

Determinação de temperatura de chamas por espectroscopia de espécies quimioluminescentes

Danilo Almeida Machado

DANILO ALMEIDA MACHADO

DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE CHAMAS POR
ESPECTROSCOPIA DE ESPÉCIES QUIMIOLUMINESCENTES

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. Dermeval Carinhana Jr.
Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Yzumi Honda

Guaratinguetá
2011

M149d	Machado, Danilo Almeida Determinação de temperatura de chamas por espectroscopia de espécies quimioluminescentes / Danilo Almeida Machado – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 44 f.: il. Bibliografia: f. 42-44 Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Dermeval Carinhana Junior Coorientador: Prof. Dr. Roberto Yzumi Honda 1. Física 2. Movimento rotacional 3. Análise espectral I- Título CDU 53
-------	---

DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE CHAMAS POR
ESPECTROSCOPIA DE ESPÉCIES QUIMIOLUMINESCENTES

DANILO ALMEIDA MACHADO

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.^a. Dr.^a. Isabel Cristina de Castro Nogueira
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DERMEVAL CARINHANA JR.
Orientador/IEAv-DCTA


Prof. Dr. ROBERTO YZUMI HONDA
Co-orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO SILVA DE AMORIM
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

NASCIMENTO	01.11.1986 – CÁSSIA/MG
FILIAÇÃO	Mario Machado Filho Renisia de Almeida Machado
2007/2011	Curso de Graduação em Licenciatura em Física – Universidade Estadual Paulista

2010 MACHADO, D. A.; ARNONI, L. V.; SANTOS, A. M.; CARINHANA JR, D.. Determination of Flame Temperatures using CH* B-X Electronic Band. AIP Conference Proceedings, Estados Unidos, 2010.

2011 MACHADO, D. A.; GUIMARÃES, A. P. L.; CARINHANA JR, D.. Determinação de temperatura de chama pela emissão de atômica de sódio. In: V Seminário de Iniciação Científica e Pós Graduação do IEAv, 2011, São José dos Campos. Anais do Seminário Anual de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv, 2011. v. 3. p. 31-35.

2011 GUIMARÃES, A. P. L.; MACHADO, D. A.; SILVA, M. M.; ABE, N. M.; PASSARO, A.; CARINHANA JR, D.. Investigação do uso dos perfis de curva de Gauss e de Lorentz na determinação de temperatura de plasma de álcool. In: V Seminário de Iniciação Científica e Pós Graduação do IEAv, 2011, São José dos Campos. Anais do Seminário Anual de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv, 2011. v. 3. p. 36-41.

2009 MACHADO, D. A.; CARINHANA JUNIOR, D.. Diagnóstico de Chama por Espectroscopia de Emissão Natural. In: CIC - Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2009, São José do Rio Preto. Anais do Congresso de Iniciação Científica da UNESP.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

- 2009 MACHADO, D. A.; ARNONI, L. V.; SANTOS, A. M.; CARINHANA JR, D.; Desenvolvimento de um método de determinação de temperatura baseado na banda B-X do radical CH^* . In: III SICI (Seminário de Iniciação Científica do IEAv), 2009, São José dos Campos. Anais do Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv. São José dos Campos : Instituto de Estudos Avançados, 2009. v. 1. p. 29-30.
- 2010 MACHADO, D. A.; GUIMARAES, A. P. L.; CARINHANA JUNIOR, D.. Determinação de temperatura de chama e mapeamento do radical CH^* . In: IV Seminário de Iniciação Científica e Pós Graduação do IEAv, 2010, São José dos Campos. Anais do Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv. São José dos Campos : Instituto de Estudos Avançados, 2010. v. 2. p. 63-64.
- 2010 GUIMARAES, A. P. L.; MACHADO, D. A.; CARINHANA JUNIOR, D.. Determinação de temperatura por meio da comparação de espectros teóricos e experimentais. In: IV Seminário de Iniciação Científica e Pós Graduação do IEAv, 2010, São José dos Campos. Anais do Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv. São José dos Campos : Instituto de Estudos Avançados, 2010. v. 2. p. 57-58.

Resumos publicados em anais de congressos e apresentação de pôster

- 2011 MACHADO, D. A.; BORGES, M. M.; CARINHANA JUNIOR, D.. The use of line-reversal technique in flame temperature determination. In: Encontro de Física 2011, 2011, Foz do Iguaçu. Encontro Nacional da Física da Matéria Condensada, 2011.
- 2010 MACHADO, D. A.; ARNONI, L. V.; SANTOS, A. M.; CARINHANA JUNIOR, D.. Investigation of deactivation process in flames using natural emission spectroscopy. In: XXXIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2010, Águas de Lindóia. Anais do XXXIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2010.

Apresentação de pôster

- 2011 MACHADO, D. A.; GUIMARÃES, A. P. L.; CARINHANA JR, Desenvolvimento do método de linha reversa de sódio para aplicação em túneis de choque hipersônicos.. XXXIV Congresso Paulo Leal Ferreira (IFT-UNESP), 2011.
- 2010 MACHADO, D. A.; GUIMARÃES, A. P. L.; CARINHANA JR, Desenvolvimento de métodos de caracterização de espécies quimioluminescente.. XXXIII Congresso Paulo Leal Ferreira (IFT-UNESP), 2010.

Prêmio

- 2011 Melhor pôster apresentado no V Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). *“Determinação de temperatura de chama pela emissão de atômica de sódio”*

Dedico aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, a minha mãe Renisia por ser minha fonte de inspiração, ao meu pai Mario por muitos momentos de alegria, meus irmãos José Mario, Cleiton, Cleber e Cláudio pela amizade sincera e ao meu tio Alceu pelo apoio financeiro.

Agradeço ao meu orientador Dermeval pelos ensinamentos acadêmicos e principalmente pelos conselhos e a amizade.

Agradeço a minha namorada Paula, por seu amor e sua amizade.

Agradeço aos amigos de estudo e trabalho: Luciano (Alf), Luís (Bixão), Wilson, Fabio (Duracel), Daniel, Leandro, Andre, Tiago (Cascão), Carlos (Mineiro) e ao Carlos (CC).

Agradeço aos amigos de iniciação científica: Ana Elidia, Larissa, Leonardo e em especial a Ana Paula por seu companheirismo.

Agradeço aos professores da UNESP: Honda, Juliano, Rodrigo, Isabel, Alice, Maria Cecília, Valéria, Fernando, Algatti, Gaspar, Cornetti, Brandão, Cindra, Marcelo, Júlio, Ângelo e em especial ao professor Amorim por ter sido para mim um exemplo de professor.

Agradeço aos meus amigos da república Moradia, republica Ponto G e aos funcionários da UNESP.

Agradeço aos pesquisadores do IEAv: Cláudio, Gilberto, Esther, Osny, Alberto, Marcos, Sandro e a todos os integrantes da Divisão de Aerodinâmica e Hipersônica que de alguma forma contribuiu para minha formação.

Este trabalho contou com o apoio do CNPq através do processo nº 01.06.0968.00

Onde há verdade há verdadeiro conhecimento. O nome chit (conhecimento) é normalmente associado ao nome de Deus.

Só vê o espírito da verdade face a face, na sua universalidade e sua compenetração com todas as coisas, quem é capaz de amar, como a si mesmo, também a mais mesquinha das criaturas.

