, com o maior valor em 2000 K.

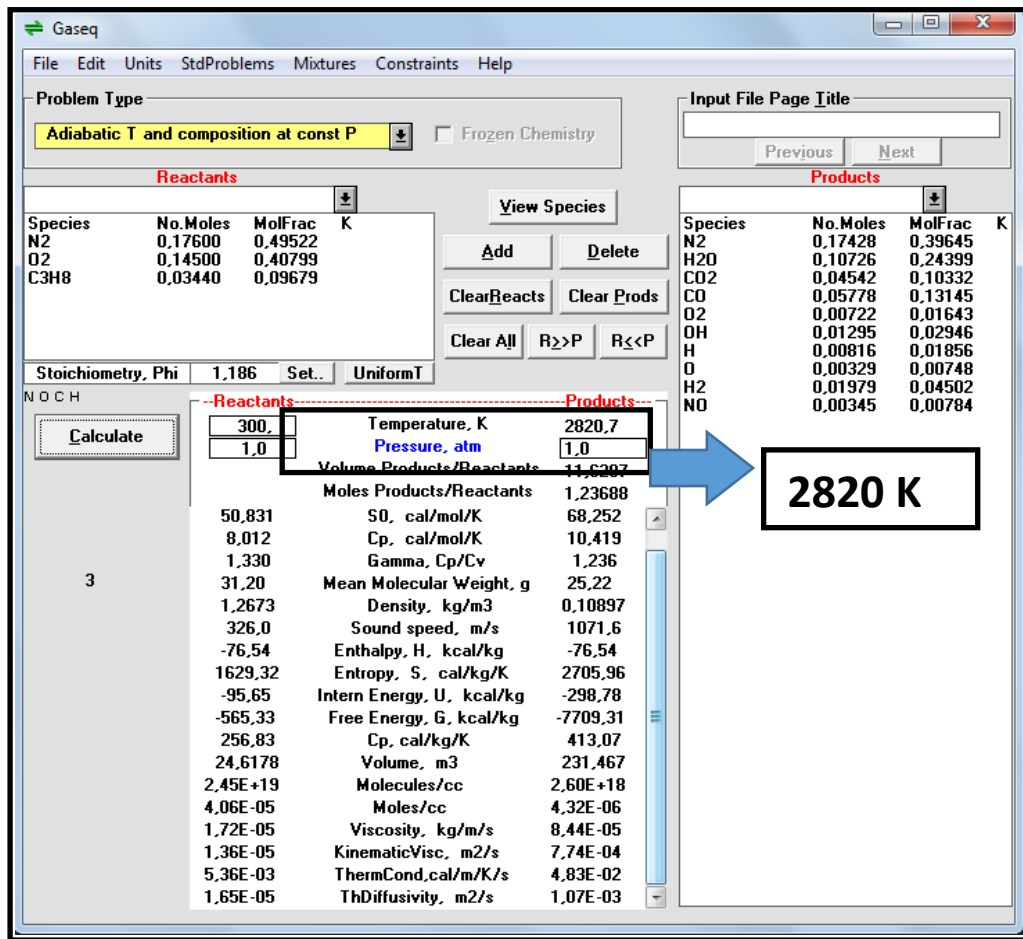
Para os valores nas margens da chama, ou seja, próximo ao ar ambiente temos valores aproximadamente entre 400K e 550 K para cada lado, valores estes acima da temperatura ambiente 300K.

Figura 4.9- Chama rica em combustível, $\Phi=1,2$, de GLP/O₂/Ar

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obteve o valor de 2820 K, representado na figura 4.10.

Figura 4.10– Simulação no GASEQ para $\Phi=1,2$, ($C_3H_8 + O_2 + ar$).

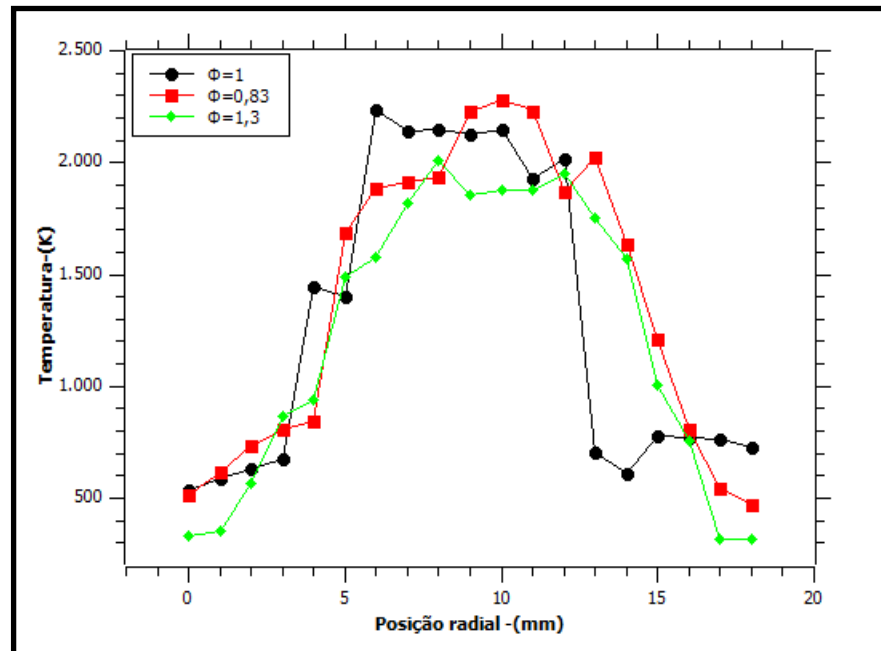


Fonte: MORLEY, 2002.

