



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO
AUTHORIZATION FOR PUBLICATION

AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY		
	EMISSIONES TEMPERATURA ROTACIONAL MESOSFERA		Ralf Gielow Presidente Conselho PG		
AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR		DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION		REVISADA POR/REVISED BY	
Paulo R. Fagundes		☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED		Hisao Takahashi	
CDU/UDC			DATA / DATE		
523.4-8			Julho 1989		
TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO		ORIGEM ORIGIN		
	INPE-4851-TDL/366		PG/DGA		
OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DAS EMISSÕES DE OI (5577), O ₂ A (0,1), NaD (5893) E OH (9,4) E AS TEMPERATURAS ROTACIONAIS TO ₂ E TOH NA ALTA ATMOSFERA		PROJETO PROJECT			
		FRH/CEA			
		Nº DE PAG. NO OF PAGES		ÚLTIMA PAG. LAST PAGE	
		132		B. 5	
		VERSÃO VERSION		Nº DE MAPAS NO OF MAPS	
AUTORES/AUTHORSHIP	Paulo Roberto Fagundes				
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES					
Medidas simultâneas de OI 5577 Å, NaD, O₂A (0,1) e OH (9,4) de luminescência atmosférica noturna na região da mesopausa têm sido feitas em Cachoeira Paulista (22.7°S, 45.0°W) desde 1983. Todas estas emissões envolvem o oxigênio atômico e têm origem numa faixa de 15-20 km centro da altura de 90 km. Ambas as medidas de O₂ e OH são usadas para estudar a temperatura rotacional TO₂ e TOH. As variações temporais das intensidades e das temperaturas rotacionais constituem uma importante técnica para estudar a fotoquímica e a dinâmica da mesosfera; uma análise de correlação cruzada entre as intensidades e as temperaturas rotacionais nos permite avaliar a resposta dos constituintes minoritários (O, Na e OH) quando a mesosfera é perturbada. Os dados analisados correspondem ao período de janeiro/87 a janeiro/88, e pode-se verificar que as temperaturas rotacionais respondem mais rápido que as emissões à passagem de uma perturbação.					
OBSERVAÇÕES / REMARKS					
Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial aprovada em setembro de 1988.					

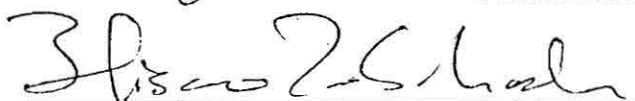
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência Espacial

Dr. Yogeshwar Sahai



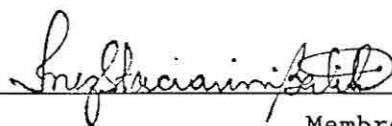
Presidente

Dr. Hisao Takahashi



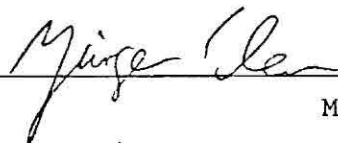
Orientador

Drª Inez Staciarini Batista



Membro da Banca

Dr. Jürgen Scheer



Membro da Banca
-convidado-

Dr. Paulo Prado Batista



Membro da Banca

Candidato: Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, 20 de setembro de 1988

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Dr. Takahashi pela orientação científica e pela atenção dedicada durante o período de execução deste trabalho;

ao Dr. Sahai pelo apoio e sugestões;

a Dr^a Inez, Dr. Paulo, Dr. Scheer, Dr. Clemesha, pela sugestão para finalizar este trabalho;

ao Dr. Medrano e Dr. Kantör, coordenadores do curso de Ciência Espacial;

a Dr^a Iara, pela colaboração e revisão do texto;

aos Engenheiros e Técnicos dos laboratórios Laser (INPE - São José dos Campos) e Laboratório LUME (INPE - Cachoeira Paulista), pelo apoio técnico;

a Srt^a Conceição, pela dedicação e trabalho de datilografia;

a minha Família, Pais e Irmãos pelo apoio e compreensão, a minha companheira Milca por todos os momentos que passamos juntos. Além destes, a todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

ABSTRACT

Simultaneous measurements of the OI 5577 Å, NaD O₂A (0,1) and OH (9,4) nightglow emissions from the mesopause region have been carried out at Cachoeira Paulista (22.7°S, 45.0°W) since 1983. Both the O₂ and OH measurements are used to study rotational temperature, TO₂ e TOH, respectively. All these emissions involve atomic oxygen and originate a narrow region of about 15-20 km width centered on 90 km. Therefore observations of temporal intensity and rotational temperature variations provide an important remote sensing technique to study the mesospheric photochemistry and dynamics. A cross-correlation analysis between intensity variations of different emissions and rotational temperature for the measurements obtained during the period January 1987 to January 1988 has been carried out. It has been observed that the rotational temperature responds much more rapidly as compared to intensity variation when a wavelike perturbation occurred in the mesopause region.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Histórico	1
1.2 - Problemas atuais	5
1.2.1 - Processos dinâmicos na alta atmosfera	5
1.3 - Objetivo do trabalho	6
<u>CAPÍTULO 2 - ESPECTROSCOPIA</u>	9
2.1 - Introdução ao espectro atômico	9
2.1.1 - Oxigênio atômico	10
2.1.2 - Sódio	10
2.2 - Introdução às moléculas de O ₂ e OH	10
2.2.1 - Modelo de moléculas diatômicas	11
2.2.2 - Espectro do O ₂ A (0,1)	13
2.2.3 - Cálculo dos termos vibracionais, rotacionais e intensida des	15
2.4 - Espectro do OH	21
2.4.1 - Termos de energia vibracional, rotacional e cálculo das intensidades	21
<u>CAPÍTULO 3 - FOTOQUÍMICA</u>	29
3.1 - Equilíbrio fotoquímico	29
3.2 - Fotoquímica do oxigênio	30
3.2.1 - Mecanismo de Chapman	31
3.2.2 - Mecanismo de Barth	31
3.3 - Fotoquímica do sódio	33
3.4 - Fotoquímica do O ₂ A (0,1)	34
3.4.1 - Mecanismo por recombinação direta	34
3.4.2 - Mecanismo via precursor O ₂	35
3.5 - Mecanismo fotoquímico do OH	37

<u>CAPÍTULO 4 - INSTRUMENTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS</u>	43
4.1 - Introdução	43
4.2 - Fotômetro	43
4.3 - Calibração do fotômetro	47
4.3.1 - Transmissão dos filtros	47
4.3.2 - Sensibilidade absoluta	53
4.3.3 - Redução dos dados	58
4.3.4 - Filtro 1 (5577)	58
4.3.5 - Filtro 2 (6300)	59
4.3.6 - Filtro 3 (5890, 5896)	59
4.3.7 - Filtro 4 OH (9,4)	60
4.3.8 - Filtro 5 O ₂ A (0,1)	61
4.4 - Erros	62
4.4.1 - Absorção e espalhamento da luz pela atmosfera	63
4.4.2 - Resultado	63
<u>CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÕES E RESULTADOS</u>	65
5.1 - Introdução	65
5.2 - Aquisição e tratamento dos dados	65
5.3 - Variação noturna	66
5.4 - Estudo geral da variação noturna das intensidades e das temperaturas	71
5.5 - Variação sazonal das intensidades e das temperaturas rota cionais	75
<u>CAPÍTULO 6 - DISCUSSÃO</u>	79
6.1 - Variação noturna das intensidades e das temperaturas	79
6.2 - Estudo das intensidades das emissões perturbadas por ondas de gravidade	80
6.2.1 - Estudo de correlação	80
6.2.2 - Defasagem entre as intensidades e as temperaturas	85
6.3 - Cálculo da velocidade vertical das ondas a partir das inten sidades e das temperaturas	86
6.4 - Correlação entre médias noturnas	89

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO</u>	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A - ESPECTRO DA BANDA O ₂ A (0,1)	
APÊNDICE B - ESPECTRO DA BANDA OH (9,4)	

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 - A radiação solar é representada pelas linhas tracejadas, e a camada emissora está indicada na figura. O ângulo formado entre o zênite e a radiação solar determina se a ocorrência de luminescência é diurna, crepuscular ou noturna, ou seja, se $0 \leq \chi \leq 90$, tem-se luminescência diurna, se $90 \leq \chi \leq 110$, tem-se luminescência crepuscular, e se $\chi > 110$ tem-se luminescência noturna	3
2.1 - Transições ópticas mais comuns do oxigênio atômico	10
2.2 - Diagramas vetoriais para os dois casos limites da interação S - L, conforme a teoria de Hund	13
2.3 - Nomenclatura das principais transições ópticas ocorridas na atmosfera para o O_2	14
2.4 - Diagrama de energia potencial relativo para os principais estados do O_2 , e para a transição (0,1)	15
2.5 - Níveis rotacionais do O_2 e os ramos calculados de acordo com as equações 2.18-2.21	19
2.6 - Níveis vibracionais e rotacionais de OH e os ramos calculados de acordo com as equações 2.34-2.36	24
3.1 - Perfil vertical das emissões OI 5577 (Thomas et al., 1979) e O_2A (0,1) (Witt et al., 1979)	36
3.2 - Perfil vertical das emissões NaD 5893 (Stegman e Witt, 1977) e OH (8,3) (Witt et al., 1979)	38
4.1 - Diagrama de bloco do fotômetro, da unidade de aquisição de dados e das interfaces	46
4.2 - Arranjo experimental usado para medir a transmissão dos filtros	47
4.3 - Transmissão do filtro 1 que medirá a linha 5577	49

4.4 - Transmissão do filtro 2 e as intensidades relativas das linhas rotacionais da banda OH (8,2) e as linhas do sódio D ₁ e D ₂	50
4.5 - Transmissão do filtro 4 e as intensidades relativas das linhas rotacionais da banda OH (9,4)	51
4.6 - Transmissão do filtro 5 e as intensidades relativas da banda atmosférica O ₂ A (0,1)	52
4.7 - Arranjo experimental usado para medir a sensibilidade absoluta do fotômetro	57
5.1 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO ₂ e das intensidades OI 5577, O ₂ A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-08-29.	67
5.2 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO ₂ e das intensidades OI 5577, O ₂ A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-03-31.....	69
5.3 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO ₂ e das intensidades OI 5577, O ₂ A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-04-31.....	70
5.4 - Variação noturna da média normalizadas das intensidades OI 5577 e NaD	72
5.5 - Variação noturna da média normalizadas das intensidades O ₂ A e OH (9,4)	73
5.6 - Variação noturna da média normalizada das temperaturas TO ₂ e TOH.....	74
5.7 - Variação mensal das intensidades das emissões OI 5577, NaD O ₂ A (0,1) e OH (9,4).....	76
5.8 - Variação mensal das temperaturas rotacionais TO ₂ , TOH	77
6.1 - Correlação cruzada entre O ₂ e TO ₂ , OH e TOH, OH e O ₂ TOH e TO ₂	82
6.2 - Correlação cruzada entre O ₂ e TO ₂ , OH e TOH, OH e O ₂ TOH e TO ₂	83
6.3 - Correlação cruzada entre O ₂ e TO ₂ , OH e TOH, OH e O ₂ , TOH e TO ₂	84
6.4 - Intensidades médias noturnas OI 5577 e O ₂ A (0,1)	90

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Principais emissões identificadas no espectro noturno	4
2.1 - Regras de transição para a transição dipolar magnética	14
2.2 - Constantes da molécula de O ₂ utilizadas nos cálculos dos termos vibracionais e rotacionais	17
2.3 - Regra de seleção para transição dipolar elétrica	22
2.4 - Constantes da molécula do OH utilizadas para o cálculo dos termos rotacionais	26
2.5 - Constantes da molécula do OH utilizadas para o cálculo dos termos vibracionais	26
3.1 - Observações globais do OI 5577 com foguetes	31
3.2 - Observações globais do NaD com foguetes	33
3.3 - Observações globais do O ₂ (0,0) com foguetes	34
3.4 - Observações globais de OH com foguetes	37
3.5 - Reações químicas do O e O ₂	40
3.6 - Reações químicas do OH e Na	41
4.1 - Linha ou ramo medido por cada filtro e o comprimento de <u>on</u> da em que é medido o fundo astronômico	45
4.2 - Sensibilidade do fotômetro	56
6.1 - Intensidade e temperatura (máxima e mínima) e as defasagens entre as intensidades e suas respectivas temperaturas <u>rota</u> cionais	85
6.2 - Pico das camadas emissoras	87
6.3 - Velocidade da onda na noite de 03/31	88
6.4 - Velocidade da onda na noite de 04/01	88
6.5 - Correlação entre as médias noturnas	89

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- coeficiente de Einstein das reações, s^{-1}
A_1, A_2, A_3	- fatores experimentais
$A(V', V'')$	- probabilidade de transição, s^{-1}
B	- fator experimental
Be	- constante eletrônica, cm^{-1}
$B(\lambda)$	- radiância $W\ cm^{-2}\ s^{-1}\ str^{-1}$
Br	- constante rotacional
C	- velocidade da luz
D	- estado quântico do átomo $L = 2$
D	- radiância fótons $cm^{-2}\ \text{\AA}^{-1}$
d	- distância
De	- constante eletrônica, cm^{-1}
Dr	- constante rotacional, cm^{-1}
$E(\lambda)$	- intensidade da radiação da lâmpada, $watt\ str^{-1}\ \text{\AA}^{-1}$
Ee	- energia eletrônica
Er	- energia rotacional
Ev	- energia vibracional
$F_{1\ 2}, F_{3\ 1}, F_{3\ 2}, F_{3\ 3}, (J, K)$	- termo de energia rotacional do nível J, cm^{-1}
Ge	- termo de energia eletrônica, cm^{-1}
$GF(V, J)$	- termo de energia vibracional + rotacional, cm^{-1}
$G(V)$	- termo de energia vibracional, cm^{-1}
h	- constante de Plank
i	- intensidade ou temperatura normalizada
$\bar{I}$	- intensidade ou temperatura média para uma noite
I_R	- intensidade observada das emissões
$I_t(K, J)$	- intensidade das emissões
I	- intensidade ou temperatura interpolada de 5 em 5 minutos
j	- média normalizada das intensidades ou temperaturas
$\vec{J}, J$	- estado quântico e o número quântico do movimento angular total

Ji	- resposta do fotômetro à radiação no comprimento de onda λ
K	- constante de Boltzmann
Ki	- coeficiente da reação
$\vec{K}, K$	- soma dos estados quânticos $\vec{A}, \vec{N}$
K_λ	- índice de reflexão
L	- perda das espécies
$\vec{L}, L$	- estado quântico e o número quântico do movimento angular orbital
Mi	- $[O] + [O_2] + [N_2]$, cm^3
n	- densidade numérica, cm^3
n	- número de noites
P	- termo de produção da espécie
P	- estado quântico do átomo $L = 1$
$P_1 \ 2$	- ramo da banda do OH
$P(\lambda)$	- sensibilidade da fotomultiplicadora
Pmt	- fotomultiplicadora
PP	- ramo da banda do O_2A
PQ	- ramo da banda do O_2A
$Q_1 \ 2$	- ramo da banda do OH
$Q(V', J', K')$	- função partição
R	- Rayleighs
$R_1 \ 2$	- ramo da banda do OH
$r(\tau)$	- coeficiente de correlação
RQ	- ramo da banda do O_2A
RR	- ramo da banda do O_2A
S	- sensibilidade absoluta do fotômetro
$\vec{S}, S$	- estado quântico $L = 0$ e o número quântico de spin
Sr	- função peso
t	- tempo
T	- transmissão do filtro
TOH	- temperatura rotacional do OH
TO ₂	- temperatura rotacional do O_2
V	- número quântico do estado vibracional da molécula

$\vec{V}$	- velocidade
ω_l	- termo de energia rotacional
α_e	- constante eletrônica, cm^{-1}
α_l	- eficiência de reação
β_e	- constante eletrônica, cm^{-1}
γ_e	- constante eletrônica, cm^{-1}
δ_λ	- largura de banda da luz monocromador
Δ	- estado eletrônico da molécula
ϵ	- fator experimental
χ	- ângulo entre o zênite e a radiação solar
θ	- ângulo entre o feixe óptico e a normal
λ	- comprimento de onda, $\text{\AA}$
Λ, Λ	- componente de $\vec{L}$ na direção do eixo nuclear
π	- estado eletrônico da molécula ($\Lambda=2$) e o estado fundamental da molécula do OH
Σ	- estado eletrônico da molécula ($\Lambda=0$)
Σ, Σ	- componente de S na direção do eixo nuclear
$\omega, \omega_x, \omega_y, \omega_z$	- constantes vibracionais, cm^{-1}
$\vec{\Omega}$	- soma dos estados quânticos $\vec{\Lambda}$ e $\vec{\Sigma}$

Índices Superiores

$+$ e $-$	- paridade da função de onda
valor: $(2S + 1)$	- multiplicidade de spin

Índices Inferiores

$g,$	- paridade da função de onda
λ	- denota a grandeza referida a um certo comprimento de onda

Símbolos Especiais

∇	- operador nabla
$\partial/\partial t$	- derivada temporal
$[\cdot]$	- número de moléculas por cm^3
λ	$\tilde{\lambda}$ constante de separação, cm^{-1}
$\sum$	- somatório
Δ	- indicador de variação de uma grandeza (estado superior - estado inferior)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - HISTÓRICO

Desde as idades mais remotas os fenômenos ópticos atmosféricos despertam muita curiosidade e a princípio, foram-lhes atribuídas explicações místicas. Mas, com o desenvolvimento da Ciência, o misticismo que envolvia tais fenômenos foi substituído por explicações científicas. A Aurora, que pode ser vista a olho nu, na região polar, é um dos espetáculos mais belos da natureza e sabe-se hoje que é devida à emissão radiativa dos constituintes atmosféricos que foram excitados por partículas energéticas.

No entanto, a Luminescência atmosférica, "Aurora" tem uma história mais recente. Com os avanços científicos e dos equipamentos pode-se observar e explicar emissões radiativas de baixa intensidade em todas as latitudes. Campbell (1896) detectou a emissão do oxigênio OI 5577 Å, e mais tarde, em 1930, Lord Rayleigh IV fez a distinção entre aurora e luminescência atmosférica e deu a esta última o nome de "non polar Aurora". Rayleigh (1930, 1931) foi o primeiro a medir quantitativamente a intensidade da linha 5577 Å e determinou a unidade da luminescência atmosférica como sendo o número de fótons por cm² de coluna, por segundo. Esta unidade foi chamada de "Rayleigh" e é utilizada até hoje como a unidade de intensidade Auroral e de Luminescência Atmosférica (Chamberlain, 1961).

Uma definição mais adequada de luminescência atmosférica foi dada por Chapman (1931), como sendo a emissão de fótons dos constituintes atmosféricos excitados direta ou indiretamente pela radiação solar. Pode-se subdividir a luminescência em luminescência noturna, crepuscular e diurna, as quais podem de maneira breve ser definidas como:

- Luminescência Noturna: quando a radiação solar e o espalhamento "Rayleigh" estão ausentes, a excitação dos constituintes é causada por reações químicas, ou seja, de maneira indireta (veja Figura 1.1).
- Luminescência Crepuscular: quando a camada emissora está sendo iluminada diretamente pelo sol, e as camadas inferiores estão iluminadas pelo espalhamento; pode-se dizer que a principal fonte de excitação é a radiação solar direta (veja Figura 1).
- Luminescência Diurna: quando todas as camadas atmosféricas estão iluminadas pelo sol; neste caso, a principal fonte de excitação é a radiação solar direta (veja Figura 1.1).

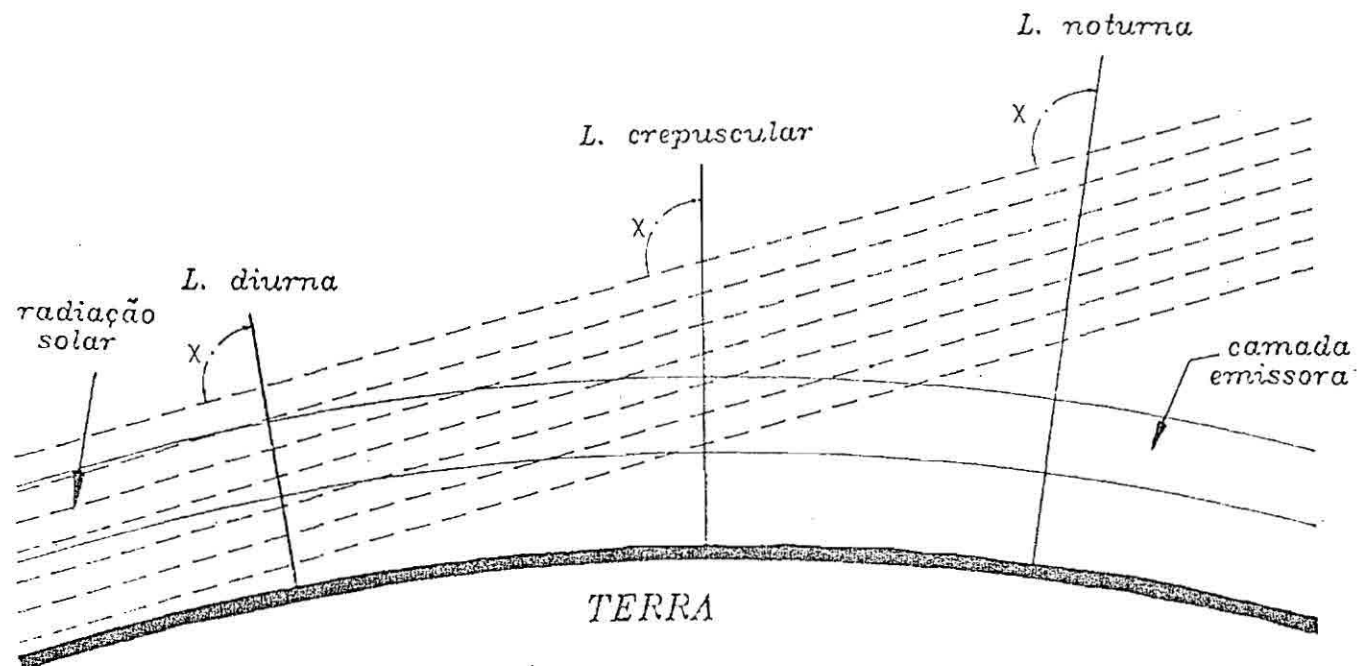


Fig. 1.1- Nesta figura a radiação solar é representada pelas linhas tracejadas, e a camada emissora está indicada na figura. O ângulo formado entre o zênite e a radiação solar determina se a ocorrência de luminescência é diurna, crepuscular ou noturna. Ou seja, se $0 \leq \chi < 90$ tem-se luminescência diurna, se $90 \leq \chi \leq 110$ tem-se luminescência crepuscular, e se $\chi > 110$, tem-se luminescência noturna.

Na luminescência noturna podem-se identificar várias emissões e as principais características destas emissões estão listadas na Tabela 1.1.

TABELA 1.1

PRINCIPAIS EMISSÕES IDENTIFICADAS NO ESPECTRO NOTURNO

ESTADO EXCITADO	λ $\text{\AA}$	INTENSIDADE R	ALTITUDE KM
H Ly $_{\beta}$	1025	10 R	200
H Ly $_{\alpha}$	1216	2 KR	100-10 ⁵
O ₂ (A ³ Σ_g^+)	2600- 3800	600 R	90
O(¹ S)	5577	250 R	97, 300
Na(² P)	5893	20-160 R	~92
N(² D)	5200	1 R	~250
H(3 ² P)	6563	3 R	200
O(¹ D)	6300,6364	10-500 R	~300
O ₂ (¹ Σ_g^+)	7619 etc.	6 KR	~80
O ₂ (¹ Δ_g)	12700 etc.	80 KR	90
OH(V $\leq$ 9)	28000 etc.	45 MR	87

FONTE: Hunt (1971).

Das bandas de emissão da hidroxila OH(V',V'') e do O atmosférico, as que são de interesse deste trabalho e foram identificadas na luminescência atmosférica por Meinel (1950a,b,c).