Mahatma Gandhi

MACHADO, D. A., Determinação de temperatura de chamas por espectroscopia de espécies quimioluminescentes, 2011. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Física) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Em um processo de combustão envolvendo combustíveis fósseis, ocorre a formação de espécies quimioluminescentes, com destaque para CH^* , C_2^* e OH^* , cuja emissão espontânea pode ser utilizada como ferramenta de diagnóstico. No presente trabalho foi realizado o mapeamento e determinação da temperatura rotacional da espécie CH^* em chamas produzidas em um queimador alimentado por Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Este estudo faz parte de uma etapa do projeto envolvendo a caracterização da combustão supersônica em motores “scramjets”, cujo estudo tem sido realizado em túneis de choque hipersônico no IEAv. A técnica utilizada foi a espectroscopia de emissão natural, que apresenta como principal vantagem o caráter não-intrusivo do sistema. A determinação de temperatura rotacional foi feita a partir do método de Boltzmann, cujo princípio consiste em relacionar a intensidade de emissão da espécie com a grandeza temperatura por meio de constantes espectroscópicas bem estabelecidas. Os valores de temperatura foram determinados a partir da análise das bandas eletrônicas A-X e B-X do radical CH^* . A fim de validar os resultados de temperatura de chama obtidos pela técnica de emissão natural, foi usada também o método de linha reversa de sódio. Os resultados de ambas as técnicas mostraram que a temperatura das chamas investigadas é de 2500K a 2700K.

PALAVRA-CHAVE: Temperatura Rotacional. Diagnóstico de Combustão, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

MACHADO, D. A., Determination of flame temperature spectroscopy of chemiluminescent species, 2011. 42 f. End of Course Work (Graduate Degree in Physics) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

Abstract

ABSTRACT

In a combustion process involving fossil fuels, there is the formation of species Chemiluminescent, especially CH^* , C_2^* and OH^* , whose spontaneous emission can be used as a diagnostic tool. In the present work, mapping and determination of the rotational temperature of the species CH^* produced in flames on a burner fueled by Liquefied Petroleum Gas (LPG) was carried out. This study is part of a project involving the characterization of supersonic combustion in "scramjets" engines, whose study has been conducted in the hypersonic shock tunnel IEAv laboratories. The technique used was the natural emission spectroscopy, which has as main advantage of being non-intrusive. The rotational temperature determination was made using the Boltzmann method, whose principle is to relate the emission intensity of the species to the temperature by means of spectroscopic constants established. The temperature values were determined from the analysis of electronic bands AX and BX of the radical CH^* . In order to confirm the results of flame temperatures obtained by the natural emission technique, was also used the technique of line reversal sodium. The results of both techniques showed that the temperature of the flames investigated is about 2500K a 2700K.

KEYWORDS: Rotational Temperature. Combustion Diagnostics, Liquefied Petroleum Gas (LPG).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Uma perspectiva do Túnel T3 do IEAv.	20
Figura 2. Esquema dos espectros obtidos pelo método da linha reversa.	26
Figura 3. Montagem experimental da emissão natural.....	29
Figura 4. Montagem experimental da linha reversa de sódio.....	32
Figura 5. Espectro ro-vibracional do radical CH^*	33
Figura 6. Mapeamento do radical CH^* , na banda A-X da chama $\phi=1,36$	34
Figura 7. Mapeamento do radical CH^* , na banda B-X, da chama $\phi=1,36$	34
Figura 8. Banda (A-X) picos do 14 ao 20.	35
Figura 9. Banda (B-X) picos P(6) a P(10) e Q(11) a Q(15).	36
Figura 10. Gráfico de Boltzmann de um espectro de CH, de altura de 1,9 mm acima da saída do queimador e $\phi=1,36$	37
Figura 11. Espectros obtidos pelo método de inversão de linha a) linha de emissão do sódio; b) ponto de inversão; c) linha de absorção de sódio.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composições e razões de equivalência de chamas ricas.	28
Tabela 2. Parâmetros para determinação de temperatura banda A-X.	31
Tabela 3. Parâmetros para determinação de temperatura banda B-X.	31
Tabela 4. Razões de equivalência de queima e vazões dos fluxímetros	32
Tabela 5. Temperaturas rotacionais da chama $\phi=1,36$	37
Tabela 6. Razões de queima da chama e temperatura (LRS) e GASEQ.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEAv – Instituto de Estudos Avançados

DCTA – Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

LRS – Linha Reversa de Sódio

LISTA DE SÍMBOLOS

CH^*	radical de carbono e hidrogênio no estado excitado
OH^*	radical de oxigênio e hidrogênio no estado excitado
C_2^*	radical diatômico de carbono no estado excitado
O_2	molécula de oxigênio
N_2	molécula de nitrogênio
K	Kelvin
T	temperatura (em Kelvin)
I	intensidade dos picos
$S_{J'J''}$	fator de Hönl-London
J'	nível rotacional superior
J''	nível rotacional inferior
C	constante de proporcionalidade de um sistema gráfico
$E_{J'}$	energia do nível rotacional superior
λ	comprimento de onda
I_q	intensidade das linhas do ramo Q
I_p	intensidade das linhas do ramo P
S_q	força de linha do ramo Q
S_p	força de linha do ramo P
ϕ	razão de equivalência da chama
R_{exp}	razão combustível/oxidante experimental
R_{est}	razão molar combustível/oxidante
Φ_λ	fluxo de radiação emitida em um comprimento de onda
Φ_{total}	fluxo total de radiação emitida
Φ_{ch}	fluxo de radiação emitida pela chama
Φ_{fil}	fluxo de radiação emitida pelo filamento da lâmpada
T_{ch}	temperatura da chama
T_{fil}	temperatura do filamento da lâmpada
ϵ	emissividade

α	coeficiente de absorção
h	constante de Planck
c	velocidade da luz
Ω	ângulo sólido
s	segundo
mm	milímetro
nm	nanômetro
V	volt
$NaCl$	cloreto de sódio
atm	atmosfera
$R1$	ramo 1 da banda (A-X)
$R2$	ramo 2 da banda (A-X)

SUMÁRIO

1 – Motivação	19
1.1 – Veículos hipersônicos.....	19
1.2 – Desenvolvimentos de técnicas de diagnóstico de combustão	20
2 – Fundamentação teórica.....	21
2.1 – Primeiros estudos espectroscópicos	21
2.2 – Temperatura de chamas.....	22
2.3 – Determinação de temperatura pela técnica de emissão natural.....	23
2.3 – Determinação de temperatura pela técnica de linha reversa de sódio.....	25
3 – Metodologia.....	28
3.1 – Espectroscopia de emissão natural	28
3.2 – Linha reversa de sódio.....	31
4 - Resultados e discussão	33
4.1 - Mapeamento dos radicais.....	33
4.2 - Temperaturas calculadas com a técnica de emissão natural	35
4.3 – Temperaturas calculadas com a técnica de linha reversa de sódio	38
5. Conclusão	39
6. Referências	40

1 – Motivação

1.1 – Veículos hipersônicos

O desenvolvimento de veículos hipersônicos visa, dentre outras aplicações, estabelecer um método mais barato de se atingir as órbitas terrestres do que os existentes atualmente. Basicamente, a grande vantagem desses veículos, dentre os quais se destacam os “scramjets”, é dispensar o transporte de oxidante. Em outras palavras, o scramjet aproveita o próprio oxigênio atmosférico em sua propulsão mesmo voando em altitudes muito elevadas, onde a pressão parcial do oxigênio é muito pequena para ser utilizado como oxidante nos motores convencionais. Isso é possível somente em velocidades acima de Mach 4, situação em que o deslocamento do veículo na atmosfera gera uma onda de choque de tal forma que esta é propagada para o interior do motor. Uma vez no interior da câmara, o combustível é injetado e o contato com o ar nessas condições produz combustão supersônica, que gera empuxo e acelera o veículo [SANTOS 2008].

Os ensaios de vôos desse tipo de veículo são realizados em geral no interior de túneis de choque hipersônico. As condições de vôo são simuladas através de um fluxo hipersônico de gases sobre o modelo. Nessas condições, os testes têm duração da ordem de 10^{-6} s, possibilitando levantar informações como pressão e temperatura em altos números de Mach, além da visualização do escoamento sobre o perfil do veículo em estudo e da onda de choque formada sobre o mesmo [WEBER 1958].