A figura 4.11 fornece o gráfico comparativo das temperaturas e suas diferentes razões de equivalência.

Ao comparar chamas em condições semelhantes, utilizando outra técnica de determinação de temperatura, verificou também resultados concordantes. Para (MATOS, 2012) uma chama estequiométrica de GLP/ O_2 /ar, obteve-se temperaturas entre 2272K e 2531K para diferentes janelas temporais. Segundo (SANTOS, 2005) as medições em chamas de GLP forneceram temperaturas entre $2441K \pm 110K$ e $2631K \pm 100K$ para uma chama estequiométrica, entre $2423K \pm 102K$ e $2622K \pm 106K$ para chama pobre e $2403K \pm 109K$ e $2605K \pm 124K$ para uma chama rica.

Figura 4.11 – Gráfico comparativo das temperaturas das chamas de GLP/O₂/ar.

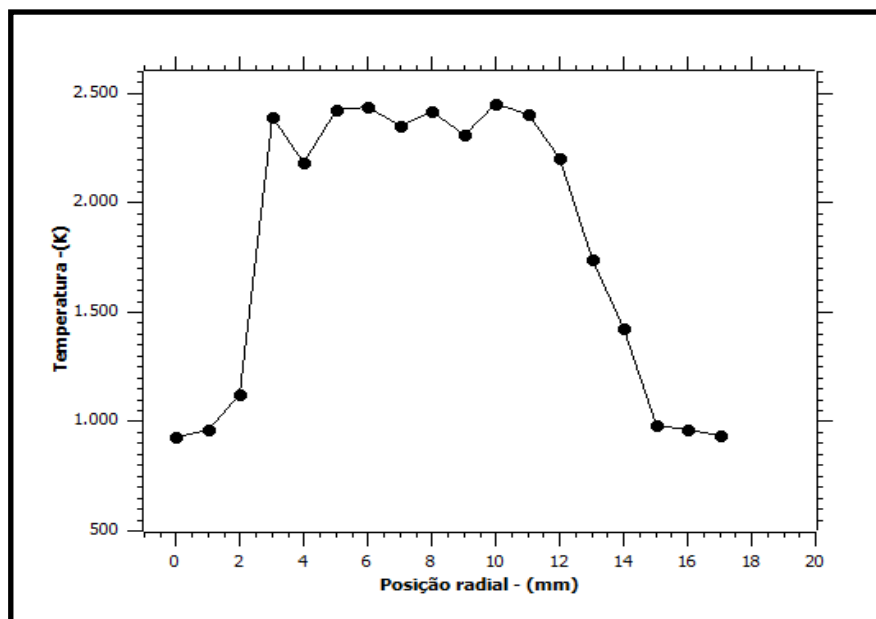


Fonte: Próprio autor.

Na figura 4.12 são observados os valores de temperatura encontrados para a chama de CH₄/ O₂/ar, estequiométrica, ou seja, $\Phi=1,0$.

Próximo as interfaces da chama os valores encontrados foram de 800K e 950K para cada lado, valores estes acima da temperatura ambiente 300K.