Meinel também mostrou a possibilidade de se medir as temperaturas rotacionais das duas emissões, temperaturas estas que

indicam a temperatura cinética da atmosfera na altura dos picos das camadas.

Embora a observação da temperatura rotacional do $\text{OH}(V',V'')$ e do O_2A seja relativamente simples, se comparada com outras técnicas de medidas da temperatura atmosférica, esta técnica foi utilizada por Krassovsky et al. (1974) somente após a década de 1970. Foram estudadas as perturbações atmosféricas na região da mesopausa, por exemplo a propagação de ondas e ventos, observando as variações temporais (periódicas) das intensidades e das temperaturas rotacionais do $\text{OH}(V',V'')$ (Krassovsky, 1977).

No fim da década de 1970, Noxon (1978), conseguiu observar simultaneamente as emissões de $\text{OH}(6,2)$ e $\text{O}_2\text{A}(0,1)$ e suas respectivas temperaturas rotacionais.

Recentemente, Takahashi et al. (1986), observaram as variações noturnas das emissões $\text{OH}(9,4)$ e $\text{O}_2\text{A}(0,1)$ e as temperaturas rotacionais. Eles mostraram a possibilidade de estudar a propagação vertical das perturbações atmosféricas com medidas simultâneas das intensidades e das temperaturas rotacionais.

1.2 - PROBLEMAS ATUAIS

1.2.1 - Processos Dinâmicos na Alta Atmosfera

Na alta atmosfera, região da mesopausa, entre 80 e 100 km, os processos fotoquímicos e dinâmicos são muito ativos. As radiações solares na faixa de comprimento de onda do extremo ultravioleta são absorvidas pelas moléculas de oxigênio e de nitrogênio, dando origem a átomos e íons, resultando em um aquecimento desta região. Esta energia, depositada na forma de átomos e moléculas excitados, dá origem a um processo fotoquímico muito rico nesta região, e também a processos dinâmicos, isto é, ventos e ondas.

A absorção da radiação solar na faixa do ultravioleta ocorre na estratosfera entre 20 e 50 km devida à existência da camada de ozônio e ao vapor d'água, resultando em um aquecimento desta região. A variação diurna deste aquecimento provoca a variação de pressão que se propaga para a alta atmosfera na forma de onda. Este processo recebe o nome de maré térmica e possui um período que é um submúltiplo de 24 horas. Além desta geração de onda pelo aquecimento térmico, existem várias outras fontes que provocam formação de ondas, tais como uma passagem de frente fria na troposfera, atividades magnéticas na região de alta latitude (chamadas ondas de gravidade que possuem períodos da ordem de minutos até 6 horas). Quando da passagem destas ondas pela mesosfera a concentração, pressão e temperatura são alteradas e, por conseguinte, provocam alterações na intensidade das emissões e das temperaturas rotacionais.

Estudos recentes demonstram que medidas simultâneas de várias emissões (O, Na, O₂ e OH) e das temperaturas rotacionais TO₂ e TOH, possibilitam detectar a passagem de ondas de gravidade pela mesosfera (Noxon, 1978; Takahashi et al., 1979; Molina et al., 1984; Myrabo et al., 1987), e também estudar o comportamento dos constituintes minoritários quando a mesosfera é perturbada por ondas tipo maré e de gravidade. Neste sentido, modelos teóricos indicam que a concentração dos constituintes minoritários [O], [O₃] e [H] não está em fase com os constituintes atmosféricos majoritários, quando a mesosfera é perturbada por uma onda de gravidade (Weinstock, 1978; Frederick, 1979; Hatfield et al., 1981; Walterscheid et al., 1987).

1.3 - OBJETIVO DO TRABALHO

Durante o período de janeiro/87 a janeiro/88 em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W) foram feitas observações simultâneas de luminescência noturna das emissões OI 5577 Å, NaD 5890 Å, O₂A (0,1), OH (9,4) e das temperaturas rotacionais TOH e TO₂.

Das variações temporais das várias emissões mesosféricas (OI 5577, NaD, OH (9,4) e O₂A (0,1)) e das defasagens de tempo entre

as emissões, Takahashi et al. (1979), Rodrigo et al. (1985) tentaram calcular a velocidade vertical de propagação da fase da perturbação atmosférica; eles obtiveram uma velocidade média em torno de 4-6 km/h.

Segundo os estudos de modelo atmosférico por Waterscheid et al. (1987), os constituintes atmosféricos minoritários, tais como: hidrogênio, oxigênio e ozônio, que estão envolvidos na produção dos constituintes atmosféricos estudados, respondem à passagem da perturbação com as fases e amplitude de variação diferentes dos componentes majoritários da atmosfera.

Neste caso as respostas das intensidades das emissões devem ser diferentes para cada emissão, porém, não está bem claro como as emissões atmosféricas respondem em fase e amplitude de variação à passagem da perturbação atmosférica.

O objetivo deste trabalho é, portanto, contribuir para o esclarecimento de como é a resposta das emissões mesosféricas e das temperaturas rotacionais à passagem de uma perturbação dinâmica. Serão feitas análises com os dados da variação noturna das intensidades das emissões e das temperaturas rotacionais, obtendo a fase e a amplitude das perturbações em cada emissão comparando-as com os modelos teóricos recentes.

CAPÍTULO 2

ESPECTROSCOPIA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos de espectroscopia utilizados para calcular o espectro atômico e o espectro molecular, bem como as intensidades das bandas OH (9,4) e O_2° (0,1) e suas temperaturas rotacionais. Uma discussão mais detalhada sobre o espectro atômico e molecular pode ser encontrado em Herzberg (1950).

2.1 - INTRODUÇÃO AO ESPECTRO ATÔMICO

A emissão radiativa de um átomo ocorre quando o átomo está em um dado estado eletrônico e decai para um estado eletrônico menos energético, emitindo uma radiação num dado comprimento de onda característico.

As quantidades físicas que estão envolvidas neste processo de emissão radiativa são o momento angular orbital $\vec{l}$, e o momento angular de spin, $\vec{s}$. Os autovalores de cada uma destas quantidades são: $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, que são associados às letras s, p, d, f ... respectivamente; e $s = 1/2, -1/2$. Para um átomo que possui 2 elétrons de valência tem-se que o momento angular total é dado por $L = l_1 + l_2, l_1 + l_2 - 1, \dots, l_1 - l_2$, que serão associados às letras S, P, D, F ... , respectivamente. O momento angular de spin total é dado por $S = s_1 + s_2, s_1 - s_2$. Então qualquer estado eletrônico deste átomo que possui 2 elétrons de valência é representado pelo momento angular total L, com um subíndice $|L+S|$, e com um sobre-índice $|2S+1|$.

2.1.1 - Oxigênio Atômico

A transição que dá origem à linha 5577 Å é devida ao decaimento do estado eletrônico 1S_0 para o estado eletrônico 1D_2 . O coeficiente de Einstein para esta transição é de 1 seg^{-1} . Na Figura 2.1 têm-se as principais transições que ocorrem na atmosfera.

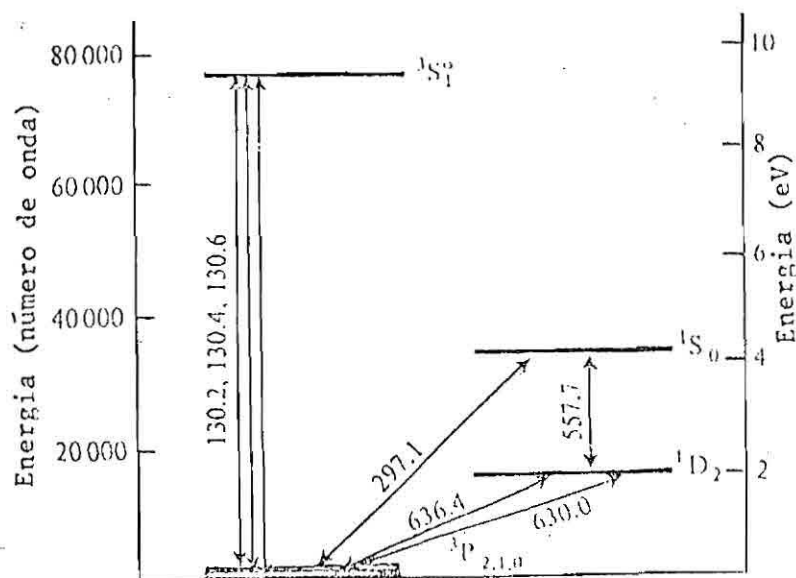


Fig. 2.1 - Transições ópticas mais comuns no oxigênio atômico.

- Baseado em Richard (1985)

2.1.2 - Sódio

A transição que dá origem às linhas 5890 Å e 5893 Å é devida ao decaimento do estado eletrônico $^2P_{3/2,1/2}$ para o estado eletrônico $^2S_{1/2}$. O coeficiente de Einstein para esta transição é de 10^7 seg^{-1} .

2.2 - INTRODUÇÃO ÀS MOLÉCULAS DE O_2 E OH

As bandas de emissão do O_2 e OH possuem algumas diferenças no mecanismo de emissão. As bandas atmosféricas do O_2

devem-se à transição de estados eletrônicos diferentes (veja Figura 2.4), onde cada estado eletrônico do O_2 possui níveis vibracionais ($V = 0, 1, 2, \dots$) e níveis rotacionais. A banda que vai ser estudada deve-se à transição do estado $1\sum_g^+$ ($V = 0$) para o estado eletrônico fundamental $3\sum_g^-$ ($V = 1$), que será representada por $O_2A(0,1)$.

As bandas do OH são devidas a transições vibracionais dentro do mesmo estado eletrônico $OH\ 2\pi_{3/2,1/2}$ (veja Figura 2.7). A transição que estudar-se-á será do nível vibracional $V = 9$ para ($V = 4$), que será representada por $OH(9,4)$.

O objetivo é discutir os aspectos gerais da notação de espectroscopia, as regras de seleção para cada transição, e as equações utilizadas para o cálculo da intensidade e da temperatura rotacional.

2.2.1 - Modelo de Moléculas Diatômicas

As moléculas têm 2 graus de liberdade a mais do que os átomos, que são devidos à vibração e à rotação dos núcleos, e para descrever os estados quânticos das moléculas necessita-se, além das quantidades físicas utilizadas para o átomo, as seguintes:

N - rotação dos núcleos;

V - vibração dos núcleos ao longo do eixo nuclear;

$\vec{\Lambda}$ - componente de $\vec{L}$ ao longo do eixo nuclear;

$\vec{\Sigma}$ - componente de $\vec{S}$ ao longo do eixo nuclear.

Os autovalores assumidos pela vibração dos núcleos são dados por $V = 0, 1, 2, \dots$, e os autovalores assumidos por $\vec{\Lambda}$ são dados por $\Lambda = 0, 1, 2, \dots$, que são respectivamente associados às letras gregas $\Sigma, \pi, \Delta, \dots$

Nas moléculas diatômicas pode-se distinguir dois casos limites de acoplamento. O primeiro dá-se quando a interação entre a rotação do núcleo e o movimento dos elétrons é fraca e, portanto, $|\vec{L} - \vec{S}|$ está acoplada ao eixo nuclear. Então, pode-se definir:

$$\vec{\Omega} = \vec{\Lambda} + \vec{\Sigma} \quad (2.1)$$

que é a quantidade de movimento eletrônico. Este tipo de acoplamento é chamado caso (a) de Hund (veja Figura 2.2a). O movimento angular total é dado por:

$$\vec{J} = \vec{\Lambda} + \vec{N} \quad (2.2)$$

e os autovalores de $\vec{J}$ são $J = \Omega, \Omega + 1, \Omega + 2, \dots$

O segundo tipo de acoplamento dá-se quando a rotação dos núcleos aumenta resultando em um desacoplamento entre o Spin $\vec{S}$ e o eixo nuclear, formando um estado $\vec{K}$, chamado caso (b) de Hund (veja Figura 2.2b), dado por:

$$\vec{K} = \vec{\Lambda} + \vec{N} \quad (2.3)$$

e os autovalores de $\vec{K}$ são $K = \Lambda, \Lambda + 1, \Lambda + 2, \dots$

O movimento angular total é:

$$\vec{J} = \vec{K} + \vec{S} \quad (2.4)$$

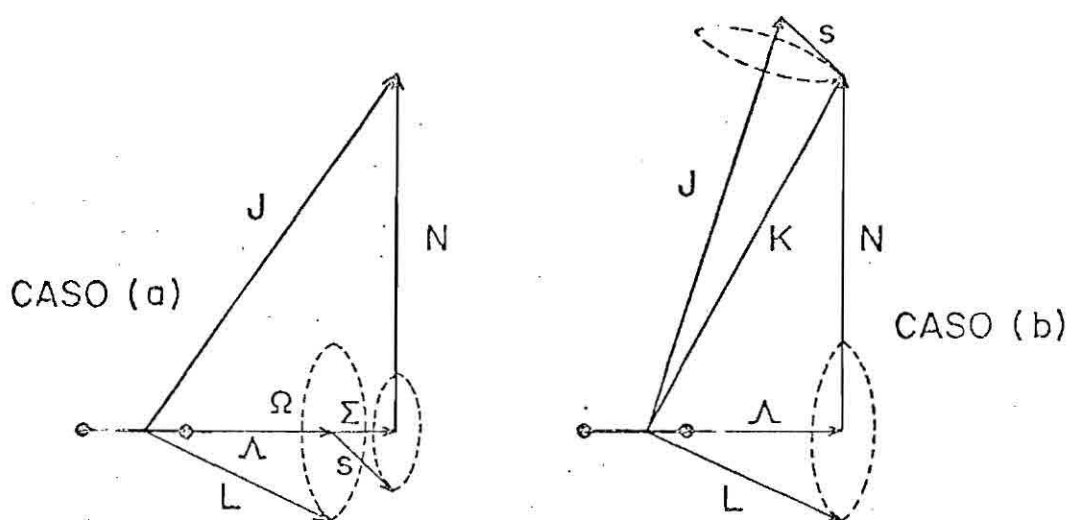


Fig. 2.2 - Diagramas vetoriais para os dois casos limites da interação $\vec{S} - \vec{L}$, conforme a teoria de Hund.

Define-se dois tipos de simetria, sendo o primeiro devido à reflexão em qualquer plano que passa através do eixo internuclear; para $\Lambda = 0$ tem-se uma dupla degenerescência $\sum^+$ para J par, $\sum^-$ para J ímpar, e para $\Lambda \neq 0$ tem-se os dois casos simultaneamente para qualquer J . O segundo tipo de simetria aparece somente nas moléculas homonucleares. Quando permuta-se o núcleo, a função de onda total da molécula pode alterar-se ou não; quando ela não se modifica tem-se o caso "g"; se ela se modifica tem-se o caso "u".

2.2.2 - Espectro do $O_2A(0,1)$

A transição do estado $1\sum_g^+$ para $3\sum_g^-$ é uma transição dipolar proibida, e para explicar-se esta transição é necessário recorrer-se a transições dipolares magnéticas cujas regras de seleção estão na Tabela 2.1. Na Figura 2.4 tem-se as transições mais comuns

do O_2 . Na Figura 2.5 é mostrado um diagrama com os potenciais dos principais estados do O_2 e também é indicada a transição $O_2A(0,1)$.

TABELA 2.1

REGRAS DE TRANSIÇÃO PARA A TRANSIÇÃO DIPOLAR MAGNÉTICA

TRANSIÇÃO	TRANSIÇÃO PERMITIDA E NOMENCLATURA DOS ESPECTROS
$\Delta\Omega$	0, +1, -1
ΔJ	0, 1, -1, exceto para $J = 0 \leftrightarrow 0$
Paridade	$(+) \leftrightarrow (+)$; $(-) \leftrightarrow (-)$; $(+) \not\leftrightarrow (-)$
Simetria	$(g) \leftrightarrow (g)$; $(u) \leftrightarrow (u)$; $(g) \not\leftrightarrow (u)$
ΔV	0, 1, 2, 3, ...

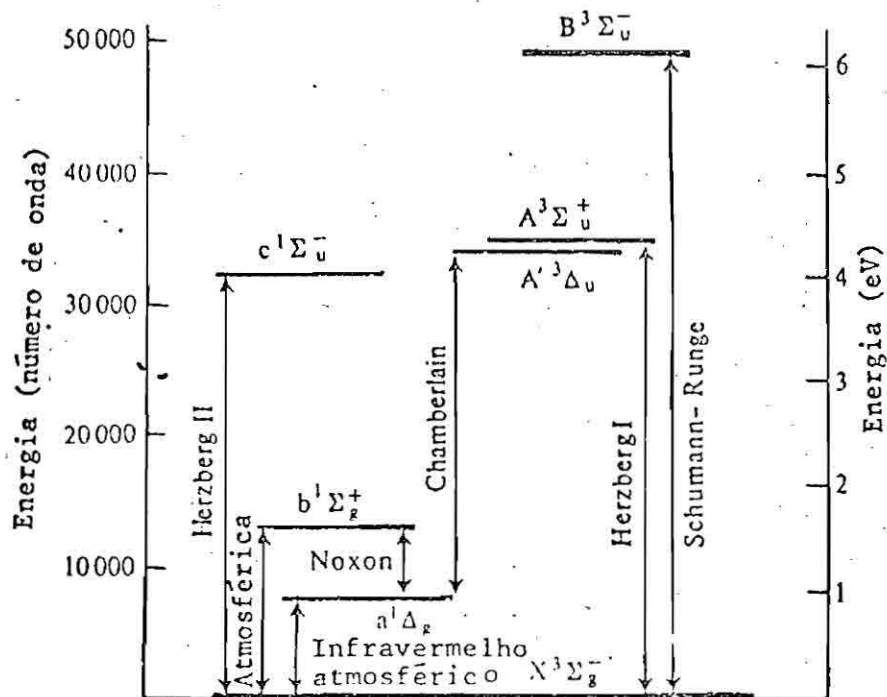


Fig. 2.3 - Nomenclatura das principais transições ópticas ocorridas na atmosfera para o O_2 .

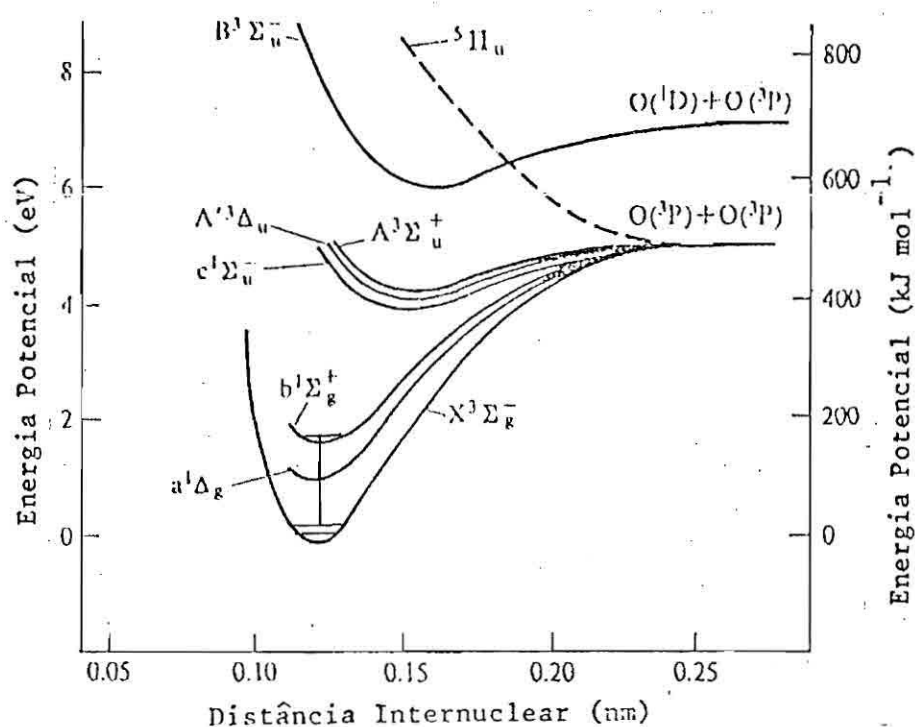


Fig. 2.4 - Diagrama de energia potencial relativo para os principais estados do O_2 , e para a transição ${}^1\Sigma_g^+ - {}^3\Sigma_g^-$ (0,1).

As Figuras 2.3 e 2.4 estão baseadas em Richard (1985).

O acoplamento $|\vec{L} - \vec{S}|$ no O encontra-se em um estado intermediário entre o caso Hund (a) e o caso Hund (b). O estado é intermediário porque os níveis vibracionais são baixos, o que permite um acoplamento $|\vec{L} - \vec{S}|$, mas no estado Σ a interação $|\vec{L} - \vec{S}|$ é debilitada.

2.2.3 - Cálculo dos Termos Vibracionais, Rotacionais e Intensidades

Pode-se dividir a energia para cada estado em três partes:

Ee: energia eletrônica;

Ev: energia vibracional (vibração dos núcleos);

Er: energia rotacional (rotação dos núcleos).

Dividindo-se cada energia por hc onde " h " é a constante de Plank e " c " é a velocidade da luz no vácuo, obtém-se os termos de energia em unidade de cm^{-1} :

$$G_e = E_e/hc \quad (2.5)$$

$$G(v) = E_r/hc \quad (2.6)$$

$$F(K,J) = E_r/hc \quad (2.7)$$

onde V e K são autovalores dos níveis vibracional e rotacional respectivamente. Então, o termo total de energia de uma molécula em um determinado estado é dado por:

$$GF(V,K,J) = G_e + G(v) + F(K,J) \quad (2.8)$$

Para distingüir-se os dois estados envolvidos na transição usa-se (1) para o estado Singleto e (3) para o estado Tripleto. Os cálculos dos termos vibracionais e rotacionais são feitos de acordo com Babcock e Herzberg (1948) e Krassovsky et al. (1962):

$$G(v) = \omega_e(V+0,5) - \omega_e x_e(V+0,5)^2 - \omega_e y_e(V+0,5)^3 + \omega_e z_e(V+0,5)^4 \quad (2.9)$$

$$F(K,J) = B(V) K(K+1) - D(V) K(K+1)^2 \quad (2.10)$$

$$B(V) = B_e - \alpha_e(V+0,5) - \gamma_e(V+0,5)^2 \quad (2.11)$$

$$D(V) = D_e - \beta(V+0,5) \quad (2.12)$$

No entanto, no caso do estado $^3\Sigma_g^+$, tem-se uma degenerescência nos termos rotacionais que pode ser calculada com auxílio das equações abaixo:

$$F3_1(K, J) = \omega_0 + (2K + 3) B(V) - \lambda - [(2K + 3)^2 B(V)^2 + \lambda^2 - 2\lambda B(V)]^{1/2} + \gamma(K+1); J=K+1 \quad (2.13)$$

$$F3_2(K, J) = \omega_0; J = K \quad (2.14)$$

$$F3_3(K, J) = \omega_0 - (2K - 1) B(V) - \lambda + [(2K - 1)^2 + \lambda^2 - 2\lambda B(V)]^{1/2} - \lambda K; J = K - 1 \quad (2.15)$$

onde $\omega_0 = F(K, J)$.

Na Tabela 2.2 estão as constantes utilizadas nos cálculos dos termos vibracionais e rotacionais.