No Brasil, encontram-se em operação três túneis de choque, todos localizados no Instituto de Estudos Avançados, (IEAv) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, (DCTA), em São José dos Campos [SANTOS 2008]. Em linhas gerais, eles são constituídos por três componentes básicos: uma região que contém gases em alta pressão chamada driver; uma região que contém gases em baixa pressão, driven; e a seção de testes. A produção do escoamento hipersônico ocorre pelo rompimento do conjunto de

diafragmas localizados entre as seções de alta e baixa pressão. A sessão de testes é onde está um modelo, em escala reduzida, do veículo hipersônico a ser estudado. Uma perspectiva do túnel de choque é mostrada na Figura 1.

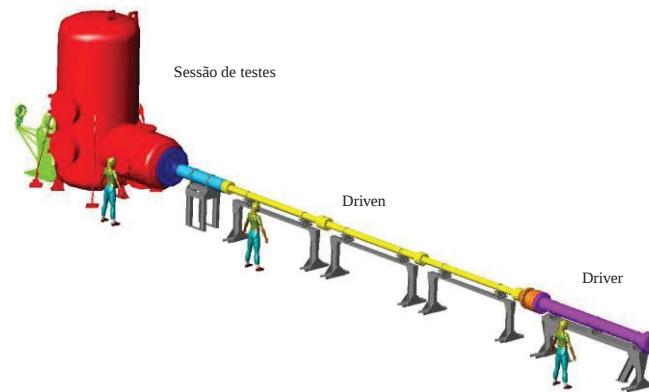


Figura 1. Uma perspectiva do Túnel T3 do IEAv.

1.2 – Desenvolvimentos de técnicas de diagnóstico de combustão

O presente trabalho visa desenvolver técnicas de diagnóstico de combustão em chamas pré-misturadas de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e oxigênio. Uma vez desenvolvidas as técnicas, elas poderão ser usadas no estudo de escoamento hipersônico em túneis de choque e na caracterização de combustão supersônica em motores scramjets.

2 – Fundamentação teórica

2.1 – Primeiros estudos espectroscópicos

Os primeiros estudos espectroscópicos se baseavam na análise da luz solar. Joseph Fraunhofer foi um dos pioneiros em estudar a luz solar com o uso de um componente ótico, mais tarde conhecido como grade de difração, que continha uma série de ranhuras capazes de difratar a luz solar. Fraunhofer descobriu que, ao passar pela grade de difração, a luz solar sofria um desvio na trajetória, cuja intensidade era diretamente proporcional ao seu comprimento de onda. A projeção da luz refratada em um anteparo resultava em um **espectro contínuo** da luz solar, em uma disposição análoga a observada na formação de um arco-íris em dias chuvosos. No entanto, ao observar cuidadosamente a luz solar difratada, Fraunhofer notou centenas de linhas escuras **discretas**, isto é, de posição espectral bem definida, como que sobrepostos ao espectro contínuo [FILGUEIRAS 1986]. Além do Sol, outras fontes de luz foram utilizadas pelos pioneiros das técnicas espectroscópicas. Ao estudar a luz emitida por objetos incandescentes, Fraunhofer observou espectros discretos em vez do espectro contínuo como o do Sol, cujas linhas correspondiam à posição espectral das linhas escuras presentes no espectro solar. Porém, foram dois outros alemães, Robert W. Bunsen e Gustav R. Kirchhoff que descobriram a origem dessas linhas. Trabalhando com a introdução de sais dissolvidos, como o cloreto de sódio, em chamas de gás, Bunsen e Kirchhoff observaram a existência de luz emitida cujo comprimento de onda era uma característica de cada espécie química. O registro dessas linhas ficou conhecido como **espectro de emissão** [LAGALANTE 1999]. No caso do sódio, a emissão mais forte era observada na região de 589 nm, que corresponde à coloração amarela. Ambos, assim, concluíram que as linhas escuras tinham origem na absorção da luz do Sol por certos elementos químicos presentes na camada de gases que envolve o planeta Terra. Estava, assim, descoberto o **espectro de absorção** da atmosfera terrestre.

Um dos ramos atuais de estudos da espectroscopia é o diagnóstico de combustão. A emissão e absorção de radiação proveniente de gases quentes oferecem diversas possibilidades de monitoramento de temperatura e estudo do equilíbrio dos gases reagentes. A maioria dos métodos de diagnóstico de combustão por espectroscopia requer o uso de *lasers*, como a fluorescência induzida por lasers (LIF) [MARQUES 2009] e espectroscopia Raman Anti-Stokes Coerente (CARS) [CLAUSS 1999]. No entanto, dada a complexidade inerente a estas técnicas, nem sempre elas podem ser aplicadas no diagnóstico da combustão [WILLIAM 1999]. Por outro lado existem técnicas, como a emissão natural de espécies quimioluminescentes e a de linha reversa de sódio que dispensam o uso de aparatos experimentais mais complexos.

2.2 – Temperatura de chamas

Em gases, o conceito comumente adotado como temperatura corresponde à energia cinética média das partículas [VINCENTI 1965]. Porém, esse conceito pode ser usado apenas em sistema em equilíbrio. Uma vez que a chama não apresenta um equilíbrio térmico, a definição de temperatura acima não pode ser usada para chamas.

No sentido estritamente termodinâmico, o conceito de temperatura somente pode ser aplicado em um estado de equilíbrio. O termo comumente designado como sendo “temperatura de um sistema” deve ser capaz de descrever as diversas propriedades de um sistema, dentre as quais estão a distribuição de velocidades de todas as partículas segundo a equação de Maxwell, a população de estados excitados segundo a equação de Boltzmann e a distribuição de radiação eletromagnética segundo a lei de Planck. A temperatura também deve ser capaz de descrever a cinética das reações químicas do sistema [REIF 1973]. Em sistemas em que essas várias formas de energia não se encontram em equilíbrio, é útil a adoção de um conceito de temperatura associado a um determinado processo em particular. Dessa forma, pode-se assumir que a **temperatura rotacional** de uma espécie presente em uma chama está associada

à distribuição de população dessa espécie ao longo dos estados rotacionais pertencentes a uma determinada banda ro-vibrônica. Analogamente, os termos temperatura vibracional e temperatura eletrônica são utilizados para descrever populações de níveis vibracionais e eletrônicos, respectivamente [GAYDON 1970].

Investigações em processos de transferência de energia em sistemas que não apresentam equilíbrio termodinâmico demonstraram que em determinados casos a temperatura rotacional se aproxima muito da temperatura cinética [REIF 1973]. Isso ocorre porque as energias translacionais e rotacionais das moléculas modificam-se rapidamente em função das condições impostas ao sistema. Desta forma, a determinação da temperatura rotacional a partir do espectro de emissão dos radicais presentes na chama pode ser considerada um bom indicativo da temperatura da mesma.

2.3 – Determinação de temperatura pela técnica de emissão natural

Os métodos convencionais de determinação de temperaturas de chamas, como termopares, são limitados para temperaturas até cerca de 2000 K. Acima desse valor, os materiais atualmente disponíveis sofrem processos de oxidação que impedem a obtenção de medições confiáveis. Nessas situações, métodos não-intrusivos, como a análise espectral da radiação emitida pelo sistema, têm sido empregados como uma alternativa viável [LUQUE 1996].

A **espectroscopia de emissão natural** é uma técnica não-intrusiva que possui a vantagem de requerer dispositivos experimentais relativamente simples. Uma vez que as espécies são formadas diretamente no estado excitado, processo esse conhecido por quimiluminescência, basta a coleta de radiação e registro do espectro de emissão dessas espécies [CARINHANA 2006].