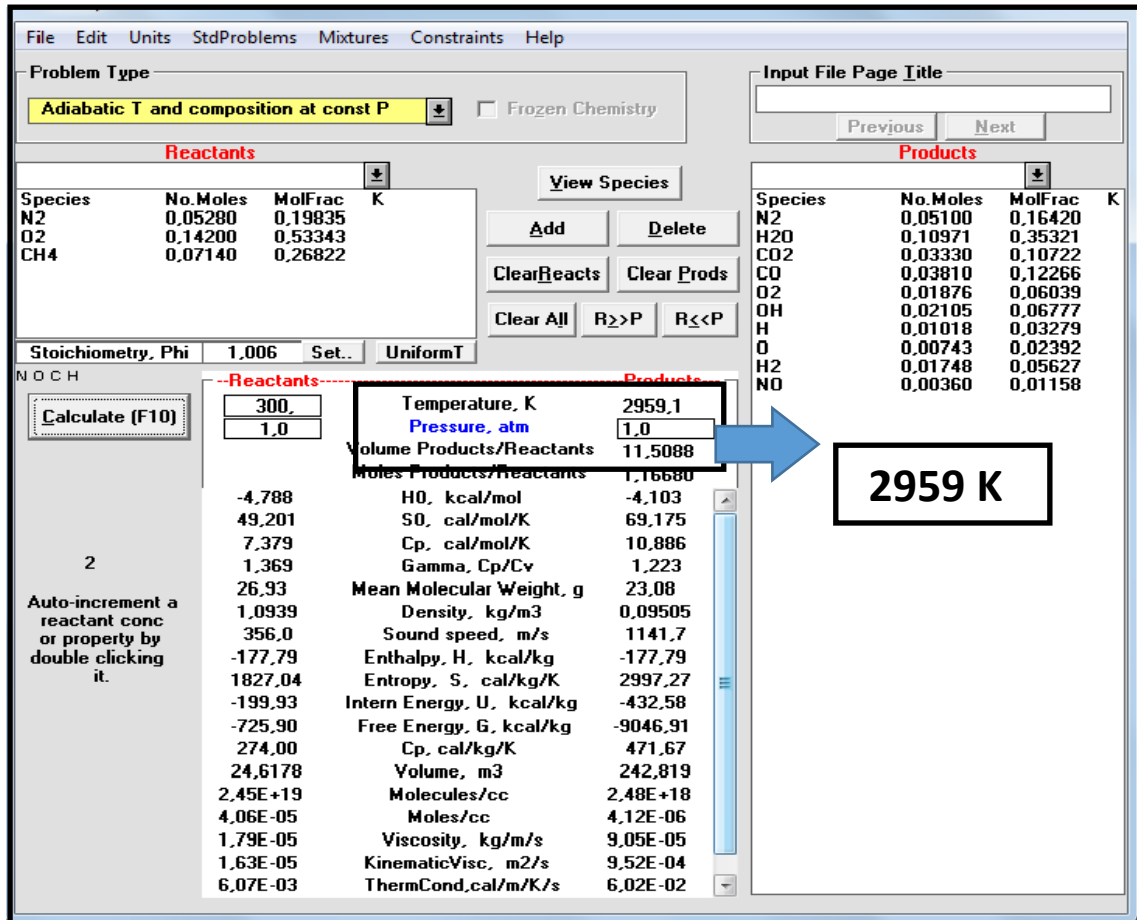
Figura 4.12- Chama estequiométrica, $\Phi=1,0$, de CH₄/O₂/Ar.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obteve o valor de 2959 K, representado na figura 4.13 e uma temperatura experimental máxima de 2500K, representada na figura 4.12.

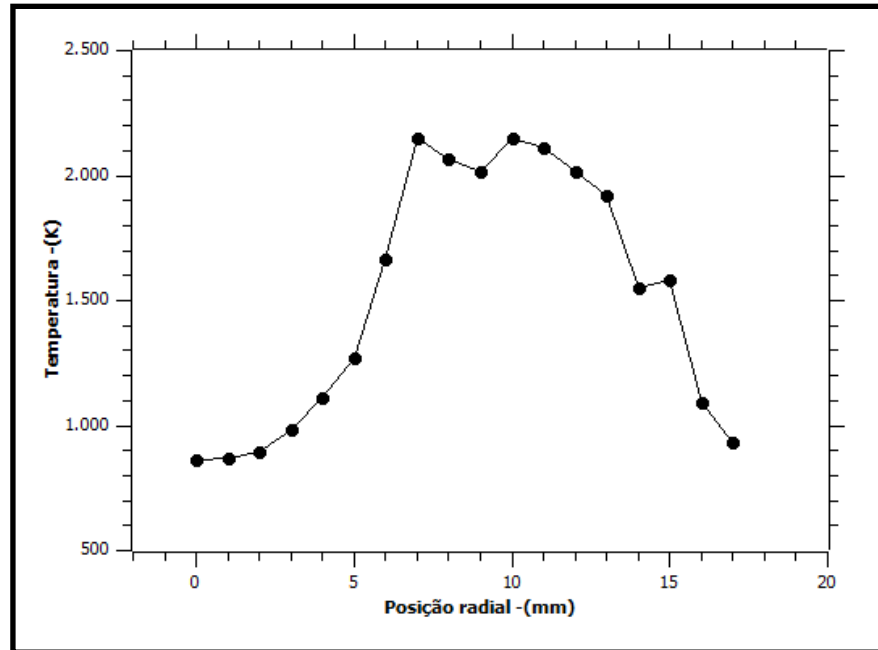
Figura 4.13– Simulação no GASEQ para $\Phi=1,0$ ($\text{CH}_4+\text{O}_2 + \text{Ar}$).



Fonte: MORLEY, 2002.

Na chama de $\text{GLP}/\text{O}_2/\text{ar}$ com $\Phi=0,83$, ou seja, pobre em combustível, representada na figura 4.14, temos valores menores de temperatura na região central com máximo de 2300K.