TABELA 2.2

CONSTANTES DA MOLÉCULA DE O₂ UTILIZADAS NOS CÁLCULOS DOS
TERMOS VIBRACIONAIS E ROTACIONAIS

CONSTANTES	ESTADO $^3\Sigma_g^-$	ESTADO $^1\Sigma_g^+$
Ge	-	13195,2221
We	1580,3613	1432,6874
WeXe	12,0730	13,95008
WeYe	0,0546	0,01075
WeZe	-0,00143	-
Be	1,445666	1,40016
αe	0,015791	0,018170
γe	-	-0,000043
De	4957 x 10	5,356 x 10
β	0,088 x 10	0,077 x 10
λ	1,993	-
γ	-0,00837	-

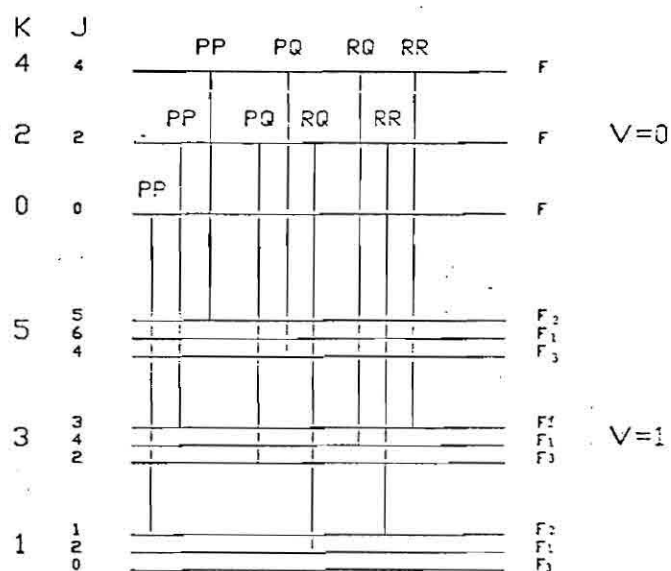


Fig. 2.5 - Níveis rotacionais do O₂ e os ramos calculados de acordo com as equações 2.18-2.21.

Os comprimentos de onda no vácuo $\lambda(J,K)$ dos quatro ramos podem ser calculados, como é mostrado para o ramo PP(K,J):

$$\lambda(K',J') = 10^8 / PP(K',J') \quad (2.22)$$

onde λ está em unidade de Angstrom.

A correção para o ar é feita utilizando-se o índice de refração do ar N_s :

$$\lambda_{ar}(K',J') = \lambda(K',J') / N_s \quad (2.23)$$

onde

$$(N_S - 1) \times 10^8 = 6432,8 + 2949810/(146 - 1/\lambda^2) + \\ + 25540/(41 - 1/\lambda^2) \quad (2.24)$$

A Equação 2.24 é dada no Almanaque de Ciência do Observatório de Toquio (1970).

As intensidades de cada linha rotacional são dadas pela Equação:

$$I = \frac{S_{V'} W_J}{Q(V', K', J')} \exp(-hc GF(V', K', J')/kTr) \quad (2.25)$$

onde

$$Q(V', K', J') = \sum_J \omega_J \exp[-hc GF(V', K', J')/kTr] \quad (2.26)$$

é a função partição rotacional. Fazendo-se

$$\frac{ctes}{Q(V', K', J')} \exp[-hc(Ge + G(V'))/kTr] = 1 \quad (2.27)$$

obtem-se a intensidade relativa:

$$I_R(K', J') = S_r \omega_J \exp(-hc F(K', J')/kTr) \quad (2.28)$$

onde

S_v : é o fator intensidade da banda eletrônica (proporcional a v^3)

v : é a frequência

W_J : é a função peso.

A partir da Equação 2.28 obtêm-se a temperatura rotacional:

$$T_r = - \frac{hc}{k} F(K', J') \lg(I_R(K', J') / S_V \cdot J)$$

Todos os cálculos para a molécula do O_2 encontram-se no Apêndice A.

2.4 - ESPECTRO DO OH

A transição do $OH(v = 9)$ para $OH(v = 4)$, dentro do estado fundamental π , é uma transição dipolar permitida. O acoplamento $\vec{L} - \vec{S}$ pode ser representado com boa aproximação pelo caso de Hund (a), quando N é pequeno e pelo caso de Hund (b) quando N é grande. Neste trabalho o estado do OH é apresentado como caso (a) de Hund, pois as linhas rotacionais observadas são de baixa rotação, $N = 1, 2, 3, \dots$.

A molécula como foi dita acima está no seu estado fundamental π , e possui 1 elétron de valência então $\Lambda = 1$ e $\Sigma = 1/2$ ou $\Sigma = -1/2$, o que resulta em dois estados, $^2\pi_{3/2}$ e $^2\pi_{1/2}$. As regras de seleção para uma transição dipolar estão na Tabela 2.3.

2.4.1 - Termos de Energia Vibracional, Rotacional e Cálculo das Intensidades

Os termos vibracionais e rotacionais podem ser calculados utilizando-se a Equação abaixo (Herzberg, 1950, p. 92):

$$G(V) = \omega_e(V + 0,5) - e_x e(V + 0,5)^2 + \omega_e y_e(V + 0,5)^3 - \omega_e z_e(V + 0,5)^4 \quad (2.29)$$

onde as constantes estão dadas na Tabela 2.5.

Os termos rotacionais para o acoplamento intermediário são:

$$F_1(J) = B(V) \{ (J + 0,5)^2 - \Lambda^2 - 0,5[4(J + 0,5)^2 + Y(V) (Y(V) - 4)\lambda^2]^{1/2} \} - D(V) J \quad (2.30)$$

$$F_2(J) = B(V) \{ (J + 0,5)^2 - \Lambda^2 - 0,5[4(J + 0,5)^2 + Y(V) (Y(V) - 4)\lambda^2]^{1/2} \} - D(V)(J + 1) \quad (2.31)$$

onde os índices 1 e 2 indicam os estados $^2\Pi_{3/2}$ e $^2\Pi_{1/2}$, respectivamente.

TABELA 2.3

REGRA DE SELEÇÃO PARA TRANSIÇÃO DIPOLAR ELÉTRICA

Transição	Transição permitida e nomenclatura dos espectros
$\Delta\Lambda$	0, +1, -1 $\Delta\Lambda=0$ (transição $\pi-\pi$) no caso de luminescência atmosférica
$\Delta\Sigma$	0 a lei de conservação de spin $^2\Pi_{3/2} \rightarrow ^2\Pi_{3/2}$; $i=1$ $^2\Pi_{1/2} \rightarrow ^2\Pi_{1/2}$; $i=2$
ΔJ	+1 ; $J \rightarrow J+1$; P - Ramo P_1 ; $i=1$ e P_2 ; $i=2$ 0 ; $J \rightarrow J$; Q - Ramo Q_1 ; $i=1$ e Q_2 ; $i=2$ -1 ; $J \rightarrow J-1$; R - Ramo R_1 ; $i=1$ e R_2 ; $i=2$
$\overset{P}{\text{Paridade}}$	(+) $\leftrightarrow$ (-), (+) $\nleftrightarrow$ (+), (-) $\nleftrightarrow$ (-)
ΔV	0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , oscilador anarmônico Ex. $v=9 \rightarrow v=4$; banda (9, 4) $v=8 \rightarrow v=3$; banda (8, 3)

Os valores de $B(v)$, $D(v)$ e $Y(v)$ estão na Tabela 2.4.

Os termos de energia total são:

$$GF_1(V,J) = G(V) + F_1(J) \quad (2.32)$$

$$GF_2(V,J) = G(V) + F_2(J) \quad (2.33)$$

As bandas do OH são obtidas de acordo com a regras de seleção da Tabela 2.3. Representando-se o estado inicial por (') e o estado final ("), obtêm-se os ramos da banda OH:

$$P_{1,2}(J') = GF_{1,2}(V',J') - GF_{1,2}(V'', J'+1) \quad (2.34)$$

$$Q_{1,2}(J') = GF_{1,2}(V',J') - GF_{1,2}(V'',J) \quad (2.35)$$

$$R_{1,2}(J') = GF_{1,2}(V',J') - GF_{1,2}(V'', J-1) \quad (2.36)$$

Na Figura 2.6 mostram-se os ramos da banda do OH e as transições possíveis.

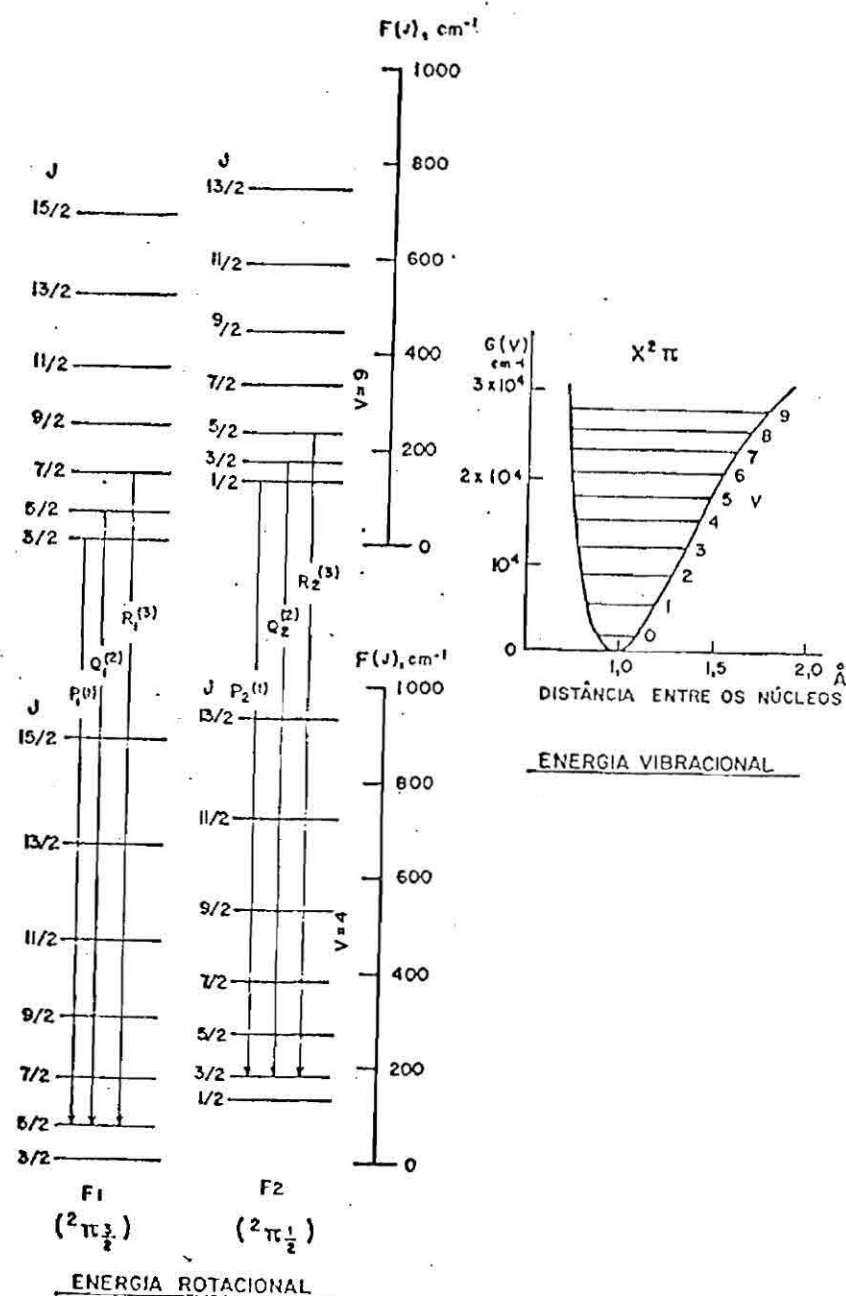


Fig. 2.6 - Níveis vibracionais e rotacionais de OH e os ramos calculados de acordo com as equações 2.34-2.36.

O comprimento de onda no vácuo para os ramos Q e R pode ser calculado como é mostrado para o ramo P:

$$\lambda(J') = 10^8 / P_{1,2}(J') \quad (2.37)$$

onde λ é em Angstrom.

A correção para o ar do comprimento de onda é feita de maneira análoga ao que foi feito para o O_2 . A intensidade de cada linha rotacional é dada pela Equação

$$I = \frac{N_V A(V'V'', J'J'')}{Q(V', J')} 2(2J+1) \exp[-hc GF_{1,2}(V', J')/kTr] \quad (2.38)$$

onde

N_V : população no nível V' ;

$A(V'V'', J'J'')$: probabilidade de transição ;

$Q(V', J')$: função partição rotacional.

TABELA 2.4

CONSTANTES DA MOLÉCULA DO OH UTILIZADAS PARA O CÁLCULO
DOS TERMOS ROTACIONAIS

v	B(v) cm ⁻¹	D(v) cm ⁻¹	Y(v)
0	18,515	0,00018	-7,547
1	17,807	0,00018	-7,876
2	17,108	0,00018	-8,214
3	16,414	0,00018	-8,568
4	15,722	0,00018	-8,941
5	15,033	0,00018	-9,368
6	14,349	0,00018	-9,795
7	13,65	0,00018	-10,34
8	12,91	0,00018	-10,95
9	12,12	0,00018	-11,58
10	11,54	0,00018	-12,17

TABELA 2.5

CONSTANTES DA MOLÉCULA DO OH UTILIZADAS PARA O CÁLCULO
DOS TERMOS VIBRACIONAIS (cm⁻¹)

We	3737,90000
WeXe	84,96500
WeYe	0,53980
WeZe	0,01674

Fazendo:

$$\frac{\sum N_{V'} \exp(-hc G(V')/kTr)}{Q(V', J')} = 1 \quad (2.39)$$

obtem-se as intensidades relativas:

$$I_R(V', J') = A(V'V'', J'J'')(2J' + 1) \exp(F_{1,2}(V', J')/kTr) \quad (2.40)$$

A temperatura é obtida a partir da Equação 2.40 e é dada por:

$$T_r = - \frac{hc}{k} F_{1,2}(V', J') \lg[I_R/A(V'V'', J'J'')(2J' + 1)] \quad (2.41)$$

Todos os cálculos para a molécula do OH encontram-se no Apêndice B.

CAPÍTULO 3

FOTOQUÍMICA

3.1 - EQUILÍBRIO FOTOQUÍMICO

A concentração dos constituintes atmosféricos é afetada por reações químicas e, também, pela divergência do fluxo dos constituintes.

Então pode-se expressar a concentração de um certo constituinte em função do tempo pela Equação da continuidade:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = P - L - \vec{\nabla} \cdot (n \vec{v}) \quad (3.1)$$

onde

- n : concentração do constituinte;
- t : tempo;
- P : termo de produção do constituinte;
- L : termo de perda do constituinte;
- $(n \vec{v})$: termo de transporte.

Quando o termo de transporte é desprezível em relação aos outros termos, tem-se a Equação fotoquímica:

$$\frac{dn}{dt} = P - L \quad (3.2)$$

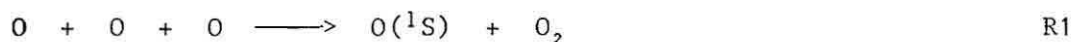
No caso do estado de equilíbrio fotoquímico ($\frac{dn}{dt} = 0$), a produção é igual a perda:

$$P = L \quad (3.3)$$

Os constituintes estudados no presente trabalho encontram-se na mesosfera e nesta região a condição de equilíbrio fotoquímico é uma boa aproximação.

3.2 - FOTOQUÍMICA DO OXIGÊNIO ATÔMICO

Chapman (1931) sugeriu que a principal fonte de emissão do oxigênio ($\lambda = 5577 \text{ \AA}$) envolvia a recombinação do átomo de oxigênio, seria em um único passo



devido às dificuldades de se explicar emissão volumétrica e também o pico da emissão, Barth e Hilderbrand (1961) propuseram um mecanismo com dois passos



que hoje é o mais aceito, mas devido às incertezas nas taxas de reações, ainda não pode ser descartado o mecanismo de Chapman.

As alturas dos picos de emissão do OI 5577 medidas por fotômetro a bordo de foguetes em diversos experimentos estão na Tabela 3.1, e o perfil vertical de emissão medido está na Figura 3.1.

TABELA 3.1

OBSERVAÇÕES GLOBAIS DO OI 5577 COM FOGUETES

Data	Local	Latitude e Longitude	Pico (Km)	Referência
1973-Fev	Thumba	8N, 76 E	102	Kulkarni, 1976
1975-Mar	Kiruna	68N, 7 W	97	Witt et al., 1979
1975-set	South Uist	57N, 7 W	97	Thomas et al., 1979
1977-Jul	White Sands	32N, 106W	96	Thomas e Young, 1981
1982-Mar	South Uist	57N, 7 W	97	Greer et al., 1986

3.2.1 - Mecanismo de Chapman

Calcula-se a concentração de $O(^1S)$ pelo mecanismo de Chapman, utilizando o equilíbrio fotoquímico, e as reações R1, R4 e R5 que estão na Tabela 3.5.

P	L
$K_1 [O]^3$	$[O(^1S)] (\sum_i K_u^i [Mi] + A_5)$

onde $Mi = O, O_2, N_2$

Assim, tem-se:

$$[O(^1S)] = K_1 [O]^3 / (A_5 + \sum_u^i [M_i]) \quad (3.4)$$

3.2.2 - Mecanismo de Barth

Para calcular a concentração de $O(^1S)$ pelo mecanismo de Barth, é necessário calcular-se antes a concentração de O_2^* .

Utilizam-se em ambos os casos o equilíbrio fotoquímico e as reações R2, R3, R4, R5, R6 e R7 que estão na Tabela 3.5.

P	L
$\alpha_2 K_2 [O]^2 [M]$	$[O_2^*] (\sum_i K_6^i [Mi] + A_7)$

Assim, tem-se:

$$[O_2^*] = \alpha_2 K_2 [O]^2 [M] / (A_7 + \sum_i K_6^i [Mi]) \quad (3.5)$$

P	L
$\alpha_3 K_3 [O_2^*] [O]$	$[O(^1S)] (\sum_i K_4^i [Mi] + A_5)$

$$[O(^1S)] = \alpha_3 K_3 [O_2^*] [O] / (A_5 + \sum_i K_4^i [Mi]) \quad (3.6)$$

Substituindo (3.5) em (3.6), tem-se:

$$[O(^1S)] = \alpha_3 K_3 [O]^3 \alpha_2 K_2 [M] / [(A_5 + \sum_i K_4^i [Mi]) (A_7 + \sum_i K_6^i [Mi])] \quad (3.7)$$

3.3 - FOTOQUÍMICA DO SÓDIO

A concentração do sódio é obtida utilizando o equilíbrio fotoquímico, a reação de produção do Na é:



as reações de perda R19 e R20 estão na tabela 3.6.

P	L
$[\text{NaO}][\text{O}] K_{18}$	$[\text{Na}]([\text{O}_3] K_{19} + A_{20})$

As alturas dos picos de emissão da linha 5893 realizadas por fotômetros a bordo de foguetes em diversos experimentos são apresentadas na Tabela 3.2. O perfil vertical de emissão medido desta linha está na Figura 3.2.

TABELA 3.2

OBSERVAÇÕES DO NaD COM FOGUETES

Data	Local	Latitude e Longitude	Pico (Km)	Refêrencia
1955-Dez	White Sands	32N,106W	84	Koomen et al., 1956
1956-Jul	White Sands	32N,106W	93	Heppner et al., 1956
1957-Mar	White Sands	32N,106W	89	Tousey, 1958
1965-Oct	Woomera	31S,137E	89	Greer e Best, 1967
1975-Mar	Kiruna	68N, 21E	89	Stegman e Witt, 1977

3.4 - FOTOQUÍMICA DO $O_2A(0,1)$

Meinel (1950 c), foi o pioneiro na investigação da Banda atmosférica $O_2A(0,1)$ 8645 Å. Aqui tem-se novamente dois mecanismos para explicar a fotoquímica do $O_2A(0,1)$. O primeiro é a recombinação direta e o segundo mecanismo é do tipo Barth, via precursor.

As alturas dos picos de emissão da banda $O_2A(0,0)$ realizadas por fotômetros a bordo de foguetes em diversos experimentos são apresentadas na Tabela 3.3. O perfil vertical de emissão medido desta banda está na Figura 3.1.

TABELA 3.3

OBSERVAÇÕES GLOBAIS DO $O_2(0,0)$ COM FOGUETES

Data	Local	Latitude e Longitude	Pico (Km)	Refêrencia
1974-Nov	F.Churchill	59N, 94W	91	Deans, 1976
1975-Jan	Uchimoura	31N, 131E	94	Watanabe et al., 1981
1975-mar	Kiruna	68N, 21E	94	Witt et al., 1979
1982-mar	South Uist	57N, 7,4E	95	Greer et al., 1986

3.4.1 - Mecanismo por Recombinação Direta

Para calcular a concentração do $[O_2]$, utilizam-se as reações R2, R8 e R9 que estão na Tabela 3.5.

P	L
$\epsilon K_2 [O]^2 [M]$	$[O_2 (b^1 \sum_g^+)] (\sum_i K_8^i [M_i] + A_9)$

Então, tem-se:

$$[O_2 (b^1\sum_g^+)] = \epsilon K_2 [O]^2 [M] / A_9 + \sum K_8^1 [Mi] \quad (3.8)$$

Ainda, há muita incerteza no coeficiente ϵ . Deans et al. (1976) adotam $\epsilon = 0,17$.

3.4.2 - Mecanismo via Precursor O_2^*

Para calcular a concentração de $O_2 (b^1\sum_g^+)$ pelo mecanismo via precursor, faz-se necessário antes determinar a concentração do O_2^* . Utiliza-se em ambos os casos o equilíbrio fotoquímico e também as reações R2, R11, R6, R7, R9 e R10 que estão na Tabela 3.5.

P	L
$\alpha_2 K_2 [O]^2 [M]$	$[O_2^*] (\sum_i K_6^i [Mi] + A_7)$

Então, tem-se:

$$[O_2^*] = \alpha_2 K_2 [O]^2 [M] / (A_7 + \sum K_6^i [Mi]) \quad (3.9)$$

P	L
$K_{11} [O_2^*] [O_2]$	$[O_2 (b^1\sum_g^+)] (\sum_i K_{10}^i [Mi] + A_9)$

Então, tem-se:

$$[O_2(b^1\Sigma_g^+)] = K_{11}[O_2^*][O_2]/(A_9 + \sum_i K_{10}^i[Mi]) \quad (3.10)$$

Substituindo 3.10 em 3.11, tem-se:

$$[O_2(b^1\Sigma_g^+)] = \frac{K_{11}[O_2][O]^2 \alpha_2 K_2[M]}{(A_9 + \sum_i K_{10}^i[M])(A_7 + \sum_i K_6^i[Mi])} \quad (3.11)$$

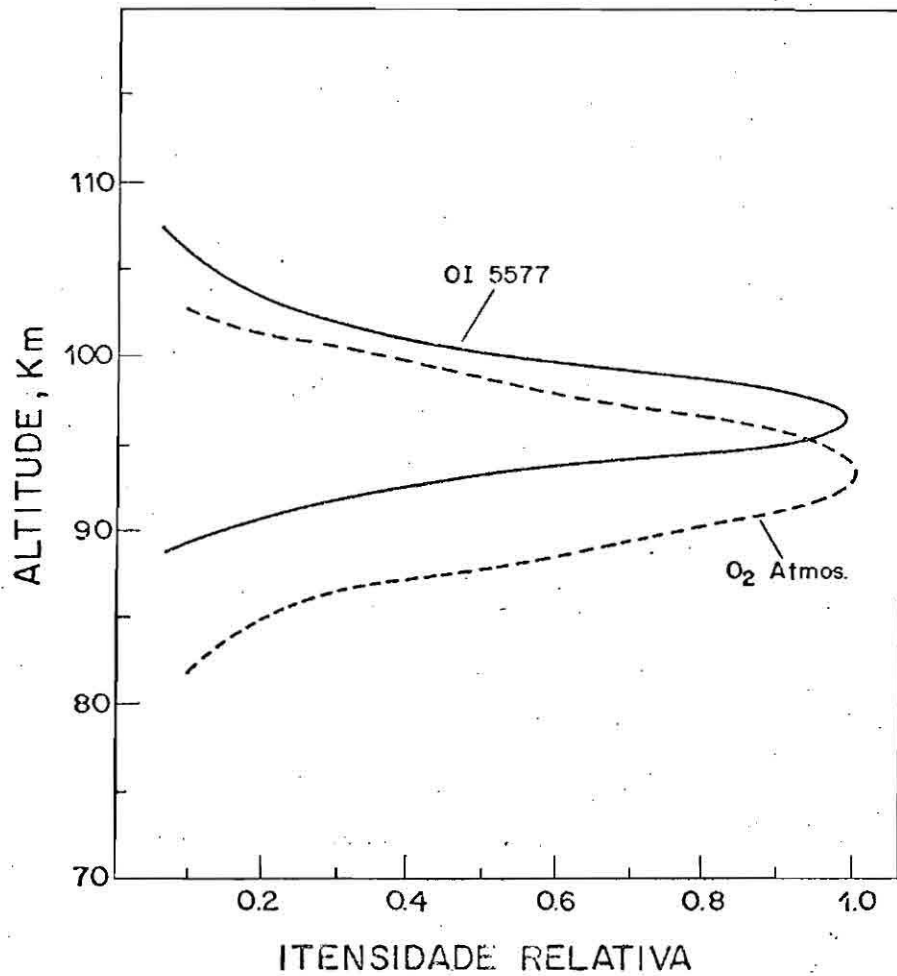


Fig. 3.1 - Perfil vertical das emissões OI 5577 (Thomas et al., 1979) e $O_2A(0,0)$ (Witt et al., 1979).