Em princípio, pode-se determinar a temperatura rotacional a partir da distribuição dos estados rotacionais de qualquer espécie presente no sistema. Isso é comumente feito através do método conhecido por **Gráficos de Boltzmann**, que consiste em determinar o parâmetro temperatura (T) a partir das medições da

intensidade dos picos (I) do espectro de emissão da espécie. A relação entre ambas as grandezas pode ser descrita segundo uma equação do tipo Boltzmann, Equação 1,

$$\ln\left(\frac{I\lambda^4}{S_{J'J''}}\right) = \frac{-E_{J'}}{kT} + \ln C \quad (1)$$

em que k é a constante de Boltzmann, I intensidade de emissão, T temperatura rotacional, $S_{J'J''}$ é o fator de Hönl-London correspondente à transição entre o nível rotacional superior (J') e o inferior (J''), que diz respeito às forças relativas de linha dentro de um mesmo ramo; C uma constante de proporcionalidade de mesmo valor para todas as transições de um mesmo ramo; $E_{J'}$ a energia do nível rotacional superior; λ o comprimento de onda associado à transição. Segundo a Equação 1, o gráfico do logaritmo neperiano do termo de intensidade em função do termo de energia é uma reta com coeficiente angular cujo inverso é a temperatura rotacional da espécie. Portanto, para se determinar a temperatura segundo esse método, basta a aquisição de um espectro cuja resolução espectral permita a identificação das linhas rotacionais pertencentes a uma determinada transição vibracional.

Um exemplo típico da aplicação da espectroscopia de emissão para a determinação de temperatura consiste nas chamas pré-misturadas e estacionárias. Neste tipo de chama ocorre a formação de duas regiões bem distintas, sendo a parte inferior da chama conhecida como cone interno. As emissões naturais das espécies C_2^* , CH^* e OH^* ocorrem predominantemente nessa região. A outra região da chama é o cone externo, cuja combustão é em parte originada do oxigênio presente na vizinhança da chama [CARINHANA 2006].

A temperatura de uma chama está diretamente relacionada com a proporção combustível/oxidante. Assim, a estabilidade de uma chama pré-misturada depende da **razão de equivalência da chama, (ϕ)**, dada pela Equação 2,

$$\phi = \frac{R_{exp}}{R_{est}} \quad (2)$$

em que R_{exp} é a (razão combustível)/(oxidante experimental) e R_{est} é a (razão molar combustível)/(oxidante para a reação estequiométrica). As chamas podem ser classificadas em chamas ricas ($\phi > 1$), chamas estequiométricas ($\phi = 1$) e chamas pobres ($\phi < 1$).

2.3 – Determinação de temperatura pela técnica de linha reversa de sódio

A **linha reversa de sódio** (LRS) é uma técnica simples, que tem sido amplamente utilizada na determinação de temperatura em plasmas [PHILIP 1993], em motores de combustão sólida de foguetes [YANG 2001] e em túneis de choque hipersônicos [GAYDON 1963].

A temperatura da chama é obtida pela comparação entre o espectro de emissão do sódio superposto ao espectro de um filamento incandescente de temperatura conhecida, por meio da lei de radiação de Planck, que relaciona a intensidade de emissão com a temperatura do sistema, segundo a Equação 3.

$$I_{\lambda} = \frac{2hc^2}{n^2\lambda^5} \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{hc}{n\lambda kT}\right) - 1\right]} \quad (3)$$

em que n é o número de emissores, h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, k é a constante de Boltzmann, λ é o comprimento de onda da radiação e T é a temperatura absoluta dada em (K) da fonte radiante.

A comparação entre as emissões só é possível na hipótese de ambas apresentarem o mesmo ângulo sólido com respeito ao elemento de detecção. O fluxo de radiação em função do ângulo sólido, em um dado comprimento de onda (Φ_{λ}), é dado pela Equação 4, em que ε_{λ} é emissividade em função do comprimento de onda, I_{λ} é a intensidade de emissão e Ω é o ângulo sólido:

$$\Phi_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} I_{\lambda} \Omega \quad (4)$$

Uma vez ajustados os ângulos sólidos da lâmpada e da chama, a determinação de temperatura através do método de linha reversa de sódio é fundamentada na lei de Kirchhoff [GAYDON 1965], cujo enunciado diz que um gás em equilíbrio termodinâmico possui o valor de emissividade (ϵ) igual ao seu coeficiente de absorção (α). O fluxo total (Φ_{Total}) emitido pela lâmpada e pela chama pode ser expresso por:

$$\Phi_{\text{Total}} = \Phi_{\text{ch}}(\lambda, T_{\text{ch}}) + (1 - \alpha_{\lambda})\Phi_{\text{fil}}(\lambda, T_{\text{fil}}) \quad (5)$$

onde Φ_{ch} é o fluxo de emissão da chama e Φ_{fil} é o fluxo de emissão contínuo da radiação do filamento.

De acordo com as considerações anteriores, na situação em que ambos os valores sejam funções exclusivas da temperatura, têm-se as relações entre essa grandeza e os respectivos valores de Φ , expressos na Figura 2 abaixo [CARINHANA 2006].

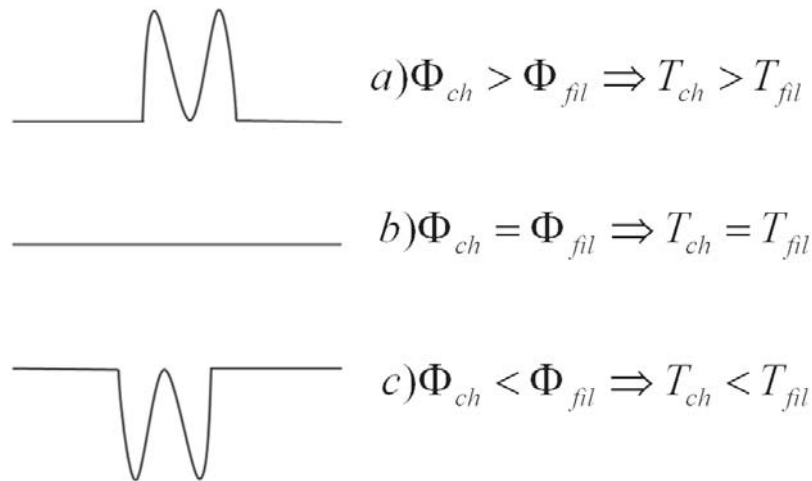


Figura 2. Esquema dos espectros obtidos pelo método da linha reversa.

Ao invés de se utilizar a emissão natural dos radicais excitados formados durante o processo de combustão, em geral as chamas são semeadas com de sais de sódio ou ferro. Esse procedimento visa dois objetivos: garantir uma emissão intensa e homogênea por toda a chama, ao contrário dos radicais, cuja distribuição é irregular e, segundo, dispor-se de uma linha estreita de emissão

atômica, facilitando, assim, o processo de comparação entre as intensidades. Assim, no caso da temperatura da chama estar acima da temperatura da lâmpada, o espectro de emissão do conjunto lâmpada/chama apresentará um pico de emissão do átomo-semente superposto à emissão contínua da lâmpada, conforme a Figura 2 “a”. No outro extremo, se a temperatura da lâmpada for maior, um vale será observado no comprimento de onda correspondente à emissão atômica item “c”. O ponto de inversão, isto é, o limiar onde a emissão discreta torna-se indistinguível em meio a emissão contínua, corresponde à situação em que ambas as temperaturas se igualam item “b”. Em termos práticos, isso é feito por meio da variação corrente elétrica de alimentação da lâmpada.

3 – Metodologia

3.1 – Espectroscopia de emissão natural

O queimador usado no experimento foi desenvolvido no IEAv. O combustível utilizado foi o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), enquanto o comburente foi o O_2 . A esse último foi adicionado N_2 a fim de se manter a estabilidade da combustão. Para o cálculo de ϕ , considerou-se a composição do GLP como sendo uma mistura equimolar de Propano/Butano. A alimentação do queimador foi controlada através de fluxímetros calibrados através de um calibrador primário por deslocamento de bolha, também conhecido por Bolhometro. Ao todo, foram calibrados dez fluxímetros, dentre os quais foram escolhidos três. A escolha foi efetuada com base nas suas faixas de vazões de trabalho que melhor se adequassem às vazões requeridas para a configuração das chamas de GLP.