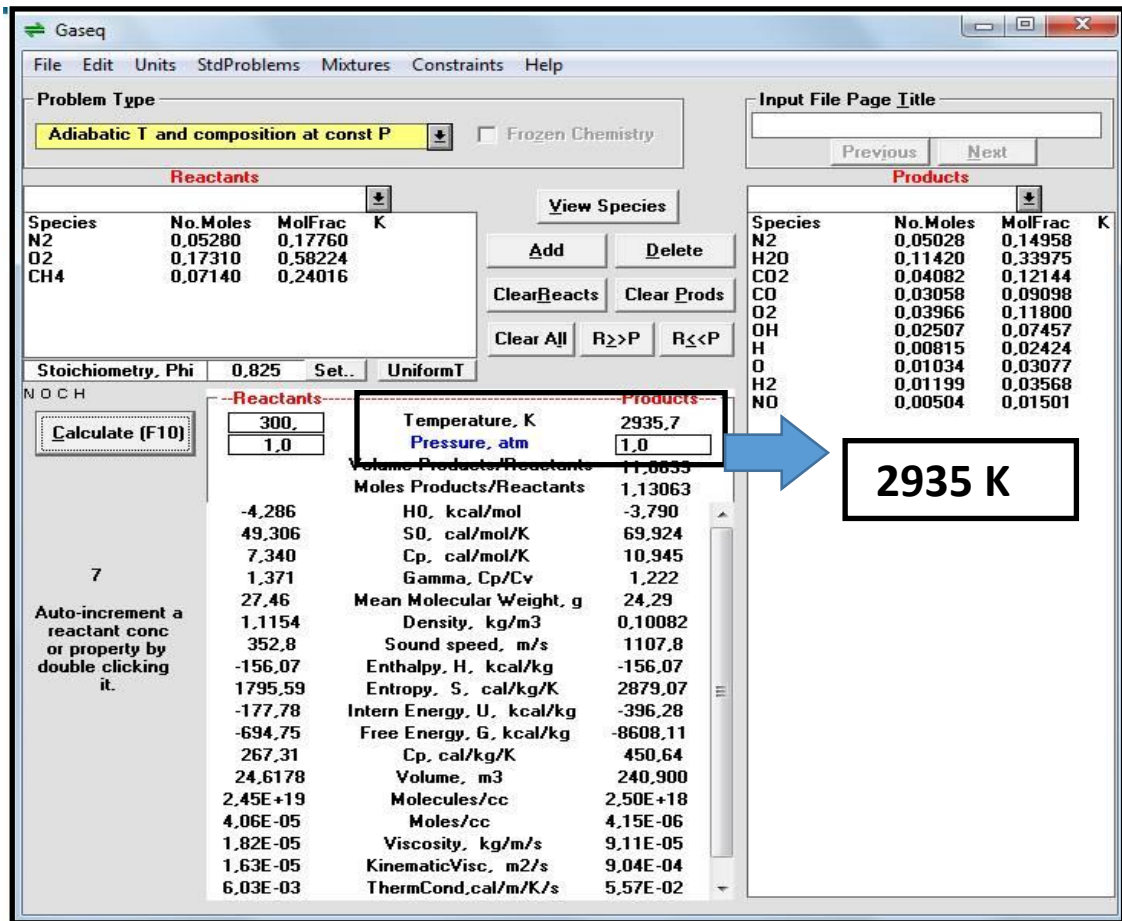
Para os valores nas margens da chama, ou seja, próximo ao ar ambiente temos valores aproximadamente entre 800K e 950 K para cada lado, valores estes acima da temperatura ambiente 300K.

Figura 4.14- Chama pobre em combustível, $\Phi=0,83$, de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$.

Fonte: Próprio autor.

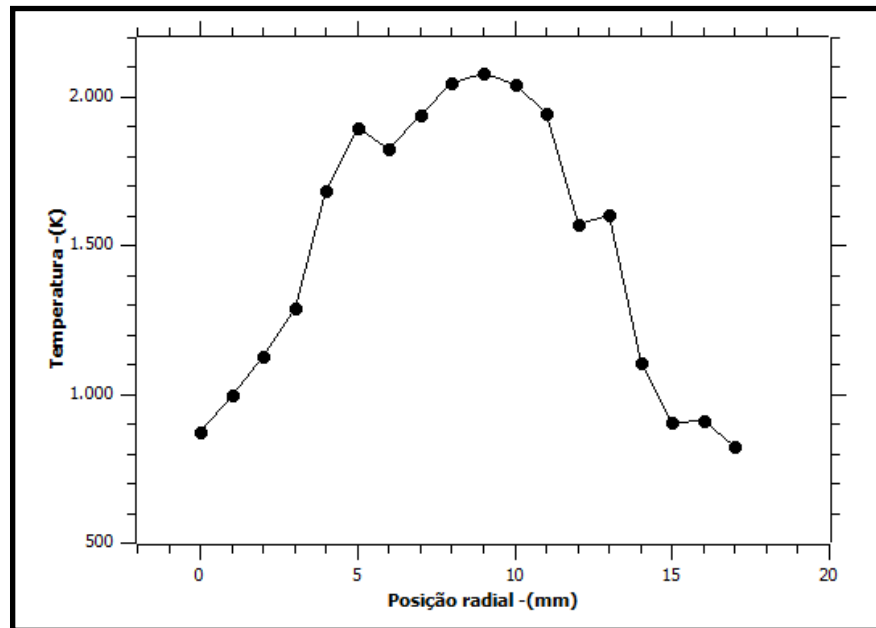
Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obteve o valor de 2935 K, representado na figura 4.15.

Figura 4.15– Simulação no GASEQ, $\Phi=0,83$ para $(\text{CH}_4+\text{O}_2 + \text{Ar})$.



Fonte: MORLEY, 2002.