3.5 - MECANISMO FOTOQUÍMICO DO OH

As bandas de OH de Meinel, devidas às transições vibracionais - rotacionais dentro do estado fundamental eletrônico, têm sido estudadas durante as três últimas décadas. No entanto ainda existem muitas incertezas, que são abordadas nesta seção.

O mecanismo proposto por Bates e Nicolet (1950) é geralmente aceito como o principal mecanismo de produção de OH:



No entanto, alguns autores propõem a reação 13 como a reação secundária para explicar a distribuição populacional dos níveis vibracionais (Krassovsky, 1971; Susuki e Tohmatsu, 1976; Nagy et al., 1976; Takahashi e Batista, 1980, 1981; Turnbull e Lowe, 1983). A Tabela 3.4 mostra as alturas dos picos de emissão do OH em diversas localidades no mundo, e a Figura 3.2 mostra o perfil vertical do OH (8,3) medido.

TABELA 3.4

OBSERVAÇÕES GLOBAIS DE OH COM FOGUETES

Data	Local	Latitude e Longitude	pico (Km)	Banda	Referência
1973-Abr	White Sands	32N, 106W	87	1,34μ	Good, 1976
1975-Jan	Uchinoura	31N, 131E	90	OH(7,2)	Watanabe et al., 1981
1975-Mar	Kiruna	68N, 21E	87	OH(8,3)	Witt et al., 1979
1977-Jul	White Sands	32N, 106E	88	1,7μ	Thomas e Yong, 1981
1982-Mar	South Uist	57N, 7,4W	95	OH(8,3)	Greer et al., 1986

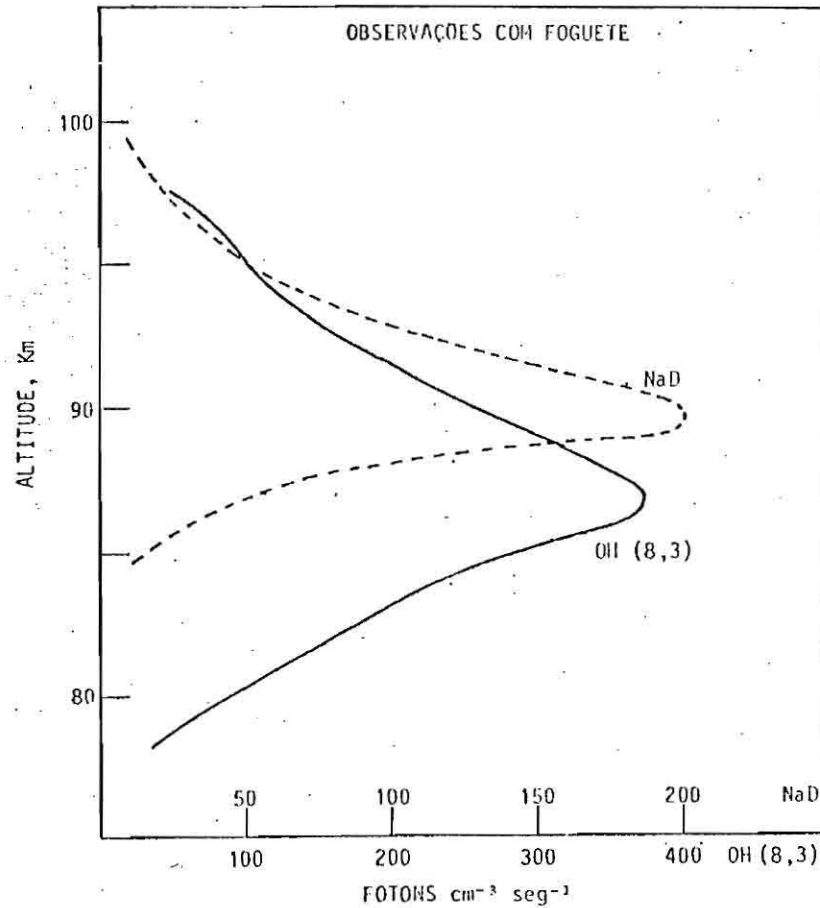
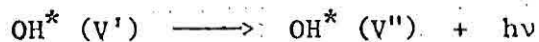


Fig. 3.2 - Perfil vertical das emissões NaD 5893 (Stegman e Witt, 1977) e OH (8,3) (Witt et al., 1979).

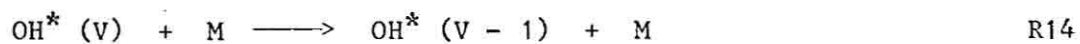
A molécula do OH* excitada irradia com uma probabilidade $A_{v'v''}$, mas existe muitas incertezas nos cálculos dos coeficientes de Einstein para OH



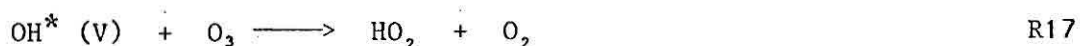
R15

Murphy (1971) determinou experimentalmente as probabilidades relativas de transição e Mies (1974) determinou as probabilidades teóricas de transição, Takahashi e Batista (1981) mostraram que as probabilidades de Murphy têm uma melhor concordância com medidas simultâneas, com $\Delta V = 3, 4, 5, 6$.

A desativação do OH^* por colisão envolve o processo abaixo, mas também existe muita incerteza na taxa de reação e a dependência da mesma com v .



A perda de OH^* envolve o O e o O_3



A concentração de OH , em um dado estado vibracional é feita utilizando-se a desativação por efeito cascata de um único salto quântico e a equação de equilíbrio fotoquímico.

P	L
$K_{12}[\text{O}_3][\text{H}] + K_{13}[\text{HO}_2][\text{O}] +$ $+ K_{14}[\text{OH}_{v+1}][\text{M}] +$ $+ \sum_{v' > v} A(v', v) [\text{OH}^*_{v'}]$	$[\text{OH}v] (K_{14}^a[\text{M}] + \sum_{v' < v} A(v, v') + K_{16}[\text{O}] +$ $+ K_{17}[\text{O}_3])$

Então, tem-se:

$$[\text{OH}^*_v] = \frac{K_{12}[\text{O}_3][\text{H}] + K_{13}[\text{HO}_2][\text{O}] + K_{14}[\text{OH}_{v+1}][\text{M}] + \sum_{v' > v} A(v', v) [\text{OH}^*_{v'}]}{K_{14}^a[\text{M}] + K_{16}[\text{O}] + K_{17}[\text{O}_3] + \sum_{v' < v} A(v, v')}$$

(3.12)

TABELA 3.5

REAÇÕES QUÍMICAS DO O E O₂;
 cm^3/seg ; $\text{cm}^6/\text{seg e seg}^{-1}$

	REAÇÃO	COEFICIENTE DE REAÇÃO	REFERÊNCIA
R1	$\text{O} + \text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(^1\text{S})$	$K_1 = 1,4 \times 10^{-30} \exp(-650/T)$	Slanger and Black (1976)
R2	$\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$	$K_2 = 4,7 \times 10^{-33} (300/T)^2$	Campbell and Gray (1973)
R2 ^a	$\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^* + \text{M}$	$K_2^a = \alpha_2 K_2$	_____
R3	$\text{O}_2^* + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(^1\text{S})$	$K_3 = \alpha_6 K_6$	_____
R4 ^a	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{M}_1 \rightarrow \text{O} + \text{M}_1$	K_4	_____
R4 ^b	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{O} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$K_4^a \leq 2 \times 10^{-14}$	Slanger and Black (1981)
R4 ^c	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$K_4^b = 4 \times 10^{-12}$	Slanger and Black (1972)
R4 ^d	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$	$K_4^c = 0$	Slanger and black (1981)
R5	$\text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O}(^3\text{P}, ^1\text{D}) + h\nu$	$A_5 = 1,35$	Nicolais et al. (1971)
R5 ^a	$\text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + h\nu$	$A_5^a = 1,18$	Nicolais et al. (1971)
R6	$\text{O}_2^* + \text{M}_1 \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}_1$	K_6^i	_____
R6 ^a	$\text{O}_2^* + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	$K_6^a = \begin{cases} 8 \times 10^{-17} \\ 0 \end{cases}$	_____
R6 ^b	$\text{O}_2^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$K_6^b = 4 \times 10^{-12}$	_____
R6 ^c	$\text{O}_2^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	K_6^c	_____
R7	$\text{O}_2^* \rightarrow \text{O}_2 + h\nu$	A_7	_____
R8	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) + \text{M}_1 \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}_1$	K_8^i	_____
R8 ^a	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	$K_8^a \leq 8 \times 10^{-14}$	Slanger and Black (1979)
R8 ^b	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$K_8^b = 4 \times 10^{-17}$	Martin et al. (1976)
R8 ^c	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$K_8^c = 2,2 \times 10^{-15}$	Martin et al. (1976)
R9	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow \text{O}_2 + h\nu \text{ (total)}$	$A_9 = 0,083$	Vallance (1974)
R9 ^a	$\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow \text{O}_2 + h\nu \text{ (Banda A)}$	A_9^a	_____
R10	$\text{O}_2^* + \text{M}_1 \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}_1$	K_{10}	_____
R10 ^a	$\text{O}_2^* + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	K_{10}^a	_____
R10 ^b	$\text{O}_2^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	K_{10}^b	_____
R10 ^c	$\text{O}_2^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	K_{10}^c	_____
R11	$\text{O}_2^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2(b^1\Sigma_g^+) + \text{O}_2$	$K_{11} = \alpha_{10} K_{10}^b$	_____

TABELA 3.6

REAÇÕES QUÍMICAS DO OH E Na;
 $\text{cm}^3/\text{seg.}$ cm^6/seg e seg^{-1}

	REAÇÃO	COEFICIENTE DE REAÇÃO	REFERÊNCIA
R12	$\text{O}_3 + \text{H} \rightarrow \text{OH}^* (v \leq 9) + \text{O}_2$	$\alpha = 0,75$ $K_{12} = \alpha \times 1,5 \times 10^{-12} \times \sqrt{T}$	Nicolet (1970)
R13	$\text{HO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH}^* (v \leq 6) + \text{O}_2$	$K_{13} = 3 \times 10^{-12} \times \sqrt{T}$	Nicolet (1970)
R14	$\text{OH}^*(v) + \text{M} \rightarrow \text{OH}^*(v-1) + \text{M}$	$K_{14} = 5 \times 10^{-15}$ $= 4,4 \times 10^{-12}, v=5$ $= 5,6 \times 10^{-12}, v=6$ $= 5,8 \times 10^{-12}, v=7$ $= 5,6 \times 10^{-12}, v=8$ $= 4 \times 10^{-12}, v=9$	Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978)
R15	$\text{OH}^* (v') + \text{OH}^* (v) \rightarrow \sum hv$	$A_{15} = 300 \text{ s}^{-1}$	Mies (1974)
R16	$\text{OH}^* + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2$	$K_{16} = 4 \times 10^{-11}$ $= 4 \times 10^{-11}, v=1$ $= 9,5 \times 10^{-10}, v=5$ $= 1,09 \times 10^{-10}, v=6$ $= 1,23 \times 10^{-10}, v=7$ $= 1,36 \times 10^{-10}, v=8$ $= 1,5 \times 10^{-10}, v=9$	Wilson (1973) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978) Llewellyn et al. (1978)
R17	$\text{OH} (v) + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$	$K_{17} = 1,82 \times 10^{-12} \exp(-930/T)$	Ravishankara et al. (1979)
R18	$\text{NaO} + \text{O} \rightarrow \text{Na} + \text{O}_2$	$K_{18} = 1,6 \times 10^{-10}$	Kolb e Elgin (1976)
R19	$\text{Na} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$	$K_{19} = 3,3 \times 10^{-10}$	Kolb e Elgin (1976)
R20	$\text{Na}^* + \text{Na} \rightarrow hv$	$K_{20} = 6,3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$	Kolb e Elgin (1976)

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E REDUÇÃO DE DADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

A temperatura rotacional do OH é obtida fazendo-se medidas simultâneas dos ramos Q e R. Este método foi apresentado por Meinel (1950b) e utilizado por Sivjee et al. (1972) e Takahashi et al. (1974). Suas vantagens se devem ao fato das linhas do ramo R serem próximas, agrupando-se dentro de 15 Å, e do ramo Q(1) ter a intensidade em torno de 15% do total da banda.

Já a temperatura rotacional do O₂A (0,1) tem o ramo P medido em duas posições (P₁ e P₂), de tal forma que a relação entre P₁ e P₂ possibilite a medida da temperatura rotacional.

4.2 - FOTÔMETRO

O fotômetro instalado em Cachoeira Paulista, possui alojamento para 6 filtros, sendo que 5 dos alojamentos são ocupados por filtros de interferência.

Como a curva de transmissão dos filtros depende da temperatura, os alojamentos são mantidos a uma temperatura constante de $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Segundo Eather e Reasoner (1969), o deslocamento da curva de transmissão é de aproximadamente $0,25 \text{ Å}/^{\circ}\text{C}$.

A fotomultiplicadora (PMT) utilizada é do tipo R943-02/Hamamatsu, e é mantida a uma temperatura de 0°C . O alojamento de número 6, que é tapado por uma superfície preta, faz um acompanhamento da variação do ruído térmico da PMT.

Cada um dos filtros mede a intensidade de uma linha ou de uma banda do espectro noturno.

Quando um dos filtros entra no eixo óptico, um motor faz com que o filtro se incline de um ângulo θ , permitindo, desta forma, medir intensidade de um certo comprimento de onda desejado. Logo após o filtro é inclinado para um outro ângulo e será medida a intensidade em um outro comprimento de onda distante, aproximadamente, 30 a 40 Å do comprimento de onda desejado e, desta forma, obtemos a medida do fundo astronômico, que num intervalo de 80 Å permanece aproximadamente constante. Na Tabela 4.1 tem-se os comprimentos de onda no qual são medidas as linhas, os ramos que serão medidas as bandas OH (9,4) e O₂A (0,1) e os comprimentos de onda nos quais são medidos o fundo astronômico. A relação entre o ângulo de inclinação e o deslocamento do comprimento de onda, é dada por Eather e Reasoner, (1969):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = - \frac{\theta^2}{2\mu^2} \quad (4.1)$$

onde

λ_0 : comprimento de onda desejado;

μ : índice de refração efetivo do filtro;

θ : ângulo entre o feixe anormal ao eixo óptico.

Quando a varredura de um filtro termina, outro motor gira o disco, e assim, tem início a varredura de um outro filtro e, desta forma, uma sequência completa dos 6 alojamentos leva 2 minutos. Veja na Fig. 4.1, a descrição completa do fotômetro e das suas partes eletrônicas e de aquisição de dados.

Quando o comprimento de onda selecionado pelo filtro e pelo diafragma atinge o catodo (GaAs) da fotomultiplicadora, os fotoelétrons são emitidos, e estes fotoelétrons então, são multiplicados de $\sim 10^6$ elétrons pela multiplicadora, formando, assim,

um pulso de elétrons. Este pulso é amplificado pelo pré-amplificador e registrado pela registradora analógica e pelo gravador.

Este fotômetro foi projetado por H. Takahashi e construído na oficina mecânica do INPE/MCT. A parte eletrônica, exceto as registradoras analógicas, foram projetadas e construídas no laboratório Laser/INPE; o fotômetro foi calibrado em Dez/1986 e em Jan/87 iniciaram-se as observações.

TABELA 4.1

LINHA OU RAMO MEDIDO POR CADA FILTRO E O COMPRIMENTO
DE ONDA EM QUE É MEDIDO O FUNDO ASTRONÔMICO

FILTRO	LINHA OU RAMO	FUNDO ASTRONÔMICO
1	OI (5577)	5540
2	NaD (5893)	5838
3	OI (6300)	6272
4	OH (9,4)-Q,R	7675
5	O ₂ A (0,1)-P	8572

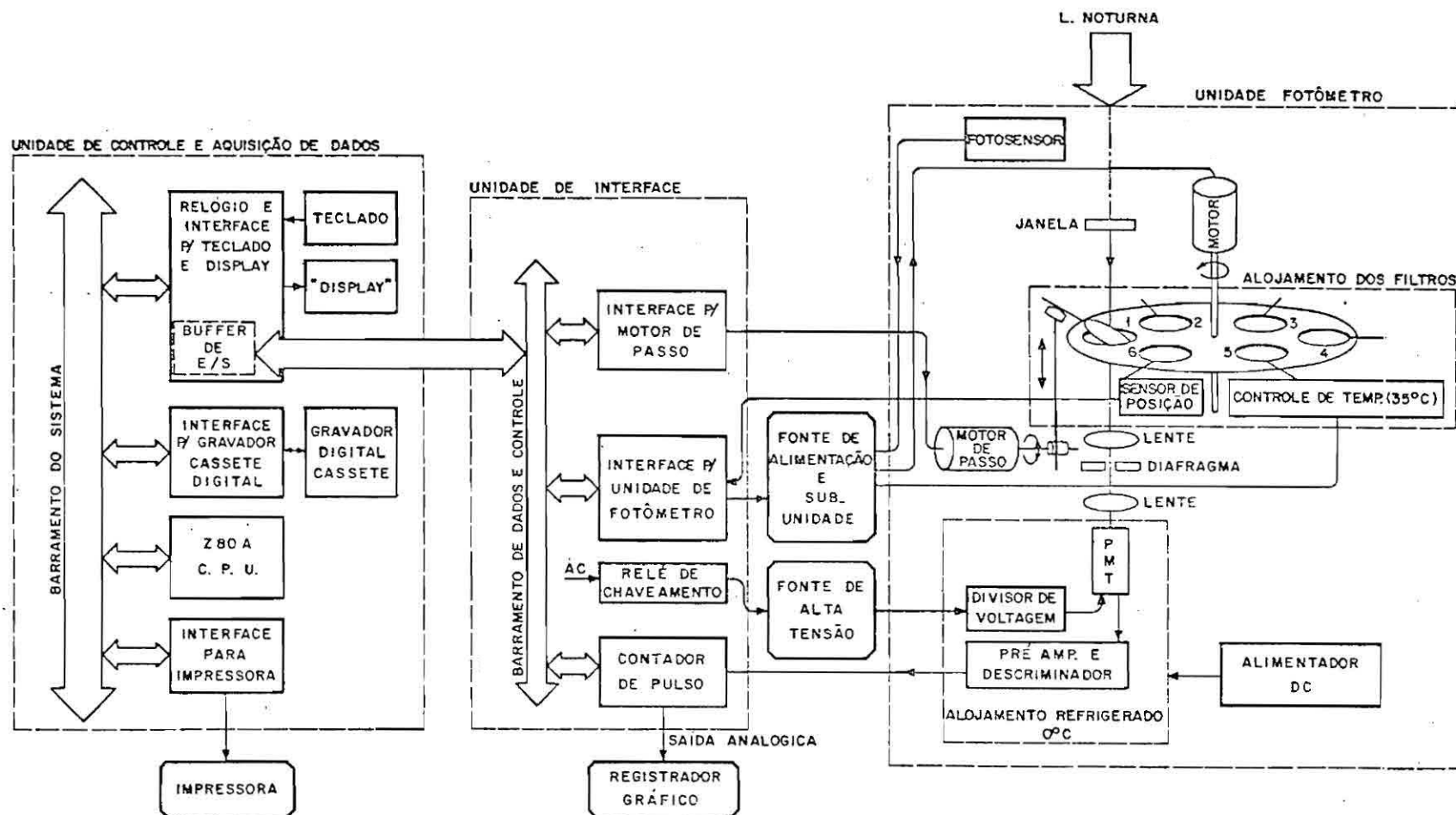


Fig. 4.1 - Diagrama de bloco do fotômetro, da unidade de aquisição de dados e das interfaces.

4.3 - CALIBRAÇÃO DO FOTÔMETRO

Dois parâmetros importantes do fotômetro são determinados em laboratório: a transmissão do filtro e a sensibilidade absoluta do fotômetro. Para cada um destes parâmetros é montado um arranjo experimental que é descrito nesta seção (veja Figs. 4.2, 4.3).

4.3.1 - Transmissão dos Filtros

Para determinar a transmissão, utiliza-se um monocromador de luz (Mc. Pherson, Mod 270), com resolução de $\sim 1 \text{ \AA}$. Um diagrama experimental é mostrado na Figura 4.2 .

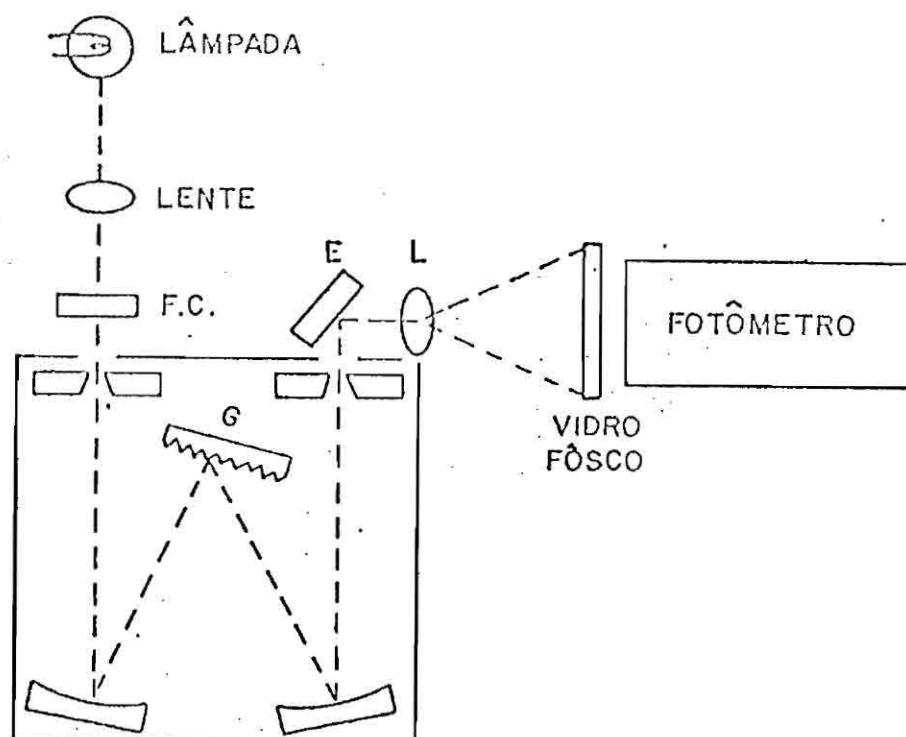


Fig. 4.2 - Arranjo experimental usado para medir a transmissão dos filtros.

O filtro de interferência é ajustado para um determinado comprimento de onda (λ_0) desejado. Logo após ajusta-se o monocromador para o comprimento de onda ($\lambda_0 - 30 \text{ \AA}$), de tal forma que ele realiza uma varredura até ($\lambda_0 + 30 \text{ \AA}$) com uma velocidade $0,2 \text{ \AA/seg}$ e, assim, obtém-se uma curva de transmissão que é dada por:

$$J_{\lambda,1} = \epsilon S(\lambda) T(\lambda) I(\lambda) \delta(\lambda) \quad (4.2)$$

onde:

J : resposta do fotômetro;

ϵ : fator que inclui fatores experimentais;

$S(\lambda)$: sensibilidade da fotomultiplicadora;

$T(\lambda)$: transmissão do filtro;

$I(\lambda)$: intensidade da luz do monocromador;

$\delta(\lambda)$: resolução do monocromador.