Para a escolha das chamas investigadas nesse trabalho, foram analisadas várias composições diferentes de chamas. Os parâmetros básicos foram o valor de ϕ , que variou de 1,40 a 2,10. Na Tabela 1 são mostradas as configurações das chamas ricas ($\phi > 1$).

Tabela 1. Composições e razões de equivalência de chamas ricas.

Chama Rica	GLP mmol/min	Oxigênio mmol/min	ϕ
1	7,14	19,6	2,10
2	9,38	52,2	1,33
3	12,1	52,2	1,36
4	14,3	65,8	1,25
5	15,6	59,6	1,51
6	16,1	65,8	1,40

Em algumas misturas analisadas, foram observados problemas como flutuação nas vazões de gases e instabilidade dos fluxímetros. Esta flutuação causava o descolamento da chama, inviabilizando a aquisição dos espectros. Em

todas as chamas, a vazão de nitrogênio foi fixada em 27,0 mmol/min, a fim de estabilizar a reação. A chama escolhida para estudo neste trabalho foi a de razão de queima $\phi=1,36$, pois foi a que apresenta maior estabilidade.

O sistema usado para aquisição de espectros foi o espectrômetro Ocean Optics HR 4000. Este espectrômetro possui uma grade fixa, e um arranjo de diodo como elemento detector de radiação. A coleta de radiação é feita por meio de um cabo de fibra óptica acoplado ao monocromador. Uma lente de quartzo é usada para focalizar a luz da chama no cabo de fibra óptica. A resolução espectral deste equipamento é da ordem de 0,16 nm. O Esquema da montagem experimental está representado na Figura 3.

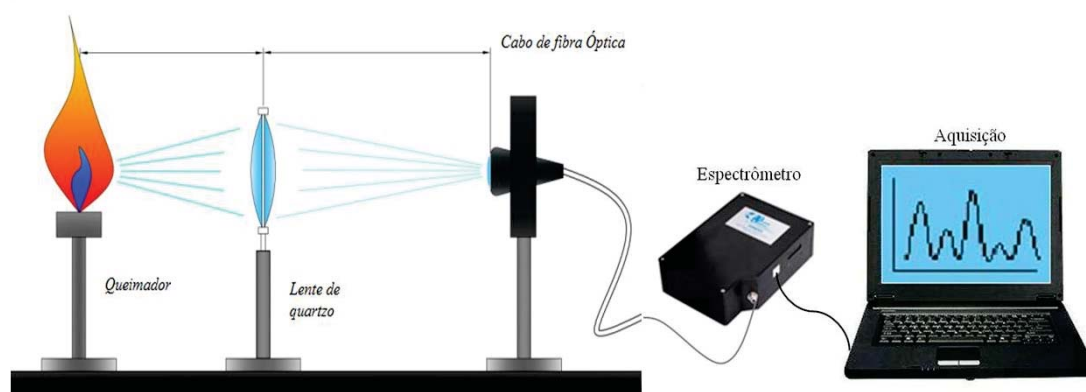


Figura 3. Montagem experimental da emissão natural

O radical usado para o mapeamento foi o CH^* . Os espectros foram obtidos em oito alturas em relação à saída do queimador e em cada altura foram analisados nove pontos no eixo horizontal, totalizando setenta e dois pontos. Foi registrado um espectro em cada ponto, a varredura da chama foi realizada com um macaco mecânico. Com o mapeamento, foi possível obter uma distribuição relativa da espécie CH^* , cuja intensidade foi obtida a partir do cálculo da integral da área do espectro.

Para se determinar a temperatura a partir dos gráficos de Boltzmann, foram coletados quatro espectros de emissão em cada ponto previamente selecionado da chama. Isso possibilitou a determinação dos respectivos desvio-padrão das medidas. As temperaturas foram determinadas a partir do espectro de

emissão do radical CH^* nas regiões de 385 nm e 430 nm, que correspondem, respectivamente às transições ($\text{B}^2\Sigma\text{-X}^2\Pi$) e ($\text{A}^2\Delta\text{-X}^2\Pi$). A banda (A-X) é observada na região entre 410 e 430 nm. O cálculo da temperatura foi baseado na análise das intensidades dos picos localizados entre 418,5 e 423,0 nm. Foram investigados os ramos R1 e R2, sendo R1 o conjunto de picos de maior comprimento de onda nos dubletos. Um ramo é o conjunto de linhas ro-vibracionais, originados a partir de transições das espécies dos estados de maior energia para os de menor energia. De acordo com as características de cada um desses estados, o espectro apresenta um determinado conjunto de linhas de emissão, denominado ramo. Cada linha do ramo recebe a numeração correspondente ao valor do número quântico rotacional do nível de menor energia.

Na região de 385 a 410 nm, correspondente à banda (B-X), há a sobreposição dos ramos P e Q, o que impede a aplicação direta da equação de Boltzmann (Equação 1). Para contornar esse problema, foi introduzida uma segunda equação, correspondente à razão entre a distribuição da população dos dois ramos (Equação 7) [FURUYA 1997].

$$\frac{I_q}{I_p} = \frac{S_q}{S_p} \exp \left\{ -\frac{hc}{kT_{\text{rot}}} [F(N') - F(N' - 5)] \right\} \quad (7)$$

em que I_q e I_p correspondem à medida experimental das intensidades das linhas e S_q e S_p a força de linha para os picos dos ramos Q e P respectivamente.

A razão das intensidades dos picos foi calculada a partir de uma estimativa inicial de temperatura rotacional na Equação 7. Assim, foi possível construir um sistema de equações, formado pela soma e pela razão entre as intensidades de emissão de cada ramo. Uma vez obtidas as intensidades de cada linha, calculou-se a temperatura rotacional para cada ramo. Os valores de temperatura obtidos foram novamente introduzidos na Equação 1, até que houvesse o melhor ajuste linear do gráfico de Boltzmann.

Nas Tabelas 2 e 3 são mostrados os valores dos parâmetros usados para o cálculo da temperatura rotacional, por meio dos gráficos de Boltzmann. Em que R1 e R2 são os ramo correspondentes as linhas ro-vibracionais da banda (A-X) e RP e RQ são os ramo correspondentes as linhas ro-vibracionais da banda (B-X).

Tabela 2. Parâmetros para determinação de temperatura banda A-X.

Ramo 1				Ramo 2			
R1	$S_{j',j''}$	$E'_{\text{rot}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$	R2	$S_{j',j''}$	$E'_{\text{rot}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$
14	9,31	2899,4	422,49	14	8,74	2898,8	422,35
15	9,81	3305,5	421,87	15	9,24	3304,9	421,72
16	10,3	3735,9	421,26	16	9,74	3735,4	421,10
17	10,8	4190,1	420,66	17	10,24	4189,7	420,48
18	11,3	4667,7	420,06	18	10,74	4667,3	419,86
19	11,8	5167,9	419,47	19	11,24	5167,5	419,26
20	12,3	5690,7	418,90	20	11,74	5690	418,66
21	12,8	6248,9	418,33	21	12,24	6249,3	418,34
22	13,3	6814,9	417,78	22	12,74	6815,5	417,79

Tabela 3. Parâmetros para determinação de temperatura banda B-X.

Ramo P				Ramo Q			
RP	$S_{j',j''}$	$E'_{\text{rot}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$	RQ	$S_{j',j''}$	$E'_{\text{rot}}(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$
6	3,75	26071,8	392,11	11	12,0	27325,0	392,17
7	4,25	26221,5	392,82	12	13,0	27613,4	392,83
8	4,75	26395,4	393,59	13	14,0	27923,2	393,57
9	5,25	26593,2	394,42	14	15,0	28253,5	394,39
10	5,75	26814,3	395,30	15	16,0	28603,7	395,31

3.2 – Linha reversa de sódio

No experimento de LRS foi usado o mesmo queimador. As vazões de gases utilizados na chama estão na Tabela 4.