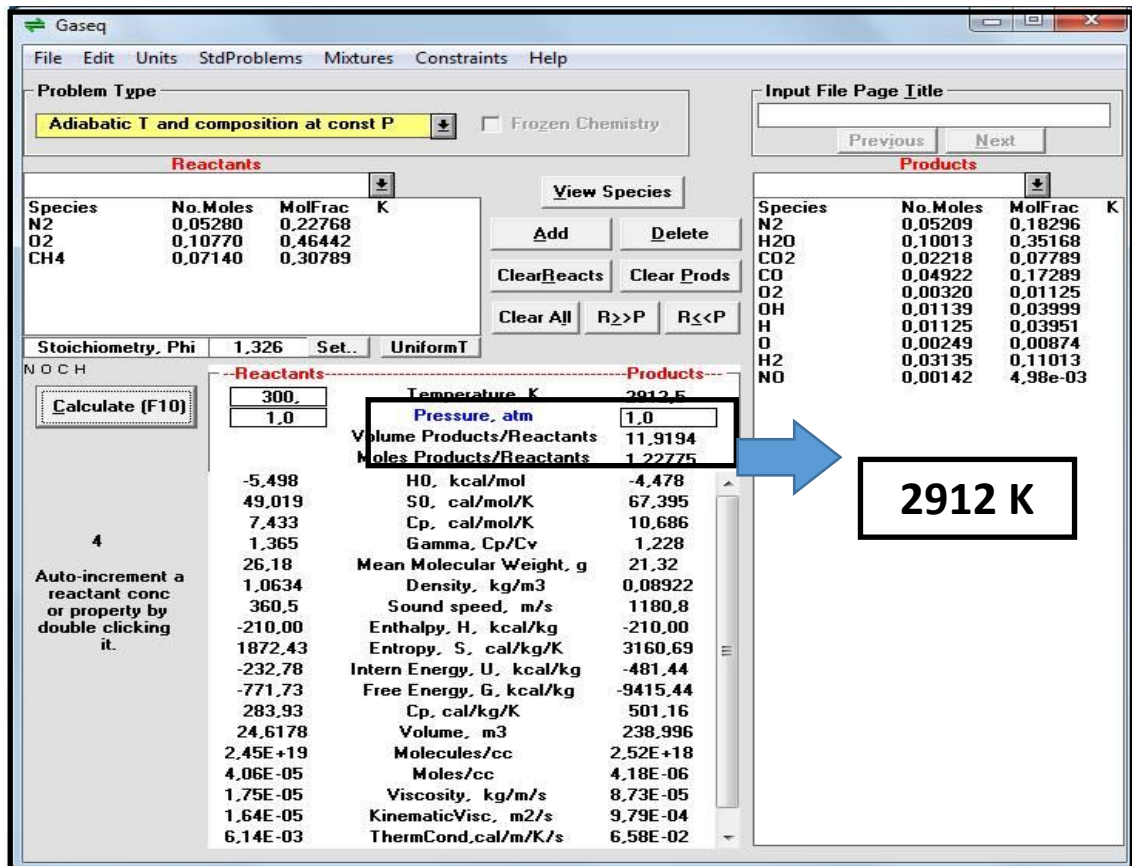
Para a chama de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$, rica em combustível, representada pela figura 4.16 os valores de temperatura encontrados ao longo da chama são ainda menores, com o maior valor em 2200 K.

Figura 4.16- Chama rica em combustível, $\Phi=1,3$, de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o GASEQ (Chemical equilibria in Perfect gases) versão 0.79, obtive o valor de 2912 K, representado na figura 4.17.

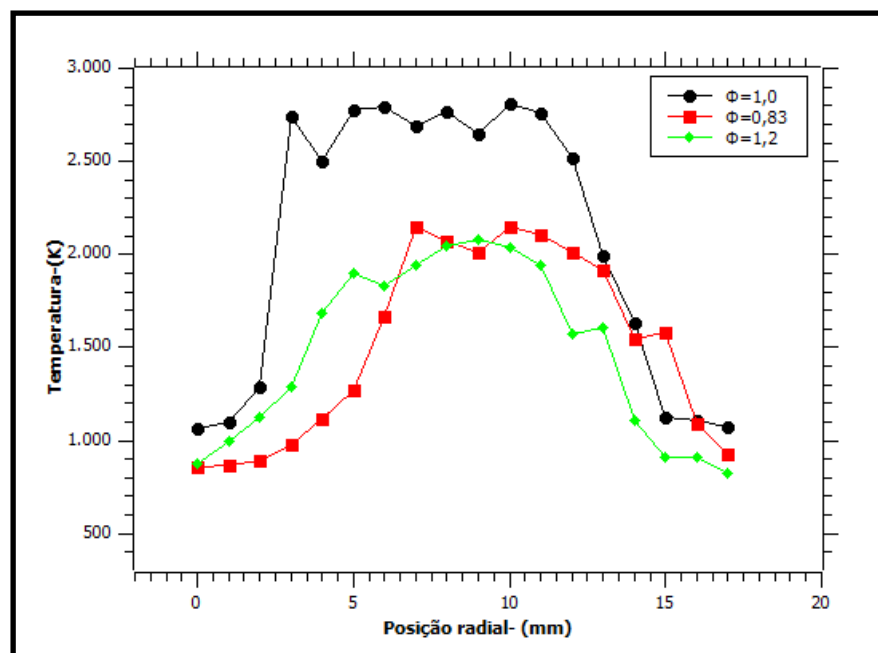
Figura 4.17– Simulação no GASEQ para $\Phi=1,3$, ($\text{CH}_4+\text{O}_2 + \text{Ar}$) (MORLEY, 2002)



Fonte: MORLEY, 2002.