A seguir o mesmo procedimento acima é feito, mas sem o filtro e a resposta do fotômetro é dada por

$$J_{\lambda,2} = S(\lambda) I(\lambda) \delta(\lambda) \quad (4.3)$$

dividindo a Equação 4.2 pela 4.3 tem-se:

$$T(\lambda) = J_{\lambda,1}/J_{\lambda,2} \quad (4.4)$$

Este procedimento é feito para os cinco filtros possibilitando, desta forma, obter a curva de transmissão para cada comprimento de onda desejado (veja Figs. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6).

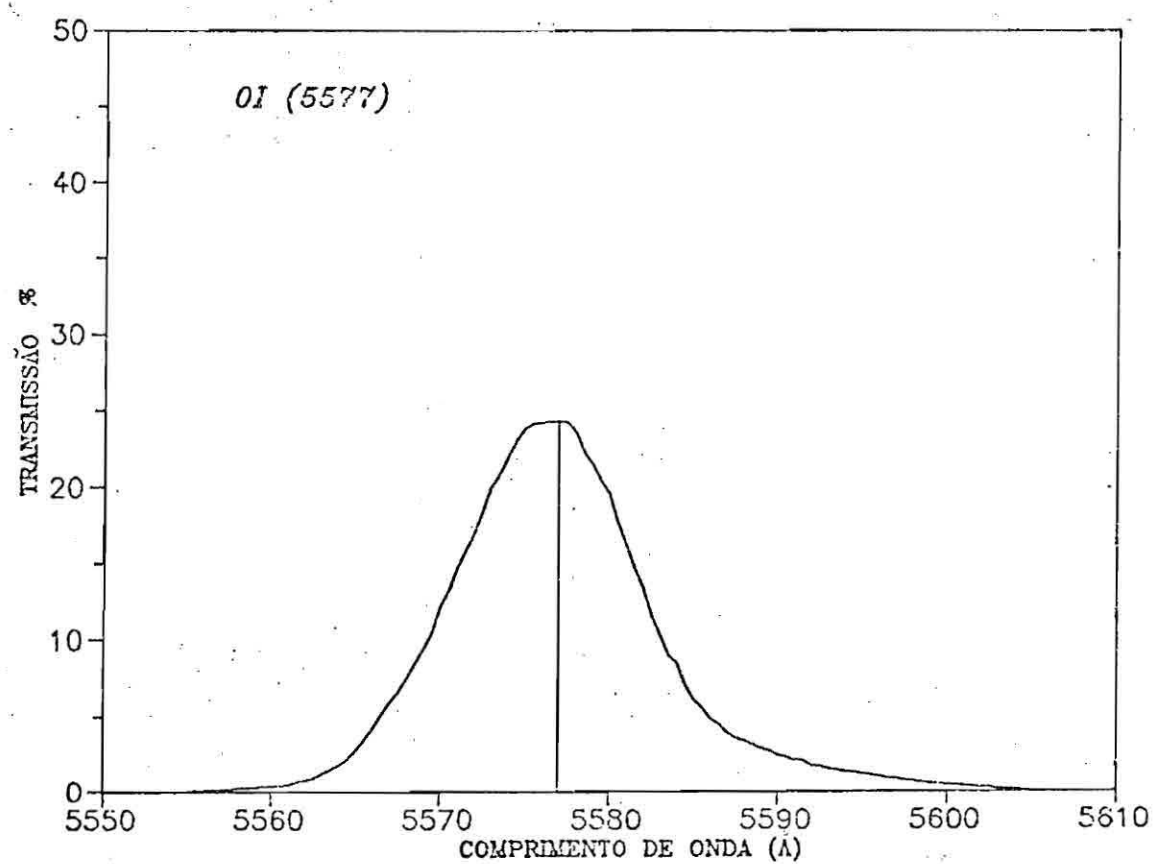


Fig. 4.3 - Transmissão do filtro que medirá a linha 5577.

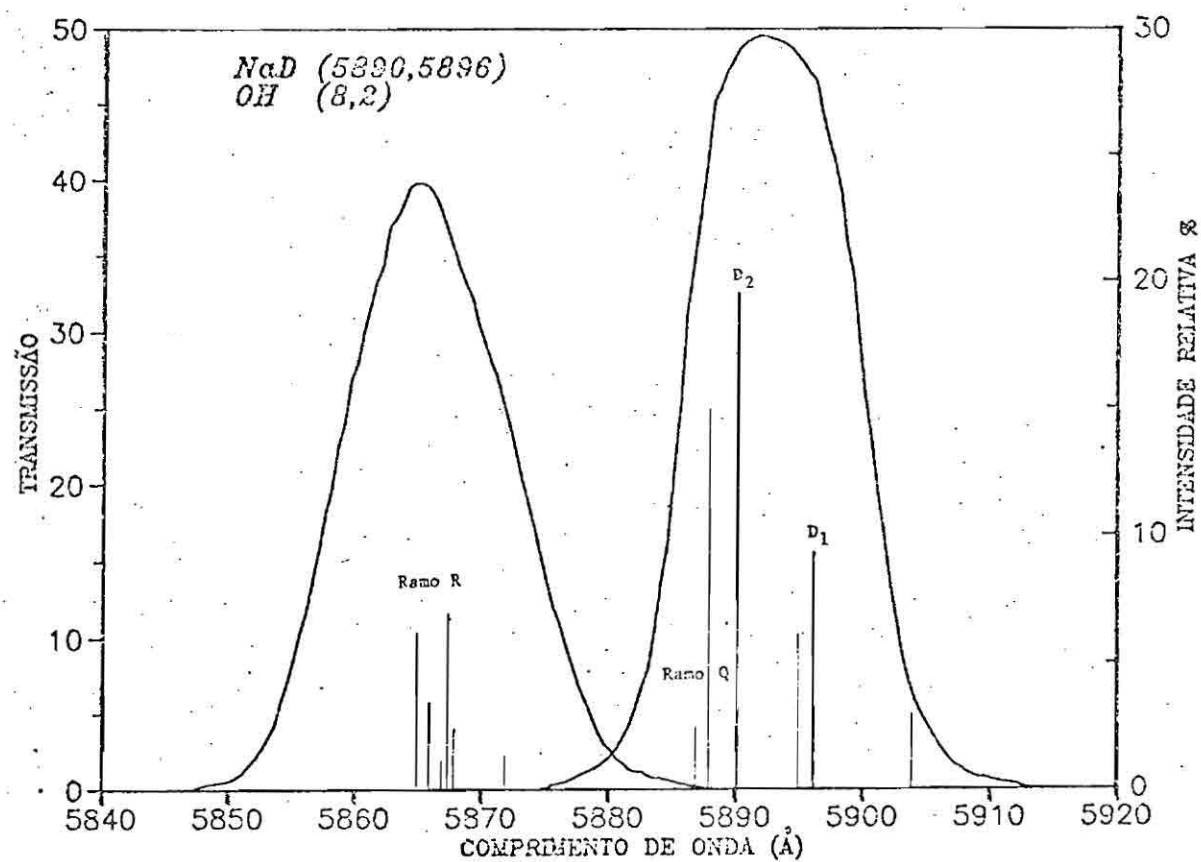


Fig. 4.5 - Transmissão do filtro 2 e as intensidades relativas das linhas rotacionais da banda OH (8,2) e as linhas de emissão do sódio D₁ e D₂.

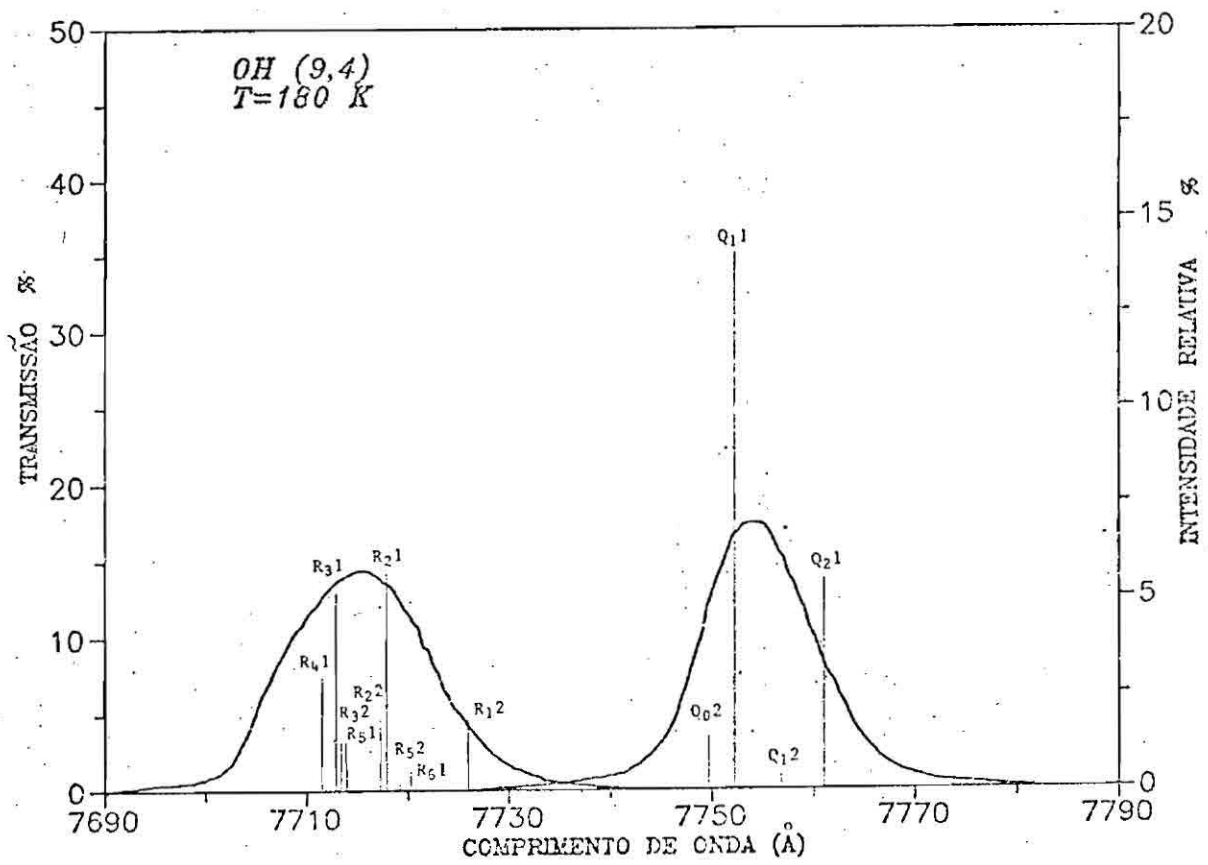


Fig. 4.4 - Transmissão do filtro 4 e as intensidades relativas das linhas rotacionais da banda OH (9,4).

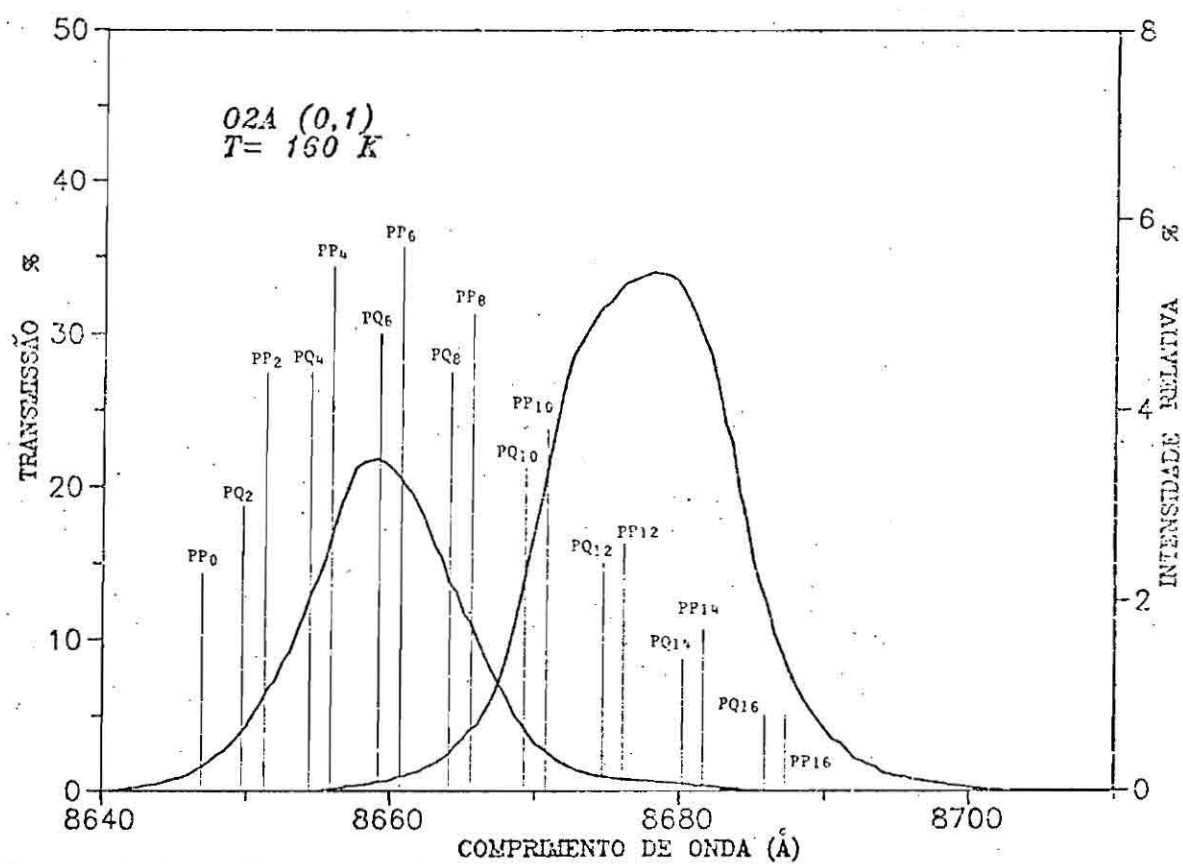


Fig. 4.6 - Transmissão do filtro 5 e as intensidades relativas da banda atmosférica $O_2A (0,1)$.

4.3.2 - Sensibilidade Absoluta

Para calcular a sensibilidade absoluta, $S(\lambda)$, utiliza-se uma lâmpada incandescente (ES8315), que fornece um fluxo de radiação $E(\lambda, d)$. O fabricante fornece a radiação E_{λ}^0 a uma distância de 50 cm, então a radiação a uma distância d é dada por:

$$E(\lambda, d) = \left(\frac{50}{d} \right)^2 E_{\lambda}^0 \quad (\text{W/cm}^2 \text{ nm}) \quad (4.5)$$

O arranjo experimental é então montado (veja Fig. 4.7). Coloca-se um difusor branco de pó de MgO a uma distância d da lâmpada; este difusor possui um índice de reflexão $K = 0,98$. A radiância do difusor é dada por (Kulkarni e Sanders, 1964):

$$B(\lambda, d) = \frac{K_{\lambda} E(\lambda, d)}{\pi} \quad (\text{W/cm}^2 \text{ str nm}) \quad (4.6)$$

ou

$$B(\lambda, d) = \frac{K_{\lambda}}{\pi} D(\lambda, d) \quad (\text{fótons/cm}^2 \text{ str nm}) \quad (4.7)$$

Têm-se também que:

$$D^0(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} E_{\lambda}^0 \quad (4.8)$$

onde

h : constante de Plank (J.s.);

c : velocidade da luz.

então:

$$D^0(\lambda) = 0,503 \times 10^4 \lambda E_{\lambda}^0 \quad (\text{fótons/cm}^2 \text{ Å}) \quad (4.9)$$

Então, utilizando as Equações 4.7 - 4.9, tem-se:

$$B(\lambda, d) = 1,569 \times 10^{13} \left(\frac{50}{d} \right)^2 \lambda E_{\lambda}^0 \quad (\text{fótons/cm}^2 \text{ str Å}) \quad (4.10)$$

A intensidade em Rayleigh é dada por:

$$I = \frac{4\pi B_{\lambda}}{10^6} \quad (4.11)$$

onde 1 Rayleigh = 10^6 fótons cm^2 (coluna) s^{-1} , então:

$$I(\lambda) = 1,972 \times 10^8 \left(\frac{50}{d} \right)^2 \lambda E_{\lambda}^0 \quad (\text{R}) \quad (4.12)$$

O fotômetro localiza-se na frente do difusor, a 30° do eixo do feixe principal (ver Fig. 4.7). A resposta do fotômetro observada pelo difusor é:

$$J = \int_{\lambda} S(\lambda) B(\lambda) d\lambda \quad (4.13)$$

Supondo que a radiância $B(\lambda)$ é constante na faixa de transmissão do filtro, tem-se:

$$J = S_{\lambda_0} B_{\lambda_0} \int_{\lambda} t(\lambda) d\lambda \quad (4.14)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda no pico de transmissão, e $t(\lambda)$ representa a transmissão relativa do filtro e é dada por:

$$T(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_0)} \quad (4.15)$$

A integral da $t(\lambda)$

$$\int_{\lambda} t(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \quad (\text{\AA}) \quad (4.16)$$

representa a largura efetiva do filtro. Portanto, a Expressão (4.14) torna-se:

$$J = B_{\lambda_0} S_{\lambda_0} \Delta\lambda \quad (4.17)$$

onde

$$S_{\lambda_0} = J/B_{\lambda_0} \Delta\lambda \quad \text{Pulso/W} \quad (4.18)$$

Então, tem-se:

$$S_{\lambda_0} = 1,58 \times 10^{-10} J/\lambda_0 B_{\lambda_0} \Delta\lambda \quad (4.19)$$

onde $1W = 6,32 \times 10^9 \lambda$ Rayleighs, e λ é expresso em $\text{\AA}$.

Os resultados do arranjo experimental encontram-se na Tabela 4.2.

TABELA 4.2

SENSIBILIDADE DO FOTÔMETRO

FILTRO	POSIÇÃO	λ Å	$\Delta\lambda$ Å ^o	ES 8315 R/A ^o	J CS/SEG	SK (λ) CS/R seg	T %
F1	1	5577	13,99	843,52	3123,80	31,06	24,32
5577	2	5540	17,37	820,18	2999,53	24,78	17,60
F2	1	5893	15,30	1074,18	8729,33	64,76	49,54
NaD	2	5865	15,46	1061,54	9320,14	69,30	39,86
	3	5838	19,05	1056,69	9954,43	60,35	37,86
F3	1	6300	14,64	1392,61	5550,00	18,65	22,07
6300	2	6272	16,30	1386,78	5059,00	15,38	16,86
F4	2	7749	14,09	2434,71	13397,72	23,11	17,44
OH(9,4)	3	7711	17,61	2422,55	12592,02	17,47	14,11
	4	7675	20,70	2411,49	11878,32	14,08	12,02
F5	1	8668	15,94	2928,49	35440,99	18,21	33,96
O2(0,1)	3	8659	13,28	2922,15	35177,59	21,74	21,79
	4	8572	20,98	2881,64	31081,59	12,33	18,07

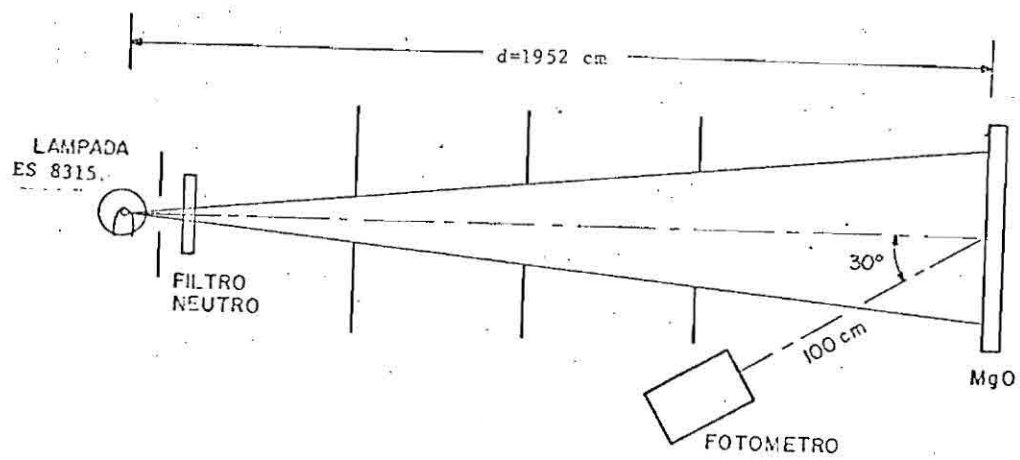


Fig. 4.7 - Arranjo experimental usado para determinar a sensibilidade absoluta do fotômetro.

4.3.3 - Redução dos Dados

Nesta Seção, mostra-se o método utilizado para a redução dos dados a fim de determinar as intensidades e as temperaturas rotacionais, utilizando as respostas do fotômetro para cada filtro.

Na redução dos dados:

J: resposta do fotômetro (contagem/segundos);

S: sensibilidade do fotômetro (contagem/segundos);

RT: ruído térmico (resposta do filtro 6);

BG: intensidade da luz contínua (nível de fundo) ($R/\text{\AA}$).

4.3.4 - Filtro 1 (5577)

$$J_1 = I_{5577} S_1 + BG S_1 \Delta \lambda_1 + RT \quad (4.20)$$

$$J_2 = I_{5577} S_2 + BG S_2 \Delta \lambda_2 + RT \quad (4.21)$$

Subtraindo o RT (resposta do filtro 6) das Equações 4.20 e 4.21, e depois substituindo 4.21 em 4.20, tem-se:

$$I_{5577} = \frac{J_1 - J_2 A}{S_1 (1 - B A)}$$

onde

$$A = \frac{S_1 \Delta \lambda_1}{S_2 \Delta \lambda_2} \quad (4.23)$$

$$B = \frac{S_2}{S_1} \quad (4.24)$$

4.3.5 - Filtro 2 (6300)

$$J_1 = I_{6300} S_1 + BG S_1 \Delta\lambda_1 + RT \quad (4.25)$$

$$J_2 = I_{6300} S_2 + BG S_2 \Delta\lambda_2 + RT \quad (4.26)$$

Fazendo o mesmo procedimento que foi feito para o filtro 1, tem-se:

$$I_{6300} = \frac{J_1 - J_2}{S_1 (1 - B/A)} \quad (4.27)$$

Segundo Silverman (1970) a componente do OI 5577 da região F ionosférica pelo processo de recombinação dissociativa é 20% da intensidade do OI 6300.

$$I_{5577}^E = I_{5577} - 0,2 I_{6300} \quad (4.28)$$

4.3.6 - Filtro 3 (5890, 5896)

$$J_1 = I^{90} S^{90} + I^{96} S_1^{96} + I_Q^{OH(8,2)} S_1 + BG S_1 \Delta\lambda_1 + RT \quad (4.29)$$

$$J_2 = I_R^{OH(8,2)} S_2 + BG \Delta\lambda_2 S_2 + RT \quad (4.30)$$

$$J_3 = BG S_3 \Delta\lambda_3 \quad (4.31)$$

Faz-se as seguintes aproximações:

$$I_Q^{OH(8,2)} \approx I_R^{OH(8,2)} \approx 5R \quad (4.32)$$

$$I_{NaD} = I^{90} + I^{96} = 1,5 I^{96} \quad (4.33)$$

De maneira análoga ao filtro 1, obtém-se:

$$I_{NaD} = \frac{1,5(J_1 - J_2 - 0,07 J_3)}{S_1^{96} (1 + 0,5(S_1^{90}/S_1^{96}))} \quad (4.34)$$

4.3.7 - Filtro 4 OH(9,4)

$$J_2 = \sum_{i_R}^{Q+R} I_i S_2^i + BG S_2 \Delta \lambda_2 + RT ; \quad Q+R \approx Q \quad (4.35)$$

$$J_3 = \sum_j^R I_j S_3^j + BG S_3 \Delta \lambda_3 + RT \quad (4.36)$$

$$J_4 = BG S_4 \Delta \lambda_4 + RT \quad (4.37)$$

Veja na Figura 4.5 as intensidades das linhas dos ramos Q e R.