Tabela 4. Razões de equivalência de queima e vazões dos fluxímetros

Chama (ϕ)	GPL (mmol /min)	O ₂ (mmol /min)
0,97	40	75
1,02	30	50
1,12	55	85
1,36	30	40
1,50	50	65

Foi utilizada uma lâmpada automotiva de alimentação de corrente contínua de 12 V de filamento de tungstênio como fonte de luz, cuja intensidade foi variada por meio de uma fonte de alta tensão de corrente contínua de valor variável. Por meio do arranjo ótico mostrado na Figura 4 [GORSHKOV 1993], a radiação contínua foi passada por meio da chama e registrada por um espectrômetro compacto Ocean Optics, na faixa de 250 nm a 700 nm. A emissão de sódio no queimador foi produzida pela inserção de pequenos cristais de NaCl, que resultou na formação de uma chama com a coloração adequada para o uso da técnica.

A temperatura da lâmpada foi determinada por um pirômetro óptico de filamento.

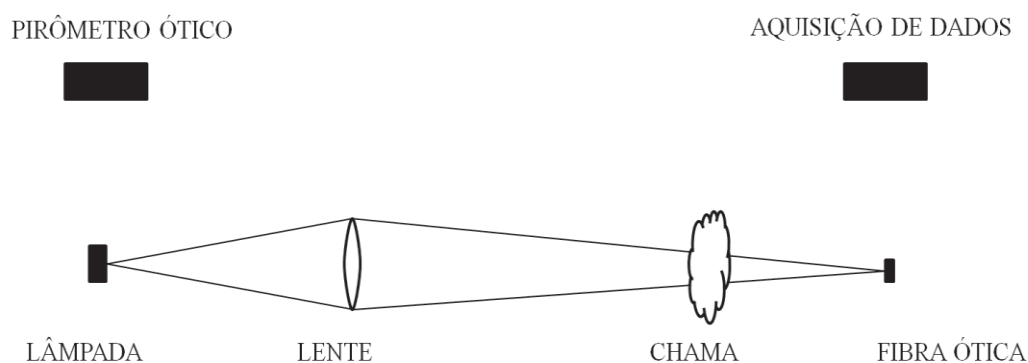


Figura 4. Montagem experimental da linha reversa de sódio

4 - Resultados e discussão

4.1 - Mapeamento dos radicais

Na Figura 5 é mostrado um espectro do radical CH^* , com suas respectivas bandas A-X e B-X.

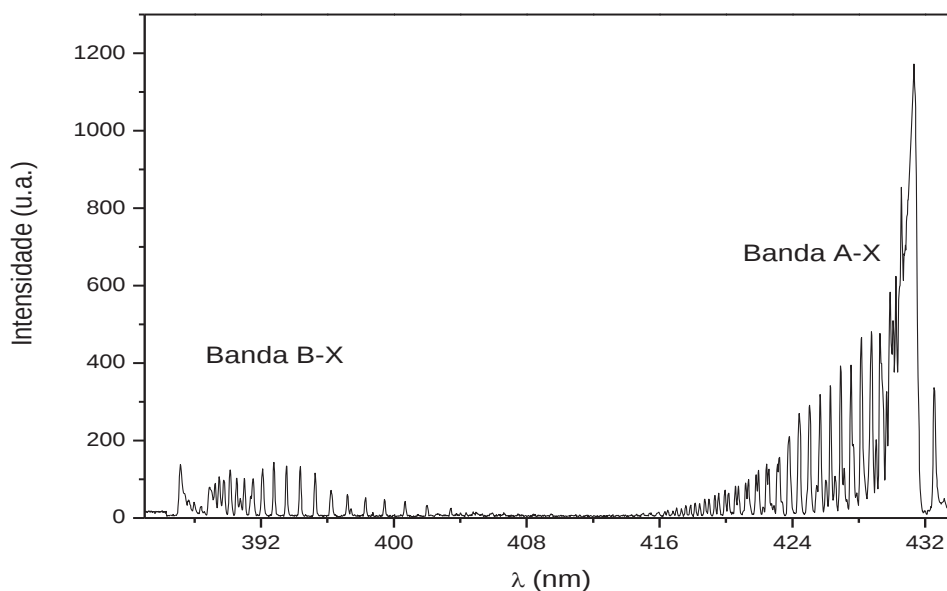


Figura 5. Espectro ro-vibracional do radical CH^* .

O mapeamento da espécie CH^* permitiu a determinação da distribuição relativa da espécie CH^* na chama investigada. A Figura 6 mostra a variação da intensidade de emissão da banda (A-X) em função da altura e do plano horizontal da chama. O eixo das abscissas representa o plano horizontal, onde o ponto zero corresponde ao centro geométrico da chama. A legenda corresponde às alturas da chama investigadas.

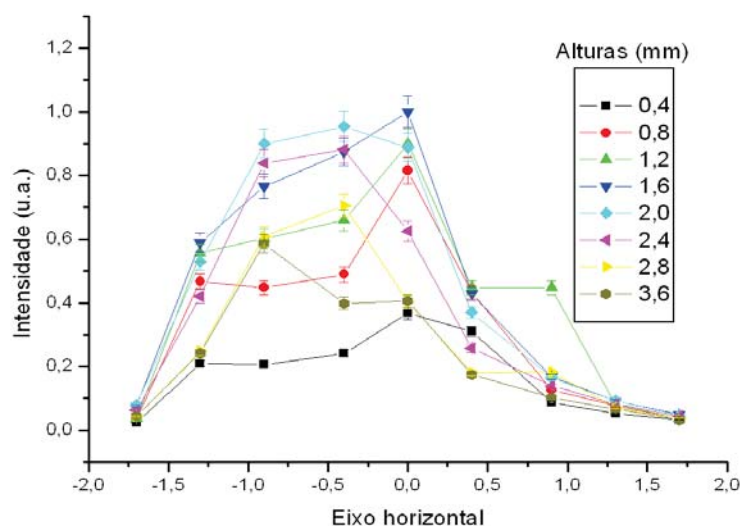


Figura 6. Mapeamento do radical CH^* , na banda A-X da chama $\phi = 1,36$.

A Figura 7 mostra o mapeamento realizado a partir da banda B-X do radical CH^* .

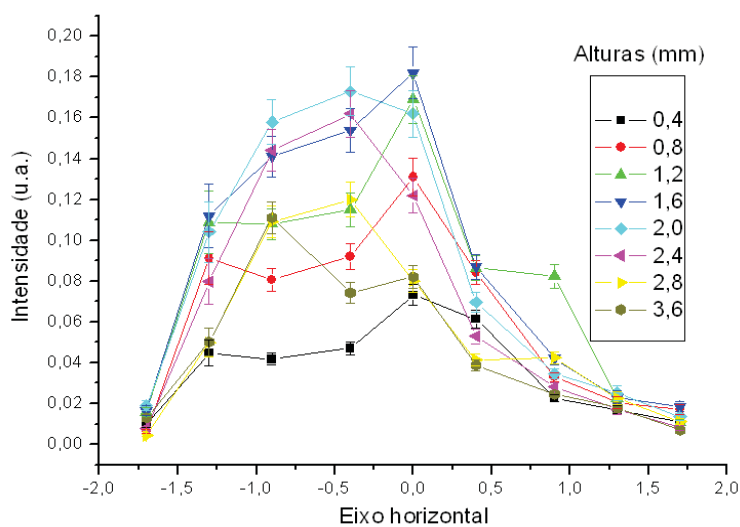


Figura 7. Mapeamento do radical CH^* , na banda B-X, da chama $\phi = 1,36$.

Observa-se que o sinal de emissão das bandas A-X e B-X possuem o mesmo perfil de distribuição, sendo que a banda A-X possui uma emissão aproximadamente seis vezes maior do que a banda B-X.