A figura 4.18 mostra o gráfico comparativo das diferentes chamas de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$ e suas temperaturas.

Figura 4.18 – Gráfico comparativo das temperaturas das chamas de $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{ar}$.



Fonte: Próprio autor.

Os valores próximos a interface (ar-ambiente) para as diferentes chamas de GLP/O₂/ar ficaram acima do valor ambiente de 300K, assim como para as chamas de CH₄/O₂/ar. Sendo a chama de metano mais difícil de visualizar, pois ela é um pouco transparente, foi preciso aumentar sua vazão 3 vezes comparada a vazão do GLP, aparentemente a chama de CH₄ ficou um pouco mais alargada, porém com uma menor altura. Por isso é esperado valores maiores nessa região para as chamas de CH₄.

Além disso a influência da radiação na chama e a condução de calor nessa região, por conta do calor ainda presente, contribuem para esses valores mais altos, tanto para a mistura de CH₄/O₂/ar quanto para a mistura GLP/O₂/ar.

Em análise as chama pobre em combustível, para as misturas de CH₄/O₂/ar e a mistura GLP/O₂/ar.

Para a chama pobre em combustível, a temperatura é mais baixa, pois parte da energia é liberada e utilizada para aquecer o oxidante que está em excesso (SANTOS,2005).

Em análise as chamas rica de combustível, para as misturas de CH₄/O₂/ar e para a mistura GLP/O₂/ar, tem-se temperaturas menores ainda. Para este tipo de sistema temos menos oxidante para a reação, e as menores taxas de reação, o que resulta em temperaturas menores. Também nos processos com deficiência de oxidante, parte das reações exotérmicas, como a de conversão de CO em CO₂ não ocorre e menos energia é liberada (SANTOS, 2005).

Os valores de temperatura para as chamas de GLP/O₂/ar e para CH₄/O₂/ar apresentaram uma boa correspondência comparada aos valores fornecidos pelo GASEQ.

Espera-se valores menores para temperatura experimental, pois há perda de energia em um sistema real.

Porém as chamas pobre e rica de CH₄/O₂/ar ficaram abaixo do esperado, ocorrendo uma perda de temperatura de 21% e 29% respectivamente. Para o mesmo sistema de uma chama de GLP ocorreram perdas de 18% e 24%, nos valores de temperatura.

Os principais interferentes são a presença de luzes espúrias (ruídos) do ambiente e o alinhamento, que refletem uma interferência direta na obtenção dos dados. E as medidas das chamas pobre e rica em combustível de CH₄ foram feitas no mesmo dia.

5. CONCLUSÃO

A técnica de espalhamento Rayleigh mostrou-se como uma técnica adequada para determinação da temperatura de um sistema de combustão. Além disso a técnica de espalhamento Rayleigh é vantajosa economicamente comparada ao LIF e ao PLIF, que também permitem a determinação da temperatura.

Os valores para as chamas de GLP/O₂/ar adiabática calculadas para os sistemas analisados foram de 2844K, 2829K e 2820K para as chamas estequiométricas, pobres e ricas, respectivamente. Para as chamas calculadas experimentalmente os valores de temperatura máxima foram de 2400K, 2200K e 2000K estequiométrica, pobre e rica, respectivamente. Estes resultados são satisfatórios, considerando que há perda de parte da energia para o sistema experimental, conseqüentemente é esperado um valor menor para a temperatura experimental.

Os valores para as chamas de CH₄/O₂/ar adiabática calculadas para os sistemas analisados foram de 2959K, 2835K e 2912K para as chamas estequiométricas, pobres e ricas, respectivamente. Para as chamas calculadas experimentalmente os valores de temperatura máxima foram de 2800K, 2300K e 2200K estequiométrica, pobre e rica, respectivamente.

Estes resultados são satisfatórios, considerando que há perda de parte da energia, em um sistema experimental, conseqüentemente temos valores menores para a temperatura do mesmo.

Outro fato relevante do trabalho foi a verificação da influência da vazão volumétrica do comburente diretamente na obtenção do sinal Rayleigh, e conseqüentemente na determinação da temperatura da chama, por isso, observamos a diferença de temperatura nas diferentes razões estequiométricas, tanto nas chamas de GLP, quanto nas chamas de CH₄.

Nesse trabalho foi utilizado o sistema de rotâmetros como medidores, em trabalhos futuros utilizaremos medidores de vazões automáticos, pois os rotâmetros são calibradores e causam instabilizações na saída de dos produtos de combustão e a utilização de lentes antirreflexo.

A utilização dessa técnica tem como principais interferentes a presença de luzes espúrias (ruídos) do ambiente e o alinhamento, que refletem uma interferência direta na obtenção dos dados. Como o erro dos aparelhos são da ordem de 1%, estes podem ser ignorados.