Então, pode-se calcular a temperatura e a intensidade total da banda:

$$x = \frac{MR}{MQ} \quad (4.38)$$

$$MQ = \sum_i I_{t,i}^Q T_i \quad (4.39)$$

$$MR = \sum_j I_{t,j}^R T_j \quad (4.40)$$

onde

$I_{i,j}$: intensidade teórica das linhas dos ramos Q ou R;

$T_{i,j}$: transmissão das linhas Q ou R.

Análogo ao filtro 1, tem-se:

$$x = \left(\frac{J_3 - A_3 J_4}{J_2 - A_2 J_4} \right) \frac{S_2}{S_3} \quad (4.41)$$

onde

$$A_i = \frac{S_i \Delta \lambda_i}{S_4 \Delta \lambda_4} \quad (4.42)$$

Sabe-se dos cálculos teóricos que "x" tem uma dependência com a temperatura, então pode-se calcular a temperatura, com o auxílio da equação (veja Apêndice A):

$$\text{TOH}(9,4) = 4,3895 + 165,974 \times \quad (4.43)$$

A intensidade do ramo Q é dada por:

$$\text{MQ} = 9,63 \exp(-0,00472 \text{ TOH}) \quad (4.44)$$

Desta forma a intensidade total da banda OH(9,4) é:

$$\text{TOH}(9,4) = \frac{J - A J}{\text{MQ} S}$$

4.3.8 - Filtro 5 O₂A(0,1)

$$J_1 = \sum_i^P I_i S_2^i + \text{BG} S_1 \Delta\lambda_1 + \text{RT} \quad (4.46)$$

$$J_3 = \sum_i^P I_i S_3^i + \text{BG} S_2 \quad + \text{RT} \quad (4.47)$$

$$J_4 = \text{BG} S_4 \Delta\lambda_4 \quad (4.48)$$

Veja na Figura 4.6 as intensidades das linhas do ramo P.

De maneira análoga para o filtro 4 tem-se:

$$Y = \frac{\text{MP}_1}{\text{MP}_3} \quad (4.49)$$

$$Y = \left(\frac{J_1 - J_4 A_1}{J_3 - J_4 A_3} \right) \frac{S_3}{S_1} \quad (4.50)$$

$$\text{TO}_2 = 61,787 \exp(1,98454 Y) \quad (4.51)$$

$$MP = 9,281 \exp(-0,003052 \text{ TO}_2) \quad (4.52)$$

$$IO_2 = \frac{J_3 - A_3 J_4}{MQ S_2} \quad (4.53)$$

4.4 - ERROS

Existem vários tipos de erros: o erro experimental, o erro das aproximações teóricas, etc. Entre eles, o que tem mais importância, no presente trabalho, é aquele que influi nas relações para calcular as intensidades. Equações 4.22, 4.27, 4.34, 4.45 e 4.53 e, há aqueles que influem nas relações para calcular as temperaturas rotacionais 4.41 e 4.50.

Os erros estimados nos parâmetros envolvidos nas equações acima citadas são:

- fatores experimentais

sensibilidade do fotômetro, $S(\lambda)$: 5%;

transmissão do filtro, $T(\lambda)$: 10%;

largura de transmissão, : 5%;

- fatores de cálculo

intensidades teórica calculadas dos ramos I_Q , I_R e I_P
: 1%;

- respostas do fotômetro

J_1 , J_2 , J_3 e J_4 : 5%.

Consequentemente, o erro no cálculo de T_r e I depende de erros dos fatores acima mencionados.

4.4.1 - Absorção e Espalhamento da Luz pela Atmosfera

Quando o fotômetro está instalado no chão, deve-se considerar o efeito de absorção e espalhamento da luz pela baixa atmosfera. A absorção de radiação na atmosfera é, principalmente, devido ao ozônio e ao vapor d'água. Na região de comprimento de onda entre 7000 Å e 8000 Å, porém, o efeito de absorção é desprezível (menor que 2%). Em relação ao espalhamento da radiação, existem dois tipos: o espalhamento Rayleigh pelas moléculas N_2 e O_2 , e o espalhamento Mie pelos aerossóis na baixa atmosfera. Porém foi considerado que o efeito do espalhamento em média, é desprezível pelo fato de que a perda e o ganho se anulam.

Além disso, existe o espalhamento de fótons que foram refletidos pelo solo (albedo), apesar deste efeito ser bem menor, se comparado ao primeiro e segundo tipos de espalhamento.

4.4.2 - Resultado

Além dos erros sistemáticos, existem os erros aleatórios, como ruído aleatório do instrumento, a flutuação da transmissão da atmosfera, a rápida variação da própria intensidade da emissão.

Podemos estimar que os erros nas medidas de temperaturas e das intensidades são da ordem de:

temperatura rotacional absoluta; 10 K;

intensidade absoluta; 10%.

CAPÍTULO 5

OBSERVAÇÕES E RESULTADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

As observações das emissões e temperaturas rotacionais, utilizadas neste trabalho foram realizadas em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}\text{S}$, $45,0^{\circ}\text{W}$) desde janeiro de 87 até janeiro de 88. Antes do início e término das observações faz-se uma calibração para verificar a variação da sensibilidade do fotômetro, durante o período de observação.

Uma hora após o pôr do sol iniciam-se as observações que perduram até uma hora antes do nascer do sol. Como já foi dito anteriormente, a luminescência noturna é de baixa intensidade, e por este motivo são necessárias algumas condições especiais para que se realizem as observações:

- 1) período em torno da lua nova;
- 2) noites limpas e sem nuvens.

Durante o período de janeiro de 1987 a janeiro de 1988 foi possível fazer observações durante 58 noites; no entanto, em apenas 39 noites foi possível fazer observações por mais de 6 horas consecutivas. Como para estudar a variação noturna das emissões e das temperaturas rotacionais necessitam-se de noites com no mínimo 6 horas de observação, estas variações foram estudadas para 39 noites. Já para o estudo de variação sazonal das emissões e das temperaturas rotacionais foram utilizadas as 58 noites.

5.2 - AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

O fotômetro multicanal leva 2 minutos para dar uma volta completa na bandeja onde estão alojados os 6 filtros de interferência.

Então, a cada 2 minutos tem-se a medida da intensidade de uma certa emissão ou da temperatura rotacional. Estes dados são gravados em uma fita cassete, para posterior redução na qual também é feita uma média noturna das intensidades e das temperaturas. De posse dos dados de 2 em 2 minutos é feita uma interpolação de 5 em 5 minutos para todas as emissões (OI 5577, O₂A, NaD e OH (9,4) e para as temperaturas T_{O₂} e OH; em especial para as temperaturas faz-se uma média móvel de 3 pontos com os dados interpolados com o objetivo de suavizar os dados das temperaturas.

5.3 - VARIAÇÃO NOTURNA

Das 39 noites consideradas de boa qualidade, pode-se verificar que em cerca de 70% delas existe uma variação de longo período (> 12 horas). A sua principal característica é a variação noturna do OH (9,4). Esta emissão, no início da noite (18 horas) possui uma intensidade alta, mas com o avançar da noite esta emissão sofre um decréscimo significativo até por volta da meia noite, e após este horário a intensidade pode manter-se estável ou sofrer um ligeiro acréscimo (veja Figura 5.1). Pode-se, então, chamar as noites que possuem a característica acima de tipo 1. Estas observações concordam com as medidas de Takahashi et al. (1981).

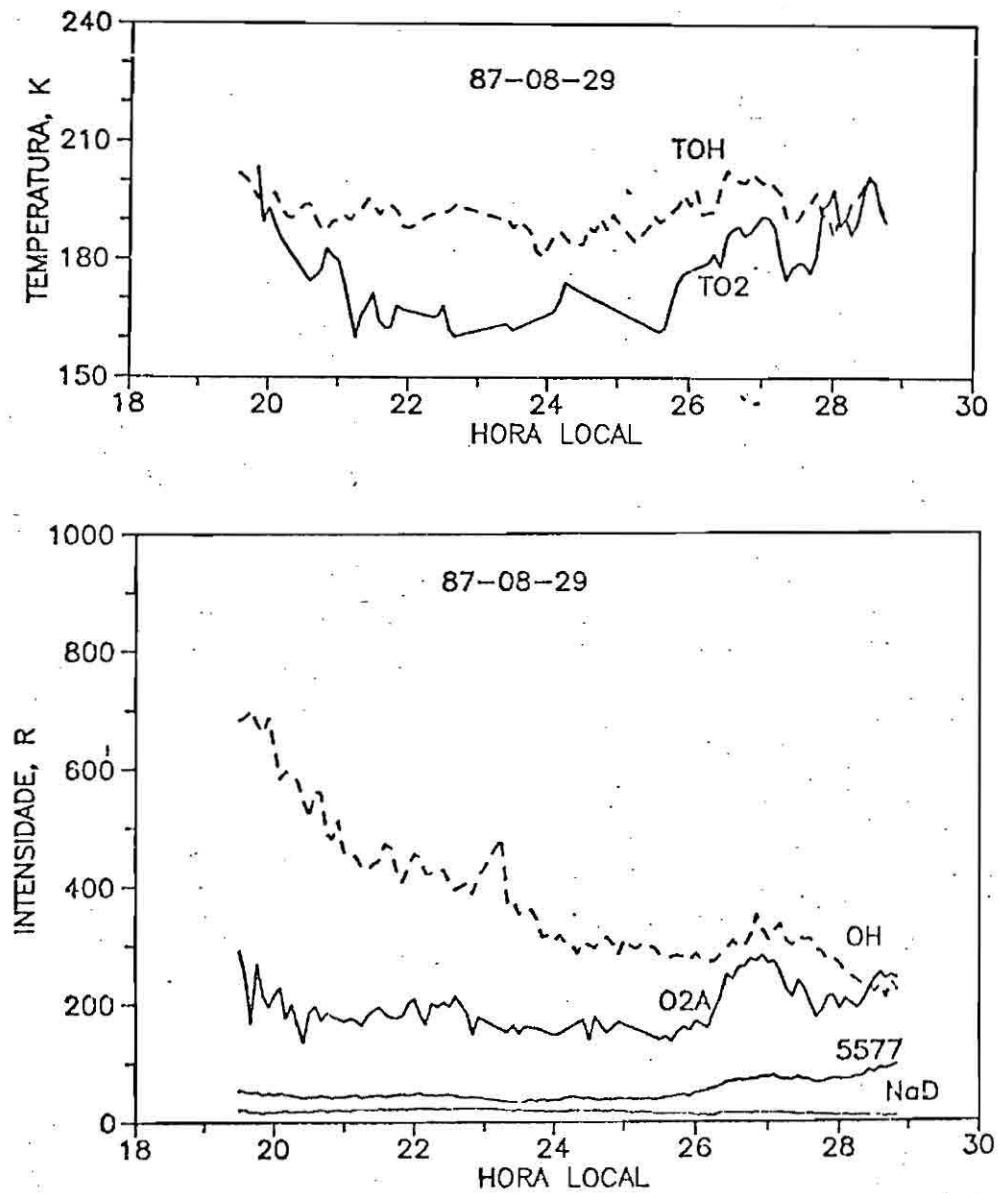


Fig. 5.1 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO₂ e das intensidades OI 5577, O₂A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-08-29.

Veja a variação noturna do OH (9,4) que caracteriza uma noite do tipo 1.

Já em algumas noites, pode-se verificar além de uma variação ondulatória das intensidades, uma grande variação na amplitude das mesmas ($> 50\%$); pode-se também verificar que existe um atraso na fase entre TO_2 e O_2A e também entre TOH e OH que pode ser visto nas Figuras 5.2 e 5.3, que são chamadas neste trabalho de noite do tipo 2. Estas observações concordam com as medidas de Takahashi et al. (1986).

Estas defasagens entre temperatura e intensidade e a grande variação da amplitude das intensidades sugerem que quando a mesosfera sofre uma perturbação do tipo ondulatória a resposta de uma dada emissão é diferente da sua respectiva temperatura rotacional.

Para estudar com mais detalhes estas defasagens foi feito um estudo de correlação nas 39 noites consideradas de boa qualidade e, com este estudo, pretende-se quantificar qual é a defasagem entre as emissões de OH e O_2A e as suas respectivas temperaturas.

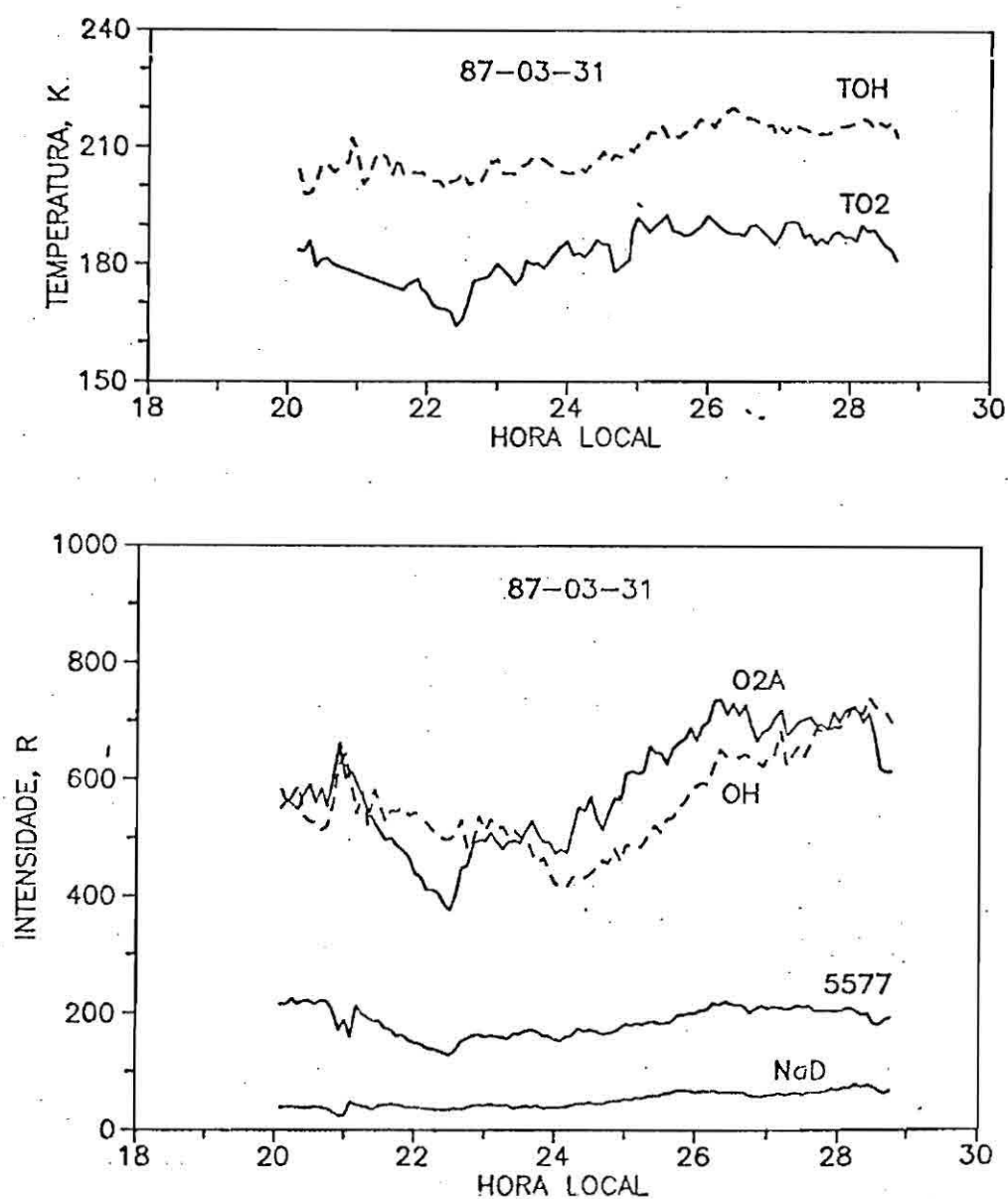


Fig. 5.2 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO₂ e das intensidades OI 5577, O₂A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-03-31.

Note a grande variação da amplitude das intensidades e uma diferença de fase entre a TOH e OH (9,4) e entre TO₂ e O₂A, o que caracteriza uma noite do tipo 2.

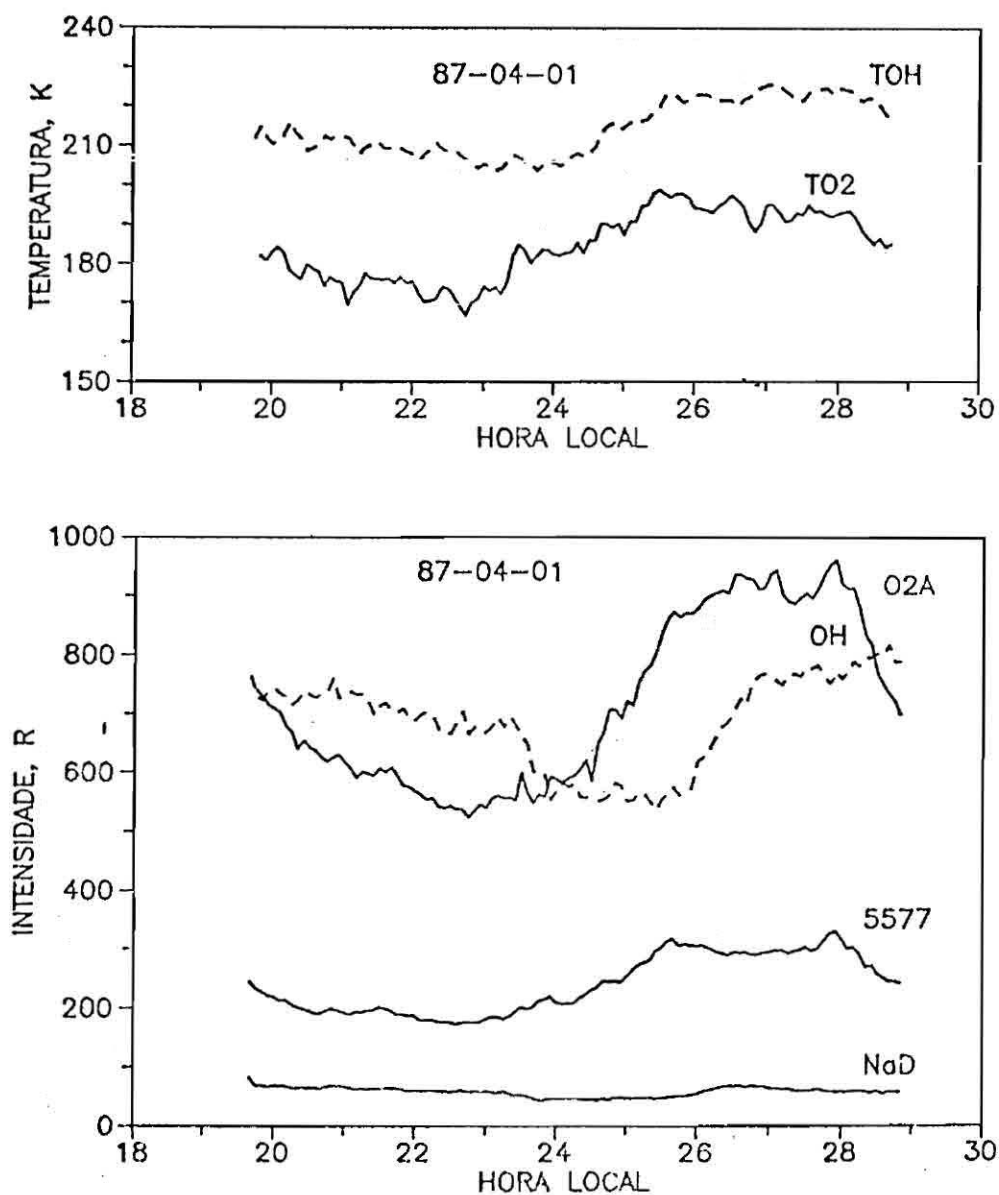


Fig. 5.3 - Variação noturna das temperaturas TOH e TO₂ e das intensidades OI 5577, O₂A, NaD e OH (9,4) na noite de 87-04-31

Note a grande variação da amplitude das intensidades e uma diferença de fase entre a TOH e OH (9,4) e entre TO₂ e O₂A; o que caracteriza uma noite do tipo 2.

5.4 - ESTUDO GERAL DA VARIAÇÃO NOTURNA DAS INTENSIDADES E DAS TEMPERATURAS

Com o objetivo de realizar um estudo geral do comportamento das emissões e das temperaturas rotacionais, utilizam-se as 39 noites consideradas de boa qualidade. Para cada noite faz-se uma normalização dos dados interpolados de 5 em 5 minutos das intensidades e das temperaturas, ou seja:

$$I_t = \frac{\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{i_{j,t}}{\bar{I}_j} \right\}}{n} \quad (5.1)$$

onde:

$\bar{I}$: intensidade ou temperatura média de uma noite;

i_t : intensidade ou temperatura interpolada de 5 em 5 minutos;

t : $t = 18:00, 18:05, 18:10, \dots, 30:00$ hrs;

n : número de noites que possui dados num certo horário t ;

I : intensidade ou temperatura normalizada.

E desta forma obtém-se as médias normalizadas das intensidades e das temperaturas. Pode-se ver nas Figuras 5.6 e 5.7, que a intensidade do OI 5577 e O₂A possui máximos no início e no fim da noite e um mínimo por volta da meia noite; já as intensidades do Na e do OH possuem um máximo no início da noite, um ligeiro acréscimo no final da noite e um mínimo por volta da 1:00 hora.

A média normalizada das temperaturas pode ser vista na Fig. 5.6; no entanto, a amplitude de variação das temperaturas é bem

menor que as das intensidades, mas mesmo assim, nota-se uma pequena diminuição na TOH, TO₂ por volta da meia noite e na TO₂ nota-se um acréscimo a partir da 1:00 hora.

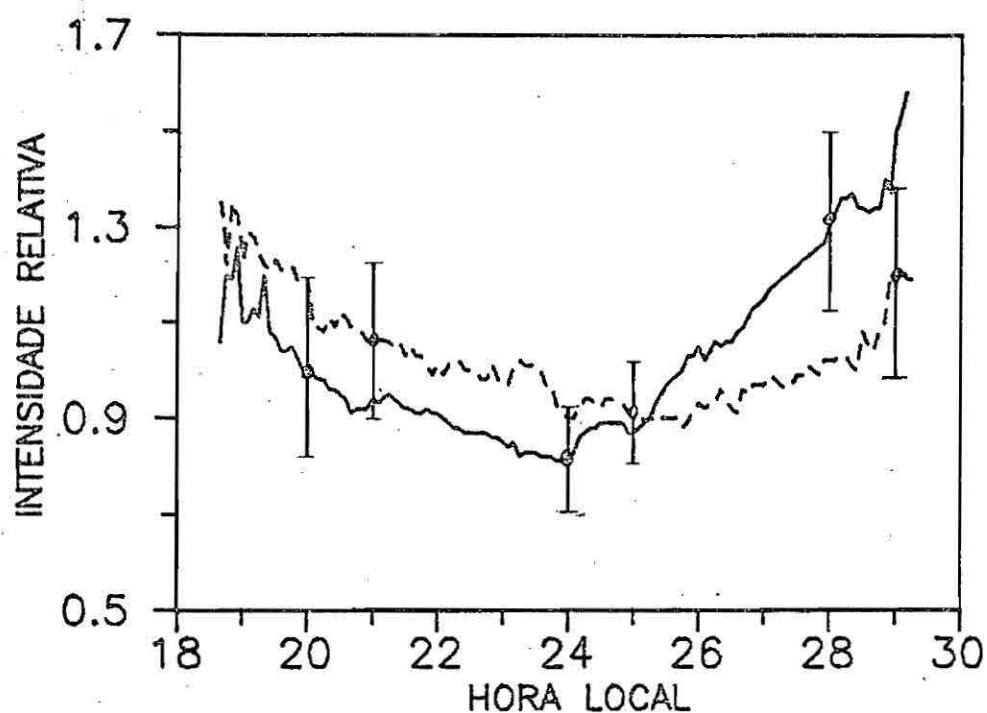


Fig. 5.4 - Variação noturna da média normalizada das intensidades OI 5577 e NaD.