O maior sinal de emissão foi obtido na altura de 1,2 a 2,0 mm, sendo que a intensidade máxima de emissão está no intervalo de -0,5 a 0 mm no eixo

horizontal. A partir das Figuras 6 e 7 pode se observar que a distribuição do radical CH^* na chama não é simétrica. Esse fato é confirmado visualmente nas chamas investigadas, e pode ser atribuído à geometria de saída dos gases da câmara de mistura do queimador. A partir dos gráficos de distribuição, foi possível escolher as regiões de maior sinal de emissão para determinação da temperatura.

4.2 - Temperaturas calculadas com a técnica de emissão natural

Os pontos da chama escolhidos para determinação de temperatura correspondem à região de 1,9 a 3,7 mm acima do topo do queimador. A sua posição horizontal foi escolhida a partir da maior intensidade de emissão, que corresponde à região de -0,5 a 0 mm das Figuras 6 e 7.

A Figura 8 mostra a banda (A-X). Esta banda é formada por dois ramos bastante distanciados entre si, dando origem, assim, a uma série de dubletos. As intensidades escolhidas para determinação de temperatura correspondem aos picos de 14 a 20.

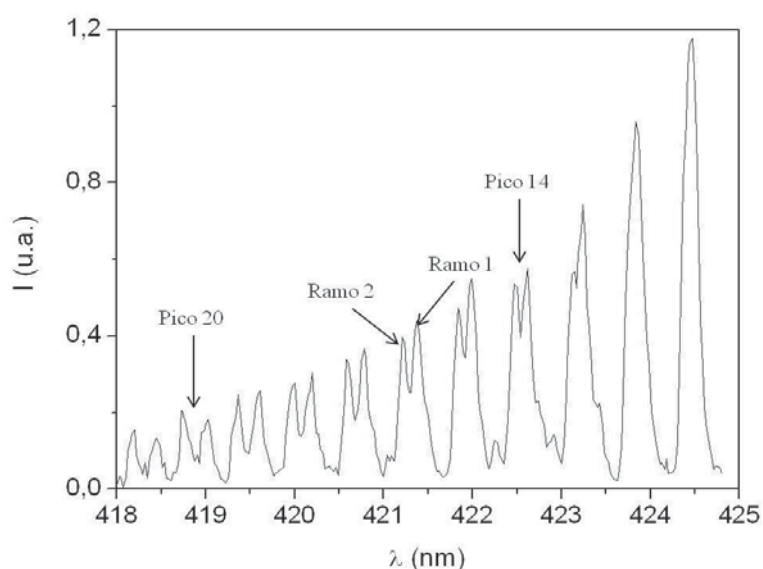


Figura 8. Banda (A-X) picos do 14 ao 20.

Para o cálculo da temperatura na banda B-X foram utilizados os ramos P e Q, que correspondem aos picos P(6) a P(10) e Q(11) a Q(15), Figura 9. Ambos os conjuntos de ramos P e Q apresentam comprimentos de onda muito próximos, de tal forma que o pico resultante no espectro corresponde à soma simples das intensidades de cada linha, o que permite a aplicação da Equação 7 para a estimativa da temperatura.

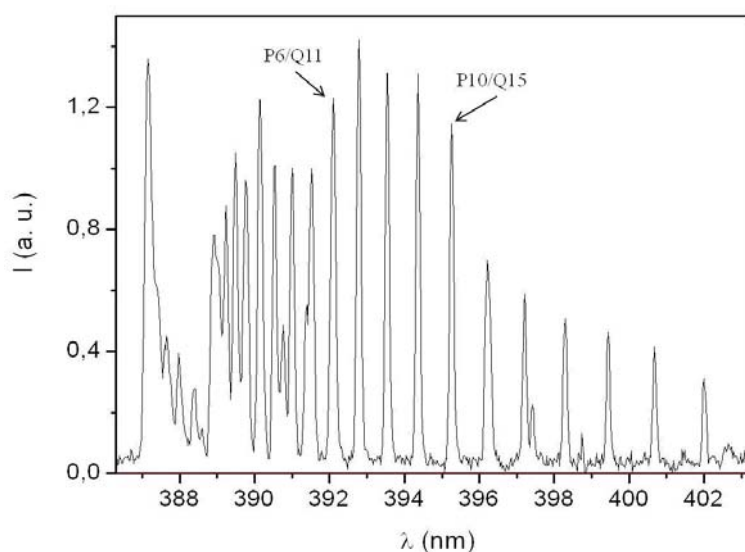


Figura 9. Banda (B-X) picos P(6) a P(10) e Q(11) a Q(15).

Na Figura 10 é mostrado um gráfico típico de Boltzmann da banda B-X. Cada ponto corresponde às intensidades experimentais, a partir das quais é calculada a inclinação da reta e, por conseguinte, a temperatura rotacional.

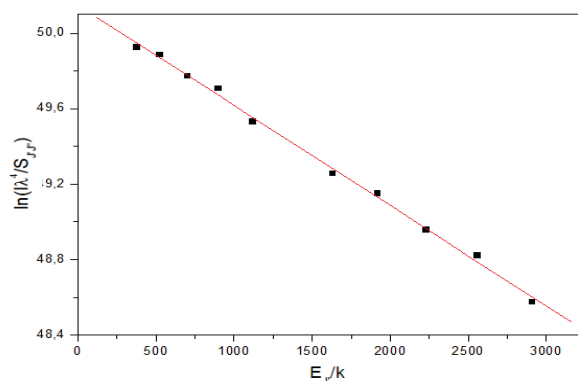


Figura 10. Gráfico de Boltzmann de um espectro de CH, de altura de 1,9 mm acima da saída do queimador e $\phi=1,36$.

A linearidade da Figura 10 indica que a população dos estados de energia rotacional dos radicais CH^* segue uma distribuição de Boltzmann. Em adição a esta constatação, pode-se inferir que, devido ao elevado acoplamento entre as energias de rotação e translação, essa distribuição pode ser utilizada na caracterização da temperatura da chama.

Os valores de temperatura rotacional determinados para o radical CH^* são mostrados na Tabela 5. Observa-se que o valor da temperatura do R1 da banda (A-X) é inferior ao do R2. Esse resultado pode ser explicado com base na diferença entre as taxas de desativação das espécies no estado excitado associadas a cada ramo [CARINHANA 2010]. Por outro lado, os valores de temperaturas calculados da banda (B-X) se aproximam dos valores encontrados no ramo 1. No caso particular da banda B-X, o método é bastante prático, sendo necessária a medição da intensidade experimental de apenas cinco picos que compõem o espectro de emissão da espécie CH^* .

Tabela 5. Temperaturas rotacionais da chama $\phi=1,36$.

Altura (mm)	Temperatura (A-X) R1 (K)	Temperatura (A-X) R2 (K)	Temperatura (B-X) (K)
1,9	2591 ± 51	2746 ± 55	2523 ± 8
2,5	2594 ± 43	2652 ± 13	2571 ± 68
3,1	2526 ± 44	2680 ± 39	2588 ± 44
3,7	2695 ± 56	2894 ± 72	2589 ± 47

4.3 – Temperaturas calculadas com a técnica de linha reversa de sódio

A Figura 11 mostra os espectros de radiação de corpo negro sobrepostos ao duplete de sódio no comprimento de onda de 589,0 e 589,6 nm obtidos em diferentes intensidades da lâmpada. Na Figura 11 “a”, pode-se observar um pico na região correspondente a emissão de sódio, o que indica que a temperatura da chama é maior que a da lâmpada, enquanto que na Figura 11 “b”, esse pico deixa de ser visível. Essa condição corresponde à situação descrita na Figura 2 (b), em que o fluxo de emissão da chama e, conseqüentemente, sua temperatura, é igual ao da lâmpada. Esse ponto é conhecido como ponto de inversão, e consiste no ponto de determinação da temperatura da chama [GREIG 1965]. À medida que se aumenta a emissão da lâmpada, Figura 11 “c”, observa-se o aparecimento de um pico de absorção do sódio, indicando que, nesse caso, a temperatura da lâmpada é maior que a da chama.