REFERÊNCIAS

BARRETA, L.G. **Estudos de moléculas transientes obtidas a partir da dissociação multifônica do metanol**.1993.Tese de Doutorado- Universidade de São Paulo.

BENHACHMI, D. et al. Rayleigh Thermometry with Low-Power Laser Sources. In: THERMOPHYSICS CONFERENCE, 1983, Montreal. Journal **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 1983.

CARINHANA JUNIOR. D. **Determinação de Temperatura de Chama por Espectroscopia de Emissão**. 2005. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GAS NET. **O site do gás natural e GNV 2013**. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/gasnatural/combust_completo.asp>. Acesso em: 02 novembro 2015.

GAYDON. A. G.; WOLFHARD, H. G. **Their Structure, radiation and temperature**. 3. ed. London: Chapman and Hall, 1970.

LACAVALA, P. T. **Elementos de combustão**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Cap. 1-2, 2010.

MATOS, P. A. S. **Estudo da influência do atraso na detecção da Fluorescência Induzida por Laser sobre a Determinação da temperatura da chama**. 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia e Tecnologias Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MORLEY, C. **GASEQ Chemical Equilibria in perfect gases version 0.79**. Disponível em: <www.gaseq.co.uk/>. Acesso em: 20 março 2014.

PORTAL-ACTION, Estatcamp. **Fundamentos do Cálculo de Incerteza em Medição**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/1036-incerteza-do-tipo/>>. Acesso em: 10 out. 2014.

SANTOS, L. R. **Medições de temperatura de chamas de etanol utilizando Fluorescência Induzida por Laser**. 2005. 141f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SBAMPATO, M. E; SANTOS, L. R; BARRETA, L. G. Fluorescência Induzida por Laser (LIF) e Fluorescência Induzida por Laser Planar (PLIF). In: **Métodos Experimentais de Análise Aplicados à Combustão**. 1. ed. Papel Brasil Editora. 2010. Cap. VI, p.185-236.

SILVA, L. A. M. R. **Medição de temperatura de chama pré-misturada de GLP, Oxigênio e Ar utilizando a técnica de espalhamento Rayleigh a laser**. 2012. 112 f. Tese (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SUTTON, G.; et al. A Combustion temperature and species standard for the calibration of laser diagnostic techniques. **Journal of Combust and Flame**, v.147, p.39-48, July 2006.

APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS

Tabela A. 1- Chama de GLP/O₂/ar pobre em combustível – $\Phi=0,83$

Tabela de Dados – Chama de GLP/O₂/ar pobre em combustível – $\Phi=0,83$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
41,59	2,0	254,5	1,8	0	514,01
36,71	1,7	214,7	2,5	1	615,02
35,40	2,3	185,1	3,3	2	731,08
36,70	2,0	172,8	1,5	3	804,48
36,06	1,4	165,9	1,8	4	843,27
33,68	2,4	98,7	0,8	5	1684,44
33,94	1,2	92,1	0,7	6	1882,93
34,27	2,5	91,4	2,5	7	1915,92
34,57	0,5	91,1	0,9	8	1938,07
34,29	0,5	83,5	2,7	9	2225,85
34,95	3,2	83,0	1,5	10	2280,25
33,99	0,8	83,0	0,8	11	2232,53
32,76	1,5	91,3	2,1	12	1869,20
34,43	2,1	88,5	7,8	13	2022,92
37,69	7,1	104,7	2,1	14	1634,26
35,91	4,1	126,5	1,4	15	1208,33
41,28	1,3	177,1	0,9	16	806,08
42,42	5,2	243,2	2,1	17	545,12
51,80	3,7	285,2	4,8	18	468,87

Fonte: Próprio autor.

Tabela A. 2- Chama de GLP/O₂/ar rica em combustível – $\Phi=1,2$

Tabela de Dados – Chama de GLP/O ₂ /ar rica em combustível – $\Phi=1,2$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
33	1,4	330,2	1,3	0	328,38
24,82	0,6	303,04	2,9	1	350,70
19,443	0,7	192,18	2,2	2	564,86
17,082	0,9	130,15	2,3	3	862,96
13,377	0,6	117,15	1,2	4	940,25
12,922	1,3	78,306	0,89	5	1492,31
11,393	1,4	73,235	0,45	6	1577,78
12,988	3,4	66,586	0,22	7	1820,46
12,764	0,7	61,323	0,14	8	2009,37
10,891	0,9	63,47	1,2	9	1855,74
11,886	1,0	63,811	1,6	10	1879,11
12,972	0,71	65	0,9	11	1875,39
11,405	0,23	61,45	0,4	12	1949,71
12,965	3,9	68,558	1,4	13	1755,13
12,944	1,6	75,154	0,13	14	1568,45
12,944	1,2	109,75	1,3	15	1007,92
12,493	2,9	141,63	4,3	16	755,58
45,255	4,9	351,25	1,8	17	318,87
47,629	1,9	355,28	3,6	18	317,15

Fonte: Próprio autor.