A linha contínua mostra a variação do OI 5577 e a linha tracejada mostra a variação do NaD, em ambos os casos foram utilizadas 39 noites.

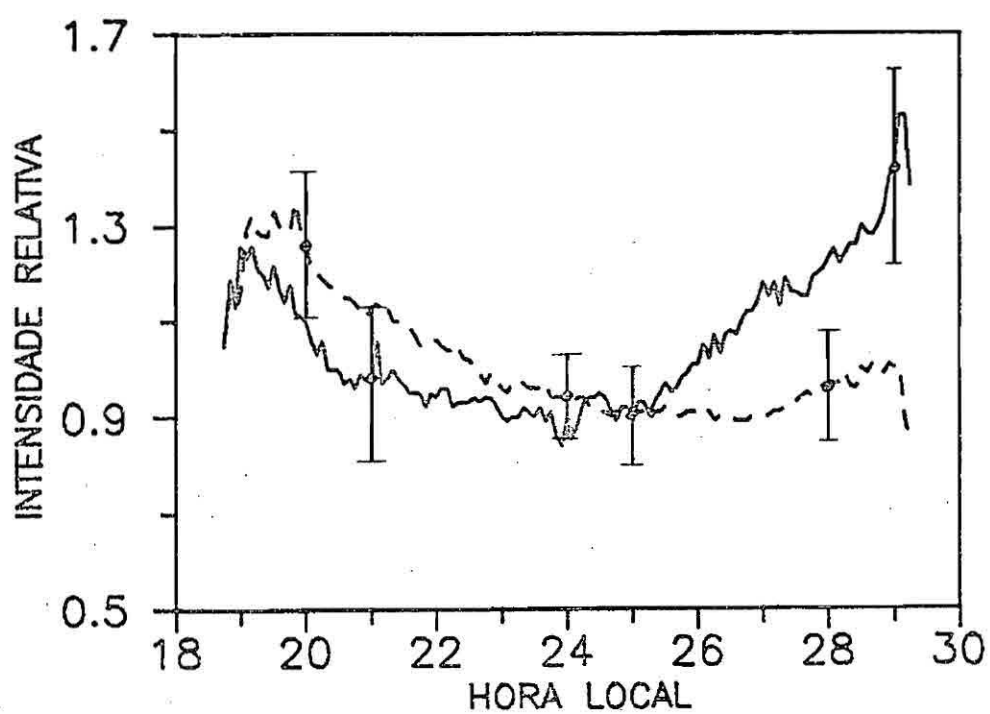


Fig. 5.5 - Variação noturna da média normalizada das intensidades O_2A e $OH(9,4)$.

A linha contínua mostra a variação do O_2A e a linha tracejada mostra a variação do $OH(9,4)$, em ambos os casos foram utilizadas as 39 noites.

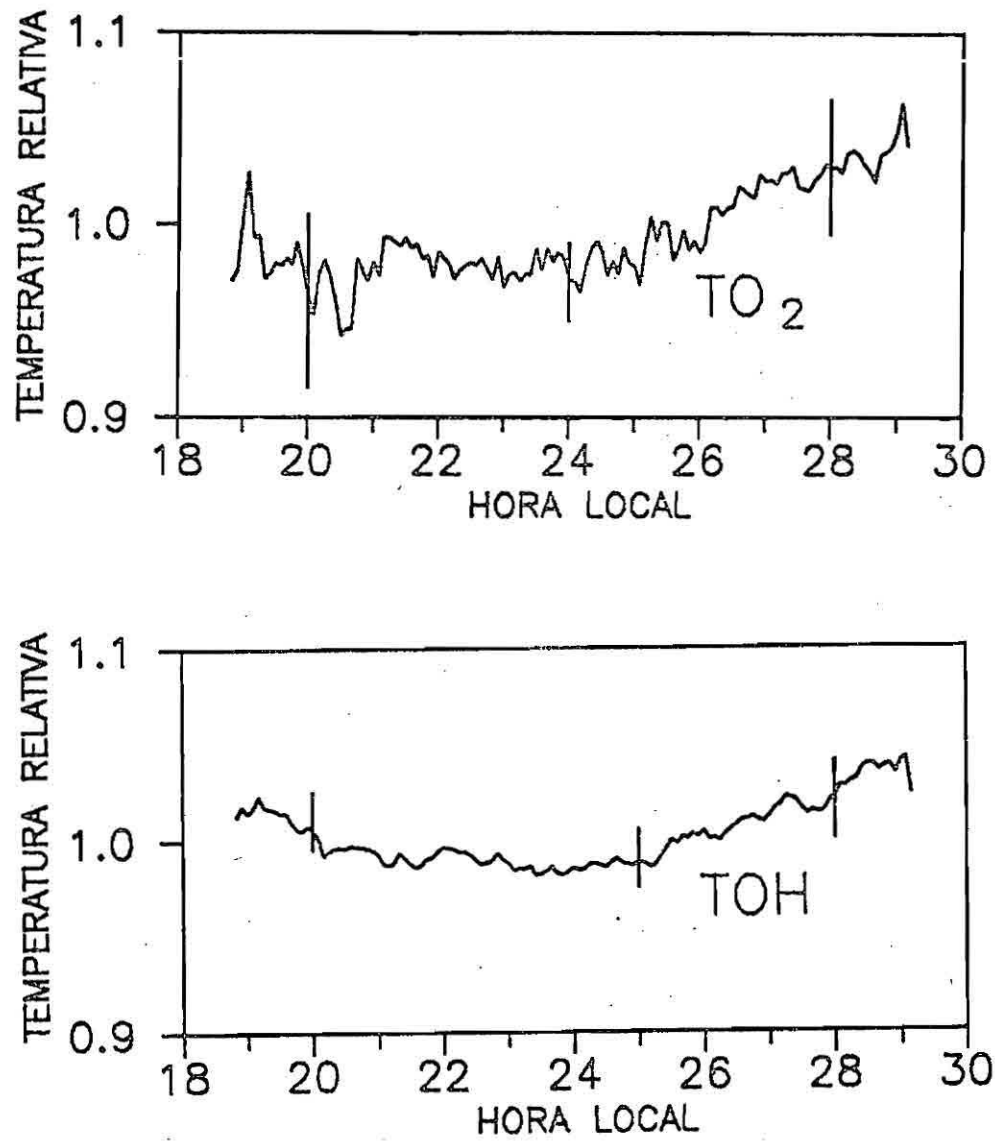


Fig. 5.6 - Variação noturna da média normalizada das temperaturas TO_2 e TOH .

Em ambos os casos foram utilizadas as 39 noites.

5.5 - VARIAÇÃO SAZONAL DAS INTENSIDADES E DAS TEMPERATURAS ROTACIONAIS

As médias mensais das intensidades (OI 5577), O_2A , NaD e OH (9,4) estão plotadas na Figura 5.7 e as médias mensais das temperaturas estão plotadas na Figura 5.8.

Pode-se observar que as intensidades das emissões OI 5577 e O_2A apresentam uma variação sazonal com máximos em março e outubro. Já a intensidade da emissão NaD apresenta uma variação sazonal com máximos em abril e outubro. Pode-se ver também na Fig. 5.7a que o mínimo da emissão apresentado no inverno é maior do que o mínimo apresentado no verão. Este fato pode ser explicado porque a emissão do sódio é proporcional à concentração do [Na] e $[O_3]$. O sódio apresenta um mínimo na sua concentração no verão (Simonich et al., 1979, e o ozônio apresenta uma variação semianual com mínimos no inverno e verão (Kirchhoff et al., 1981; Thomas et al., 1984).

Para a emissão OH (9,4) não temos uma conclusão definitiva sobre a sua variação sazonal, devido à grande dispersão dos dados.

A variação sazonal do OI 5577 e O_2A estão de acordo com as observações de Takahashi (1986).

Também pode-se observar a variação sazonal da temperatura TO_2 com máximo em outubro e uma variação sazonal da TOH com máximos em abril e setembro.

Devemos salientar que o período estudado foi somente de 1 ano e, para estudos sazonais, 1 ano de observação é pouco considerando a grande variabilidade dos dados.

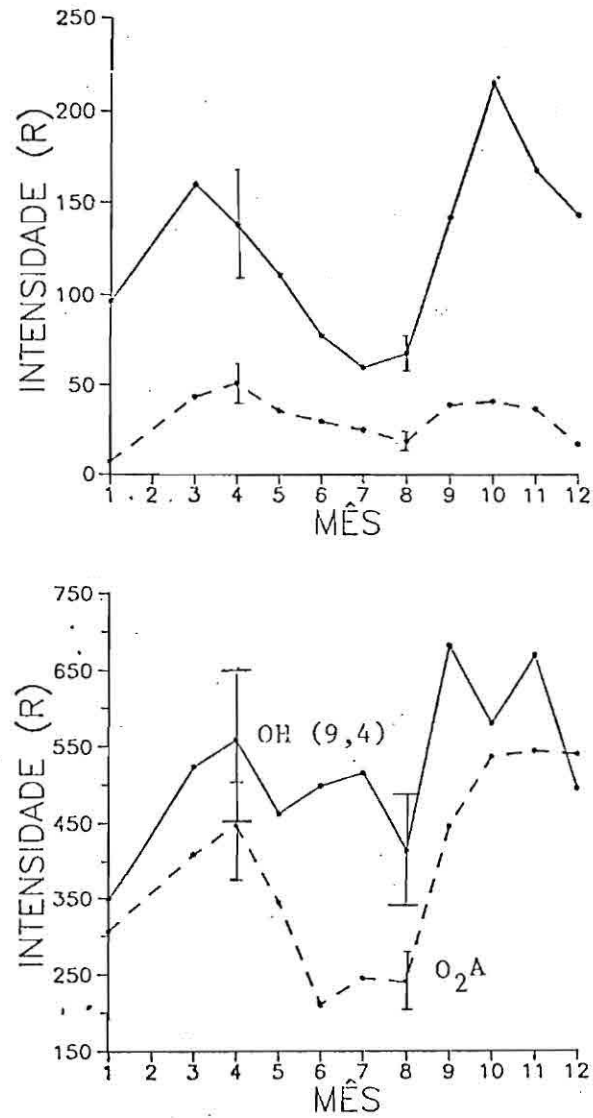


Fig. 5.7 - Variação mensal das intensidades das emissões NaD, OH 5577, O₂A e OH (9,4).

As linhas tracejadas indicam a variação das emissões NaD e O₂A e as linhas contínuas indicam a variação das emissões OH 5577 e OH (9,4).

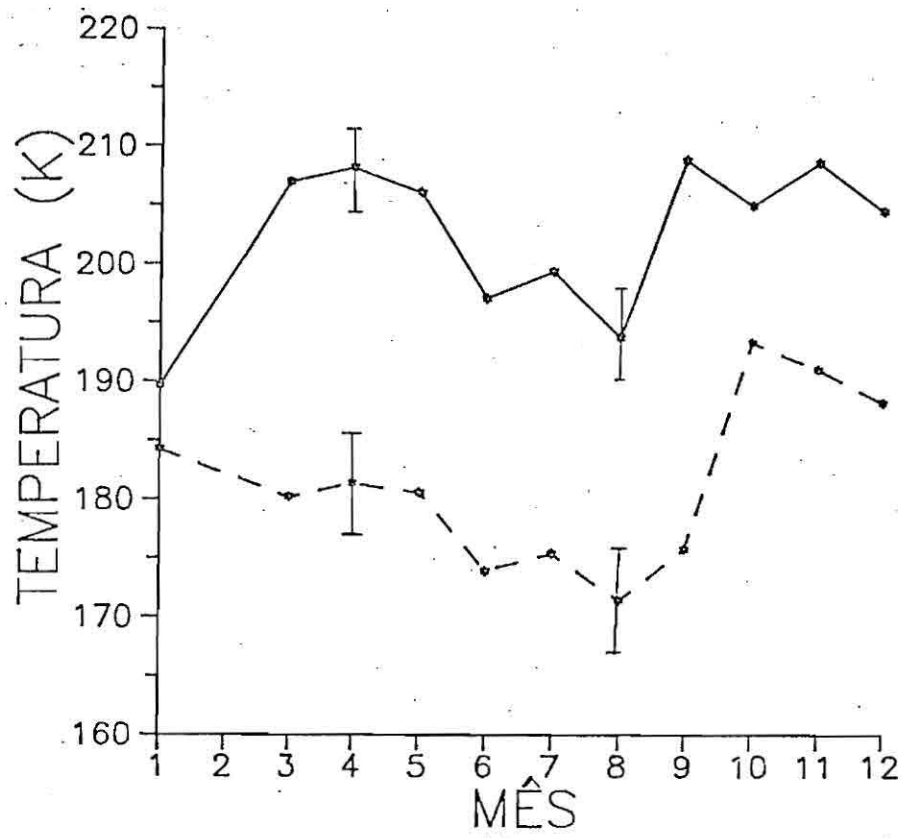


Fig. 5.8 - Variação mensal das temperaturas rotacionais TO_2 e TOH .

A linha contínua indica a variação mensal da TO_2 , a linha tracejada indica a variação mensal da TOH .

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO

Neste capítulo discute-se a variação noturna das intensidades OH (9,4) e O₂A (0,1) e das temperaturas rotacionais TOH e TO₂. Discutem-se também as defasagens entre O₂A (0,1) e TO₂ e entre OH (9,4) e TOH e as velocidades verticais que são calculadas utilizando as defasagens entre as emissões observadas OI 5577, O₂A (0,1), NaD 5893 e OH (9,4) e as medidas das temperaturas TOH e TO₂.

6.1 - VARIAÇÃO NOTURNA DAS INTENSIDADES E DAS TEMPERATURAS

O objetivo desta Seção é discutir a variação noturna das intensidades OH (9,4) e O₂A (0,1), e das temperaturas rotacionais TOH e TO₂, nas noites onde observou-se uma perturbação na variação noturna das intensidades.

Nas noites onde observou-se uma grande variação na amplitude das intensidades, sugerindo a propagação de ondas pela mesosfera, calculou-se a amplitude da temperatura e, estes cálculos nos indicam que a amplitude de variação da TO₂ é maior do que a amplitude de variação da TOH. Também pode-se observar uma defasagem entre as intensidades O₂A (0,1) e OH (9,4) nos gráficos 5.2 e 5.3, e que a variação da intensidade de OH (9,4) é atrasada em relação à intensidade O₂A (0,1).

Hines (1960) e Frederick (1979) mostram, através de modelos teóricos, que a energia de uma onda gerada na baixa atmosfera na presença de gravidade (ondas de gravidade), propaga-se para cima; a amplitude desta onda é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade atmosférica, e sabe-se que a densidade atmosférica decai exponencialmente com a altura. Além disso, o modelo teórico prevê a propagação de uma fase de cima para baixo.

Noxon (1978) confirma tais previsões através de medidas simultâneas de TO_2 e TOH . Estas previsões são novamente confirmadas no presente trabalho, pois observou-se uma amplitude de variação da TO_2 maior que do TOH e também pode-se verificar a propagação de fase de cima para baixo.

6.2 - ESTUDO DAS INTENSIDADES DAS EMISSÕES PERTURBADAS POR ONDAS DE GRAVIDADE

Nas 39 noites selecionadas, pode-se notar dois tipos de variação noturna das intensidades: o primeiro tipo de noite é aquele que apresenta uma variação noturna das intensidades de período longo chamada caso 1 neste trabalho; o segundo tipo é aquele em que a variação noturna das intensidades possui um período médio ou curto (12 a 6 horas). Nestas noites observa-se uma perturbação nas intensidades, consistente com a propagação de ondas de gravidade; neste trabalho, este tipo de variação noturna é chamado caso 2.

Quando se pode observar uma grande variação nas intensidades das emissões, com período entre 6 e 12 horas, nota-se uma defasagem entre a intensidade O_2A (0,1) e TO_2 e também entre OH (9,4) e TOH ; estas defasagens sugerem um estudo de correlação.

6.2.1 - Estudo de Correlação

As intensidades e as temperaturas são observadas a cada 2 minutos. Com estes dados faz-se uma interpolação de 5 em 5 minutos para os 6 parâmetros medidos (OI 5577, O_2A (0,1), NaD 5893, OH (9,4), TO_2 e TOH). Como foi dito anteriormente, as noites escolhidas possuem no mínimo 6 horas de observação; existem portanto, 72 pontos interpolados de 5 em 5 minutos, para cada um dos parâmetros estudados.

Para estudar a defasagem fazem-se os cálculos da correlação adiantada e atrasada no tempo, por exemplo, estuda-se a correlação entre O_2A (0,1) e TO_2 .

Montam-se 2 vetores com N elementos, onde:

$A_i(\tau)$: valores interpolados de 5 em 5 minutos do O_2A (0,1);

B_i : valores interpolados de 5 em 5 minutos do TO_2 ;

i : índice que varia de 1 até N ;

τ : defasagem;

N : número de pontos correlacionados.

A correlação é dada por:

$$r(\tau) = \frac{N \sum_i A_i(\tau) B_i - \sum_i A_i(\tau) \sum_i B_i}{[N \sum_i A_i(\tau) - (\sum_i A_i(\tau))^2]^{1/2} [N \sum_i B_i^2 - (\sum_i B_i)^2]^{1/2}} \quad (6.1)$$

A correlação adiantada é obtida fazendo positivo ($\tau = 5, 10, 15, \dots$, 180 minutos), a correlação atrasada é obtida fazendo negativo ($\tau = -5, -10, -15, \dots$, -180 minutos). Depois que é feita a correlação para as 39 noites faz-se a correlação conjunta de todas as noites.

Na Figura 6.1 pode ser vista a correlação de uma noite de período longo (caso 1). Note-se que este tipo de noite apresenta uma correlação bastante irregular, não apresentando nenhuma tendência específica. Já nas noites de períodos médios e curtos (caso 2), Figuras 6.2 e 6.3, pode-se observar uma correlação regular e uma clara tendência ondulatória.

A análise conjunta das 39 noites além de possuir uma correlação muito baixa não tem nenhuma tendência, o que é de se esperar já que 70% das noites são do tipo caso 1 e, como pode ser visto na Figura 6.1, este tipo de noite apresenta uma correlação bastante irregular.

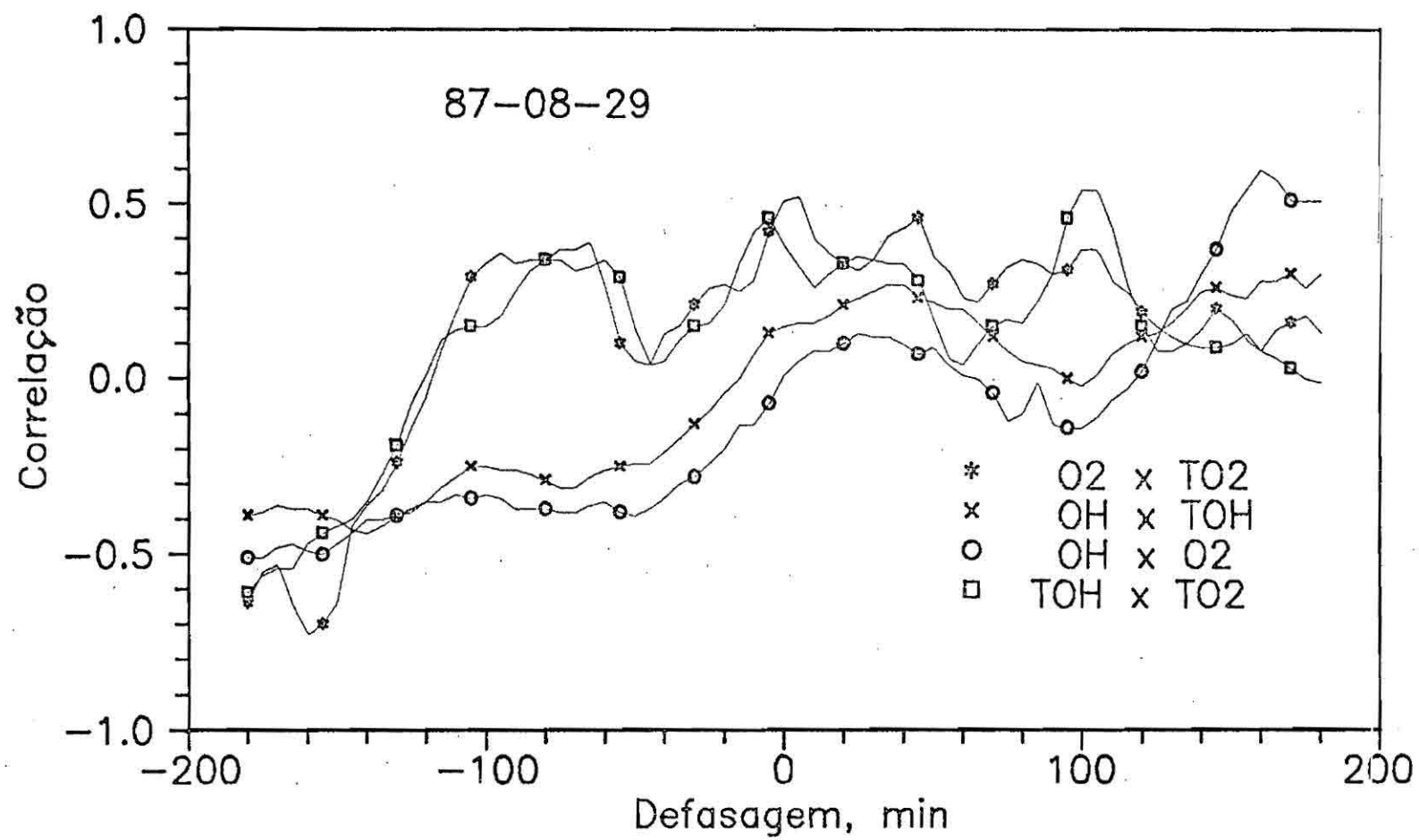


Fig. 6.1 - Correlação cruzada entre O_2 e TO_2 , OH e TOH, OH e O_2 , TOH e TO_2 .