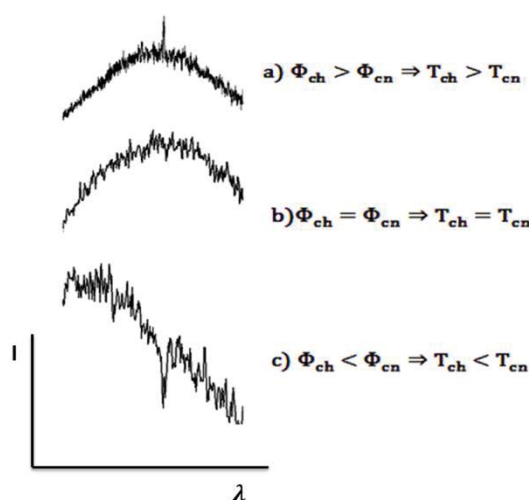


Figura 11. Espectros obtidos pelo método de inversão de linha a) linha de emissão do sódio; b) ponto de inversão; c) linha de absorção de sódio.

A Tabela 6 mostra os valores de razão de queima da chama, ϕ , os valores de temperatura obtidos pela técnica de LRS e a temperatura adiabática calculada pelo programa GASEQ [MORLEY 2011], que consiste na temperatura máxima calculada para a chama.

Tabela 6. Razões de queima da chama e temperatura (LRS) e GASEQ

Chama (ϕ)	Temperatura (K)	Temperatura Gaseq (K)
0,97	2585 ± 207	3016
1,02	2689 ± 215	2970
1,12	2532 ± 203	3041
1,36	2437 ± 195	2921
1,50	2512 ± 201	2960

Os valores de temperatura de LRS são cerca de 15% menores que os valores de temperatura adiabática, o que é consistente com os processos de dissipação de energia em um sistema como o da chama. Ao mesmo tempo, eles não apresentam diferenças significativas se comparados aos obtidos por emissão espontânea (R1 para banda (A-X) e banda (B-X)), o que demonstra a consistência entre ambas as técnicas [CARINHANA 2008]. Uma possível fonte de erro das medições está associada à quantidade de sódio presente na chama e à contribuição da emissão de sódio de regiões mais frias da chama [SAFIEH 1986].

5. Conclusão

Os resultados obtidos indicaram a possibilidade do uso da técnica de emissão natural na determinação de temperatura de sistema de combustão. A temperatura encontrada para o ramo 1 da banda (A-X) assemelha-se às temperaturas obtidas a partir da banda (B-X), *ca.* 2500 K ~ 2700 K. A vantagem do emprego do método dos gráficos de Boltzmann consiste na praticidade no uso dos dados experimentais na determinação da temperatura rotacional de uma espécie. No caso da banda (B-X), é necessária apenas a medida da intensidade experimental de cinco picos.

Em relação à técnica de linha reversa de sódio, foram obtidos os valores de temperatura média da mesma ordem que as do ramo 1 da banda (A-X) e da banda (B-X). Os valores de temperatura adiabática calculadas pelo programa GASEQ confirmaram a consistência dos resultados obtidos. Futuramente, as técnicas de emissão natural e linha reversa de sódio poderão ser usadas para determinar a temperatura de escoamentos hipersônicos em túneis de choque.

6. Referências

CARINHANA Jr., D. **Determinação de temperatura de chama por espectroscopias de emissão**. Campinas, 2006. 116p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

CARINHANA, D, JR.; BARRETA, L. G.; ROCHA C. J.; SANTOS, A. M.; BERTRAN, C. A.. Determination of Liquefied Petroleum Flame Temperatures using Emission Spectroscopy, **Journal of the Brazilian Chemical Society (Impresso)**, v.7,p. 1326-1335 2008.

CARINHANA JUNIOR, D.; BARRETA, L. G.; BERTRAN, C. A.; SANTOS, A. M.. The effect of lambda-doublet levels in ethanol flame temperature estimation. **Journal of the Brazilian Chemical Society (Impresso)**, v. 21, p. 1770-1775, 2010.

CLAUSS, W.; FABELINSKY, V.I.; KOZLOV, D.N. ; SMIRNOV, V.V. ; STELMAKH, O.M.; VERESCHAGIN, K. A. Dual-broadband CARS temperature measurements in hydrogen-oxygen atmospheric pressure flames. **Applied Physics B: Lasers and Optics**, v. 70, n. 1, 127-131, 1999.

LAGALANTE, A. F. Atomic emission Spectroscopy. **Applied Spectroscopy Reviews**. v.34 n. 3,p. 191-207, 1999.

FILGUEIRAS, A. L. C. A espectroscopia e a química: da descoberta de novos elementos ao limiar da teoria quântica. **Química nova na escola**. n. 3, p. 22-25, maio 1996.

FURUYA, K. *et al.* Rotational distributions and threshold energies of the CH(B-X) emission by controlled electron impact on methane, ethylene, and ethane. **Chemical Physics**, v. 221, n. 3, p. 303-309, 1997.

GAYDON, A.; HURLE I.R.. The shock tube in high temperature chemical physics. London: **Chapman and Hall**, 1963.

GAYDON A. G.; WOLFHARD H. G.. The Spectrum-Line Reversal Method of Measuring Flame Temperature. **Proc. Phys. Soc.** 1965.

GAYDON A. G.; WOLFHARD H. G.. “**Flames**”, p. 1, 3a ed., Londres: Chapman and Hall (1970).

GREIG, J. R.. The sodium D-line reversal method of temperature measurement in ionized flame gases. **Br. J. Appl. Phys.** v. 16, 1965.

GORSHKOV, YU.A.; VLADIMIROV V.I.. Line reversal gas flow temperature measurements: evaluations of the optical arrangements for the instrument. **Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences: IVTAN, Izhorskaya**, 1993.

LUQUE, J.; CROSLEY, D. R.. Absolute CH concentrations in low-pressure flames measured with laser-induced fluorescence. **Applied Physics B-Lasers and Optics**, v. 63, n. 1, p. 91-98, 1996.

MARQUES, C. S. T.; SANTOS, L. R. ; SBAMPATO, M. E. ; BARRETA, L. G. ; SANTOS, A. M. . Temperature Measurements by OH LIF and Chemiluminescence Kinetic Modeling for Ethanol Flames. **Química Nova (Impresso)**, v. 32, p. 2073-2077, 2009.

MORLEY, C.; GASEQ; Chemical Equilibria in Perfect Gases. <http://www.gaseq.co.uk/>, acessado em 28 de Abril de 2011.

PHILIP, T.; BAUMAN, L.; BENTON, R.. Sodium line reversal plasma temperature measurement system. Diagnostic Instrumentation and Analysis Laboratory Mississippi State University, 1993.

SANTOS A.M.; A pesquisa e desenvolvimento em hipersônica no IEAv. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 27, n. 1, 5-10, 2008.

Letters, 34 (2), 109-116 (2001).

REIF I.; FASSEL V. A.; KNISELEY R. N.. **Spectrochim. Acta** v. 28B, p.105 (1973).

VINCENTI W. G.; KRUGER E C. H. JR.. “**Introduction to Physical Gas Dynamics**”, p. 6, 1a ed., Nova Iorque: John Wiley and Sons (1965).

SAFIEH, H.Y.E.; BRANCO, R.M.. Temperatura final e energia global de ativação da chama: conceitos e medidas. **Química Nova (Impresso)**, 1986.

YANG, D.; XU, H.; WANG, J.; ZHAO, B.. Temperature Measurement of solid rocket motor exhaust plume by absorption-emission spectroscopy. **Spectroscopy**

WEBER J. R.; MACKAY J.; “An Analysis of Ramjet Engines Using Supersonic Combustion,” **NACA TN 4386** (1958).

WILLIAM, A.; DRASEK, V.; OLIVIER, C.; ROMAIN, P. R.; "Modified sodium line-reversal temperature measurements in oxy-fuel flames", **Proc. SPIE** 3535, 226 (1999).