Tabela A. 3- Chama de GLP/O₂/ar estequiométrica – $\Phi=1,0$

Tabela de Dados – Chama de GLP/O ₂ /ar estequiométrica – $\Phi=1,0$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
45,173	1,4	282,43	1,3	0	536,71
50,848	0,6	266,29	2,5	1	591,06
46,864	0,7	249,37	2,1	2	628,81
45,401	0,9	233,88	1,7	3	675,61
46,303	0,6	134,59	1,6	4	1442,32
44,598	1,3	135,37	1,6	5	1402,84
42,985	1,2	100	0,8	6	2233,42
43,894	0,8	103,4	0,8	7	2139,92
44,374	1,2	103,6	1,7	8	2150,04
45,29	1,2	105,27	2,0	9	2123,01
46,559	0,5	105,83	0,8	10	2148,41
42,108	1,9	108,09	2,3	11	1929,89
47,722	1,3	110,97	1,5	12	2013,32
46,765	1,0	226,5	1,7	13	708,48
47,69	0,5	255,19	8,7	14	613,68
56,147	0,9	220,365	6,6	15	775,42
57,69	1,4	223,52	1,3	16	767,88
58,36	0,6	225,2	2,5	17	763,24
57,52	0,7	232,658	2,1	18	727,07

Fonte: Próprio autor.

Tabela A. 4- Chama de Metano/O₂/ar pobre em combustível – $\Phi=0,83$

Tabela de Dados – Chama de Metano/O₂/ar pobre em combustível – $\Phi=0,83$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
7,278	1,6	33,779	2,5	0	861,18
7,235	1,6	33,468	2,0	1	869,98
7,3	0,8	32,779	1,7	2	895,72
7,235	0,8	30,468	2,3	3	982,31
8,3	1,7	28,779	0,78	4	1114,41
8,535	2,0	26,468	0,9	5	1272,63
8,009	1,5	21,721	1,4	6	1664,39
8,447	0,87	19,063	0,6	7	2149,78
7,98	0,94	19,019	0,7	8	2067,41
7,812	2,3	19,143	0,9	9	2014,13
7,66	1,8	18,264	1,4	10	2152,22
8,748	1,2	19,565	0,8	11	2109,84
8,679	1,1	20,011	0,7	12	2013,95
8,135	1,2	20,022	2,5	13	1919,92
7,126	1,2	21,846	0,9	14	1550,41
6,619	1,2	21,041	2,7	15	1582,45
6,884	0,5	27,804	1,5	16	1090,92
6,723	1,9	31,216	0,8	17	931,78

Fonte: Próprio autor.

Tabela A. 5- Chama de Metano/O₂/ar rica em combustível – $\Phi=1,3$

Tabela de Dados – Chama de Metano/O ₂ /ar rica em combustível – $\Phi=1,3$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
7,3	0,13	33,779	0,9	0	873,45
7,235	0,10	30,468	0,55	1	995,48
8,3	0,93	28,779	0,45	2	1129,36
8,535	1,7	26,468	0,69	3	1289,69
8,009	2,3	21,721	0,33	4	1686,70
8,447	0,78	20,63	0,34	5	1898,39
7,98	0,94	20,627	0,24	6	1828,74
7,812	0,14	19,743	0,54	7	1938,49
7,66	0,23	18,964	0,46	8	2046,01
8,748	0,86	19,865	1,2	9	2080,43
8,679	0,24	20,011	1,7	10	2040,95
8,135	0,38	20,022	0,36	11	1945,66
7,126	0,86	21,846	1,7	12	1571,20
6,619	0,46	21,041	2,3	13	1603,67
6,884	1,8	27,804	0,78	14	1105,55
6,723	1,5	32,216	0,9	15	907,23
7,356	1,0	32,688	1,4	16	913,00
7,523	0,99	35,489	0,6	17	827,01

Fonte: Próprio autor.

Tabela A. 6- Chama de Metano/O₂/ar estequiométrica– $\Phi=1,0$

Tabela de Dados – Chama de Metano/O ₂ /ar estequiométrica – $\Phi=1,0$					
Sinal fundo (0°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Sinal fundo (90°) (mV)	Desv.padrão (mV)	Distância (mm)	Temperatura (K)
7,954	0,97	21,757	1,2	0	1063,47
7,413	0,16	20,765	1,0	1	1099,39
7,354	0,27	18,757	1,7	2	1287,30
7,413	0,20	12,765	2,8	3	2742,74
7,214	0,78	13,075	0,10	4	2504,54
7,63	0,26	12,913	0,65	5	2778,56
6,829	0,13	12,091	0,49	6	2789,65
7,43	0,17	12,882	0,11	7	2692,43
6,837	0,14	12,14	8,8	8	2768,08
6,658	0,16	12,209	9,5	9	2644,41
6,994	0,14	12,218	1,2	10	2809,94
6,823	0,39	12,15	1,9	11	2755,61
7,368	0,35	13,187	0,45	12	2522,62
7,228	0,50	14,581	0,18	13	1996,34
7,876	1,0	16,88	0,14	14	1630,29
7,269	0,18	20,348	0,20	15	1122,34
7,598	0,78	20,889	1,8	16	1104,44
7,198	0,18	20,866	2,1	17	1073,98

Fonte: Próprio autor.