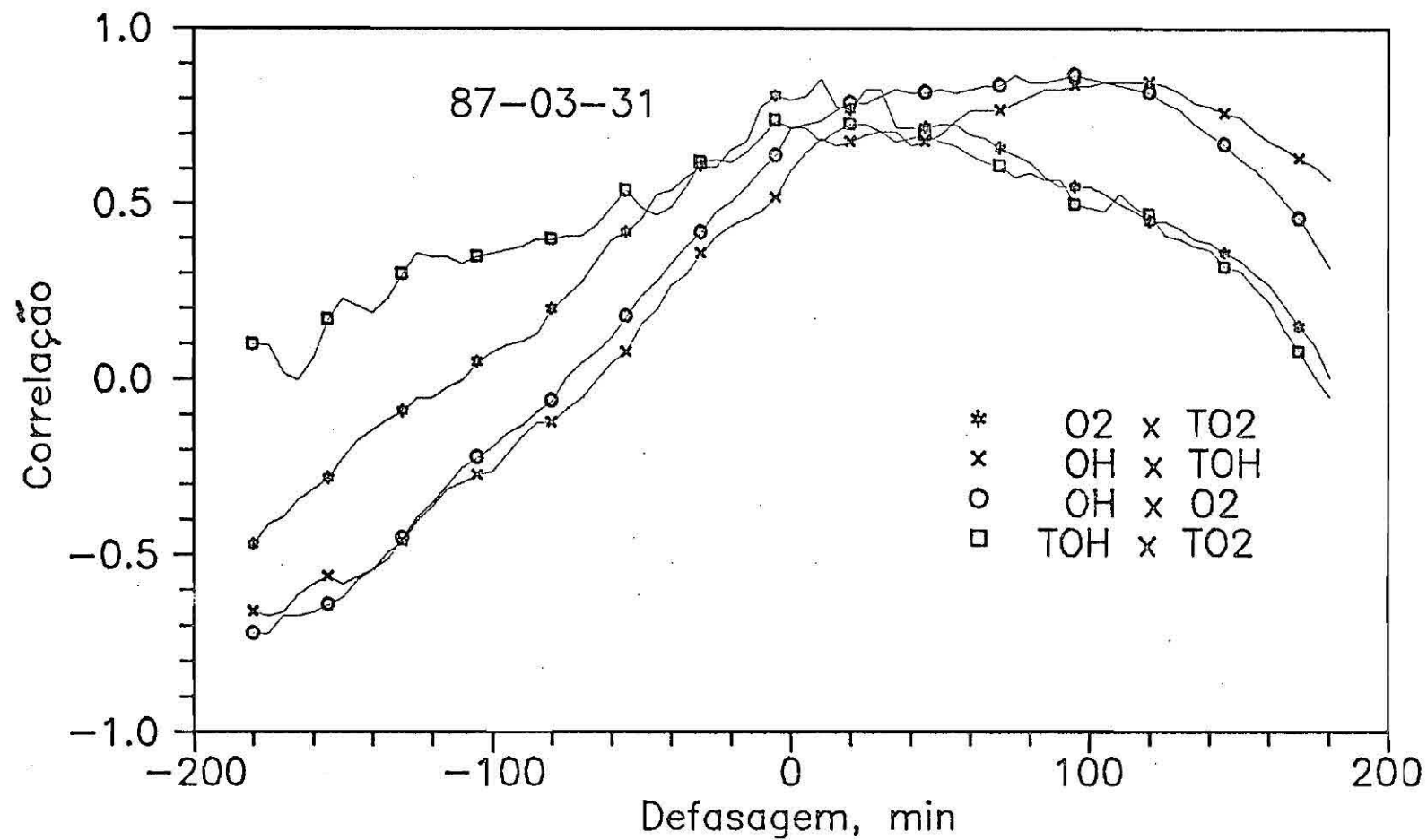


Fig. 6.2 - Correlação cruzada entre O_2 e TO_2 , OH e TOH ,
 OH e O_2 , TOH e TO_2 .

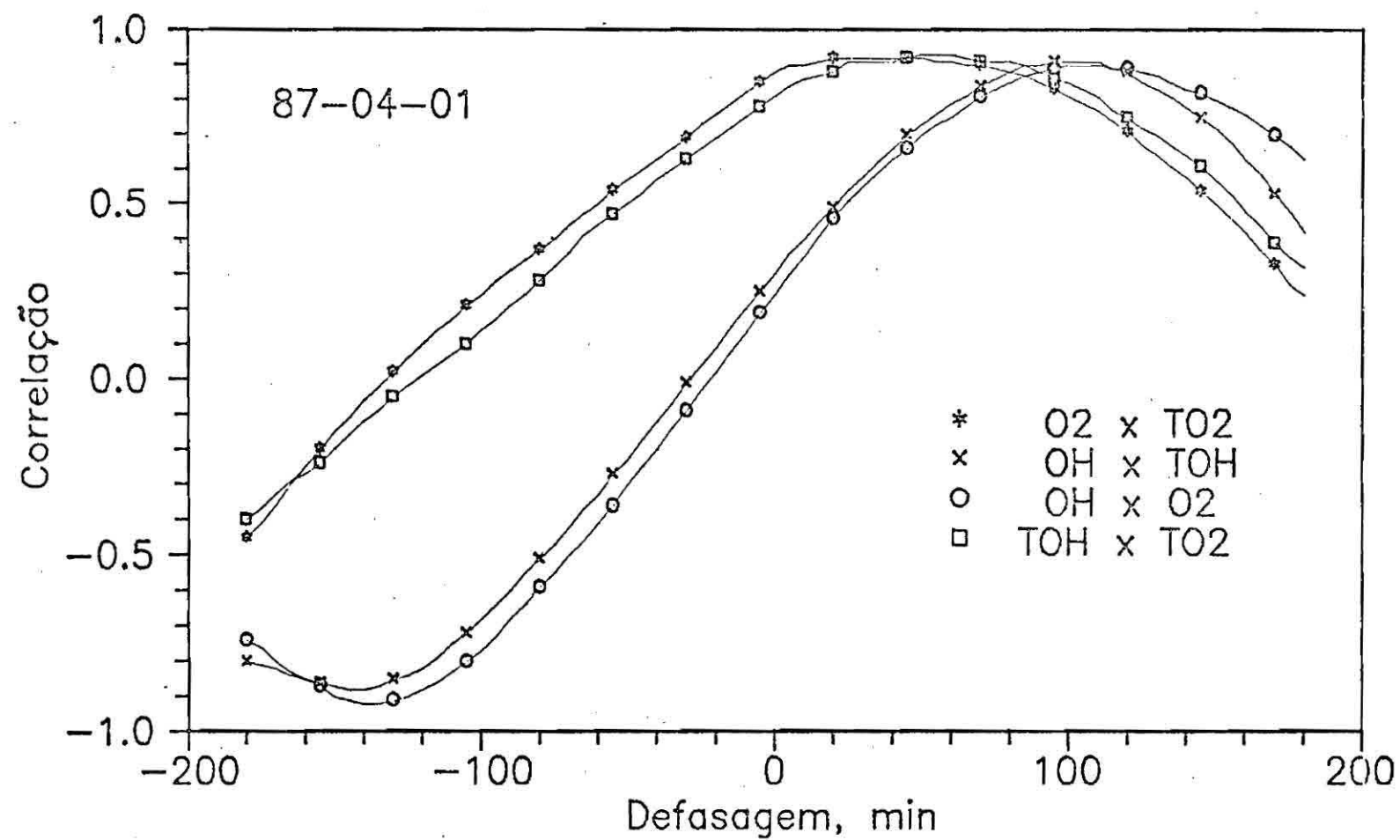


Fig. 6.3 - Correlação cruzada entre O_2 e TO_2 , OH e TOH ,
 OH e O_2 , TOH e TO_2 .

A probabilidade de que os resultados obtidos nas correlações acima sejam ocasionais e não reais é da ordem de 1%. Por este motivo pode-se dizer que se tem uma boa confiança nos dados obtidos da correlação.

6.2.2 - Defasagem entre as Intensidades e as Temperaturas

No estudo de correlação pode-se determinar qual é a defasagem entre O_2A (0,1) e TO_2 , entre OH (9,4) e TOH e também pode-se verificar que a defasagem entre O_2A (0,1) e TO_2 é menor do que a defasagem entre OH (9,4) e TOH.

Na Tabela 6.1 pode-se ver que as intensidades nas noites de 31/05 e 01/04 possuem uma variação maior que 50% e que as temperaturas possuem uma variação pico a pico de 25 ± 5 K: variações desta ordem dão fortes indicações de propagação de ondas de gravidade na região da mesosfera.

TABELA 6.1

INTENSIDADES E TEMPERATURAS (MÁXIMA E MÍNIMA) E DEFASAGENS ENTRE AS INTENSIDADES E SUAS RESPECTIVAS TEMPERATURAS ROTACIONAIS

NOITE	CONSTITUINTE	INTENSIDADE (R)	TEMPERATURA (K)	DEFASAGEM (min)
31/03	O_2	760; 400	195; 165	30
	OH	760; 420	225; 200	90
01/04	O_2	940; 540	200; 170	40
	OH	825; 540	225; 205	110

Um outro fator que poderia, contribuir para a variação da intensidade e da temperatura e o deslocamento na altura do pico das camadas emissoras; no entanto, uma variação maior que 50% das intensidades e uma variação de 25 ± 5 K na temperatura torna difícil uma explicação baseada nesta segunda hipótese.

Para obter-se um conhecimento mais abrangente dos motivos pelos quais as intensidades estão defasadas das suas respectivas temperaturas e porque a defasagem entre o O_2A (0,1) e TO_2 é menor que a defasagem entre OH (9,4) e TOH, é necessário um modelo teórico para a mesosfera que envolva a propagação de ondas de gravidade e as respostas das concentrações dos constituintes minoritários, majoritários, e da temperatura nesta região.

Alguns modelos teóricos prevêem que a concentração dos constituintes minoritários $[O]$, $[O_3]$ e $[H]$ não estão em fase com a concentração dos constituintes majoritários quando a mesosfera é perturbada por uma onda de gravidade (Weinstock, 1978; Frederick, 1979; Hatfield et al., 1981; Walterscheid et al., 1987).

Hatfield et al. (1981) mostram que uma onda de gravidade, que se propaga com uma velocidade horizontal de fase de 33 m/seg, provoca uma mudança no perfil de concentração do $[H]$ e $[O_3]$. No modelo que eles utilizam, as concentrações do $[H]$ e do $[O_3]$ entre 80 e 90 Km estão defasadas de 180 da concentração dos constituintes majoritários. Em alturas acima de 90 Km as concentrações do $[H]$ e $[O_3]$ estão em fase com os constituintes majoritários.

6.3 - CÁLCULO DA VELOCIDADE VERTICAL DAS ONDAS A PARTIR DAS INTENSIDADES E DAS TEMPERATURAS

Fixando-se os picos das camadas emissoras nas alturas médias determinadas por medidas de foguetes (veja Tabela 6.1), pode-se calcular a velocidade da onda a partir do estudo de correlação. No estudo de correlação determina-se a defasagem entre os parâmetros estudados.

TABELA 6.2PICO DAS CAMADAS EMISSORAS *

CONSTITUINTE	ALTURA DO PICO DE EMISSÃO
O	97 $\pm$ 2
O ₂	94 $\pm$ 3
NaD	89 $\pm$ 3
OH	87 $\pm$ 2

* Veja tabelas 3.1-3.4

O que se pode observar nos cálculos das velocidades é que as velocidades obtidas a partir das temperaturas em geral são 2 vezes maiores do que as velocidades obtidas a partir das intensidades (veja Tabela 6.3 e 6.4).

Como foi discutido anteriormente, a concentração dos constituintes minoritários não estão em fase com a concentração dos constituintes majoritários e, por conseguinte, a variação da intensidade destes também não está em fase com a onda, já a variação da temperatura rotacional deve estar em fase com a onda e desta forma, a temperatura rotacional é um parâmetro mais eficaz para se medir a velocidade da onda na mesosfera, e as intensidades são parâmetros apropriados para estudar a variação da concentração dos constituintes minoritários quando a mesosfera é perturbada por ondas de gravidade.

TABELA 6.3

VELOCIDADE DA ONDA NA NOITE DE 03/31

CONSTITUINTES	DIF. DA ALTURA km	DEFASAGEM h	VEL. km/h
5577-NaD	7	1.25	5.6
5577-OH	10	0.83	12
O ₂ A-OH	7	1.5	4.7
TO ₂ -TOH	7	0.41	16.8

TABELA 6.4

VELOCIDADE DA ONDA NA NOITE DE 04/01

CONSTITUINTES	DIF. DE ALTURA km	DEFASAGEM h	VEL. km/h
5577-NaD	7	2.3	3.0
5577-OH	10	2.2	4.5
O ₂ A-OH	7	1.42	4.7
TO ₂ -TOH	7	0.75	9.3

6.4 - CORRELAÇÃO ENTRE MÉDIAS NOTURNAS

Para cada noite observada, calcula-se uma média noturna das intensidades OI 5577, O₂A (0,1), NaD 5893 e OH (9,4) e uma média noturna para as temperaturas TO₂ e TOH. A correlação entre estas médias noturnas está na Tabela 6.5.

TABELA 6.5

CORRELAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS NOTURNAS

CONSTITUINTES CORRELACIONADOS		CORRELAÇÃO
OI 5577	e NaD	0,57
OI 5577	e OH (9,4)	0,32
OI 5577	e O ₂ A (0,1)	0,89
NaD	e OH (9,4)	0,64
NaD	e O ₂ A (0,1)	0,64
OH (9,4)	e O ₂ A (0,1)	0,59
OH (9,4)	e TOH	0,59
O ₂ A (0,1)	e TO	0,60

Para os cálculos de correlação das médias noturnas utiliza-se as médias de 54 noites (aqui não se utilizou o critério de mais de 6 horas de observação para utilização dos dados).

O resultado deste estudo mostra uma forte correlação entre o OI 5577 e O₂A. Na Figura 6.4, pode-se ver os pontos correlacionados entre OI 5577 e O₂A (0,1).

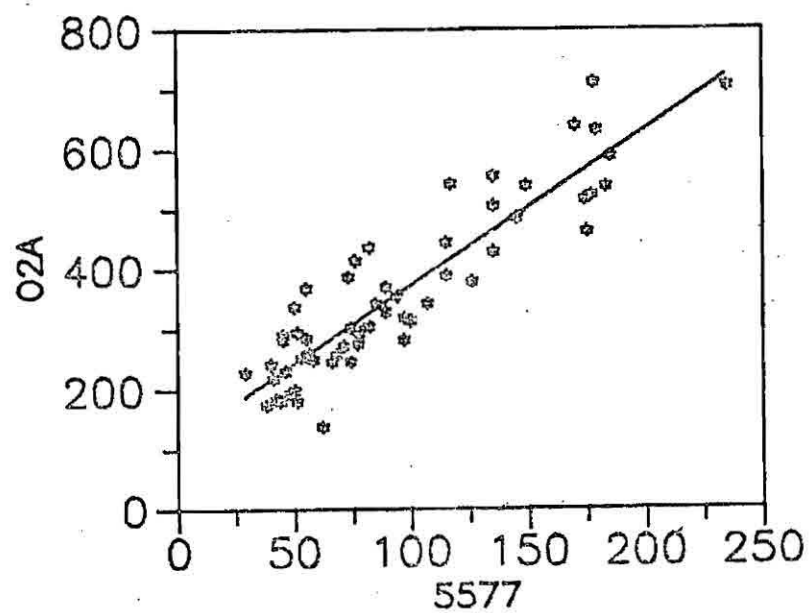


Fig. 6.4 - Intensidades médias noturnas do OI 5577 e O₂A (0,1).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Fizeram-se medidas simultâneas das emissões OI 5577, O₂A (0,1), NaD 5893 e OH (9,4) e das temperaturas rotacionais TO₂ e TOH, utilizando um fotômetro multicanal de filtro inclinável, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45°W) desde janeiro/87 até janeiro/88.

Foi possível fazer observações em 58 noites; no entanto, somente em 39 noites tem no mínimo 6 horas consecutivas de observação.

Para calcular as intensidades das emissões e as temperaturas rotacionais, estudou-se a espectroscopia das moléculas O₂ e OH.

Durante o período de 1 ano de observação verificou-se:

- i) que a variação sazonal das emissões OI 5577 e O₂A (0,1) tem máximos em março e outubro e a variação sazonal do NaD tem máximos em abril e outubro;
- ii) que a variação sazonal da temperatura TO₂ tem máximo em outubro e a variação da temperatura TOH tem máximos em abril e setembro.

Nos estudos estatísticos das médias normalizadas realizados nas 39 noites consideradas de boa qualidade observou-se que:

- i) As emissões no início das noites possuem uma intensidade alta e no decorrer da noite estas emissões vão diminuindo até a meia noite e a partir deste horário as intensidades das emissões começam a aumentar novamente;

- ii) a intensidade do O_2A acompanha a emissão do $OI\ 5577$ e que a emissão do $OH\ (9,4)$ acompanha a emissão do NaD .
- iii) a temperatura rotacional TOH possui um mínimo por volta da meia noite; a TO_2 permanece constante até a meia noite e após este horário sofre um ligeiro acréscimo.

Nas noites em que se detectou a variação de curto e médio período das emissões observou-se que:

- i) as intensidades possuem uma amplitude de variação maior que 50%;
- ii) as temperaturas rotacionais possuem uma amplitude de variação de $25 \pm 5\ K$;
- iii) existe uma defasagem entre a intensidade O_2A e $OH\ (9,4)$ em relação à sua respectiva temperatura TO_2 e TOH ;
- iv) a defasagem entre O_2A e TO é menor que a defasagem entre OH e TOH ;
- v) a velocidade de propagação das perturbações calculada a partir das defasagens entre as temperaturas é aproximadamente duas vezes maior do que a velocidade calculada a partir das defasagens entre as emissões;
- vi) a variação de curto e médio período das intensidades deve ser provocada por ondas de gravidade.

A defasagem entre as temperaturas rotacionais TO_2 e TOH é um parâmetro mais apropriado para estudar a propagação de ondas na mesosfera, e as intensidades podem auxiliar neste estudo.

De acordo com os modelos teóricos (Frederick, 1979; Hatfield et al., 1981; Walterscheid et al., 1987) a concentração dos

constituintes minoritários não está em fase com a concentração dos constituintes majoritários, quando a mesosfera é perturbada por uma onda de gravidade; então a medida das intensidades das emissões pode auxiliar no entendimento de como varia a concentração dos constituintes minoritários quando a mesosfera é perturbada por uma onda de gravidade.

Sugere-se para o estudo mais detalhado da variação da concentração dos constituintes minoritários e dos efeitos dinâmicos provocado por uma onda de gravidade na mesosfera.

- 1) Um modelo teórico que inclua o efeito dinâmico, como onda de gravidade, para estudar a concentração dos constituintes minoritários [O], [O₂] e [H].
- 2) Observação dos perfis das emissões OI 5577, NaD, O₂A e OH (9,4) em baixas latitudes.
- 3) Observação da variação espacial das intensidades e das temperaturas rotacionais por intermédio de um imageador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALMANAQUE DE CIÊNCIA Tokyo, Observatório Astronômico da Universidade de Tokyo, Maruzem, 1970.
- BABCOCK, H.D.; HERZERG, L. Fine structure of the red system of atmospheric oxygen bands. Astrophysical Journal, 108(2):167-190, 1968.
- BATES, D.R.; NICOLET, M. The photochemistry of atmospheric water vapor. Journal of Geophysical Research, 55(3):301-327, 1950
- BARTH, C.A.; HILDEBRAND, A.F. The 5577 Airglow emission mechanism. Journal of Geophysical Research, 66:985-990, 1961.
- CAMPBELL, I.M.; GRAY, C.N. Rate constants for $O(^3P)$ recombination and association with $N(^4S)$. Chemical Physics Letters, 18(2):607-614, 1973.
- CAMPBELL, W.W. Note on the spectrum of the Aurora borealis. Astrophysics Journal, 2(1):162-175, 1895.
- CHAMBERLAIN, J.W. Physics of the aurora and airglow. New York, Academic, 1961.
- CHAPMAN, S. Some phenomena of upper atmosphere. Proceeding of the Royal Society of London, serie(A):132:353-374, 1931.
- DEANS, A.J.; SHEPHERD, G.G.; EVANS, W.F.J. A rocket measurement of the $O_2(b^1_g - X^3_g^-)$ atmospheric band nightglow altitude distribution. Geophysical Research Letters, 3(8):441-444, 1976.
- EATHER, R.H.; REASONER, D.L. Spectrophotometry of faint light sources with a tilting filter photometer. Applied optics, 8(2):227-242, 1969.

- FREDERICK, J.E. Influence of Gravity wave activation lower thermospheric photochemistry and composition. Planetary and Space Science, 27(12):1469-1477, 1979.
- GREER, R.G.; BEST, G.T. A rocket borne photometric investigation of the oxygen lines at 5577 Å and 6300 Å the NaD lines and the continuum at 5300 Å in the night airglow, Planetary and Space Science, 15(12):1857-1882, 1967.
- GREER, R.G.H.; MURTAGH, D.P.; MCDADE, I.C.; DICKISON, P.H.G.; THOMAS, L.; JENKINS, D.B.; STEGMAN, J.; LLEWELLYN, E.J.; WITT, G.; MACKINNON, D.J.; WILLIAMS, E.R. Eton 1: A data base pertinent of the study of energy transfer in the oxygen nightglow. Planetary and Space Science, 34(9):771-788, 1986.
- GOOD, R.E. Determination of atomic oxygen density from rocket borne measurements of hydroxyl airglow. Planetary and Space Science, 24(4):393-395, 1976.
- HATFIELD, R.; TUAN, T. F. On the effects of atmospheric gravity waves on profiles of H, O₃ e OH emission. Journal of Geophysical Research, 86(4):2429-2437, 1981.
- HEPPNER, J.P.; MEREDITH, L.H. Nightglow emission altitudes from rocket measurements. Journal Geophysical Research, 63(1):51-65, 1958.
- HERZBERG, G. Molecular spectra and molecular structure. London, D. Van Nostrand, 1950
- HIMES, C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. Canadian Journal of Physics, 38(11):1441-1481, 1960.
- HUNTEN, D.M. Airglow - Introduction and Review in the radiating atmosphere. Edited by McCormac, B.M, D. Reidel Publishing Company, Holland, parte 1, p. 3-16, 1971.

- KIRCHHOFF, V.W.J.H.; CHEMESA, B.R.; SIMONICH, D.M. Seasonal variation of ozone in the mesosphere. Journal Geophysical Research, 86(3):1463-1466, 1981.
- KOLB, C.E.; ELGIN, J.B. Gas phase chemical kinetics of sodium in the upper atmosphere. Nature, 263(5577):488-490, 1976.
- KOOMEN, M.; SCOLNIC, R.; TOUSEY, R. Distribution of night airglow OI 5577 and Na D layer measured from rocket. Journal Geophysical Research, 61(2):304-306, 1956.
- KRASOVSKY, V.I. The hydroxyl emission problem and paths of its solution. Annales de Geophysique, 27(2):211-221, 1971.
- KRASOVSKY, V.I.; SHAGAEV, M.V. Inhomogeneities and wavelike variations of the rotational temperature of atmospheric hydroxyl, Planetary and Space Science, 22(9):1334-12337, 1974.
- KRASOVSKY, V.I.; SHEFOV, N.N.; YARIN, V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 Å. Planetarty and Space Science, 9(3):883-919, 1962.
- KRASOVSKY, V.I.; PATAPOV, B.P.; SEMENOV, A.I.; SOBOLEV, V.G.; SHAGAEV, N.V.; SHEFOV, N.N. On the equilibrium nature of rotational temperature of airglow. Planetary and Space Science, 25(6):596-597, 1977.
- KULKARNI, P.V. Rocket study of 5577 Å OI emission at night over magnetic equator. Journal of Geophysical Research, 81(22):3740-3744, 1976.
- KULKARNI, P.V.; SANDERS, C.L. Use of radioactivated light source for the absolute calibration of two colour night airglow photometer. Planetatary and Space Science, 12(1):189-194, 1964

- LLEWELLYN, E.J.; LONG, B.H.; SOLHEIMN, B.H. The quenching of OH* in the atmosphere. Planetary and Space Science, 26(6):525-531, 1978.
- MARTIN, L.R.; COHEN, R.R.; SCHATZ, J.R. Quenching, of laser induced fluorescence of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ by O_2 and N_2 . Chemical Physics Letters, 41(1):394-403, 1976.
- MIES, A.B. Calculated vibrational transition probabilities of OH($X^2\Pi$). Journal Molecular Spectroscopy, 53(2):150-188, 1974.
- MEINEL, A.B. OH emission bands in the spectrum of the night sky I. Astrophysical Journal, 111(3):555-564, 1950a.
- _____ OH emission bands in the spectrum of the night sky II. Astrophysical Journal, 112(1):120-130, 1950b.
- _____ O Emission bands in the infrared spectrum of the night sky. Astrophysical Journal, 112(2):464-465, 1950c.
- MOLINA, A.; LOPEZ-PUERTAS, M.; LOPEZ MORENO, J.J.; RODRIGO, R. Gravity waves from five simultaneous emissions: OH(6,2), NaD, $O_2(^1\Sigma_g^-)$, OI 5.577 nm, and visible continuum. Canadian Journal of Physics, 63(5):592-599, 1985.
- MURPHY, R.E. Infrared emission of OH in the fundamental and first overtone bands. Journal of Chemical Physics, 54(11):4852-4859, 1971.
- MYRABO, H.K.; DECHR, C.S.; VIERECK, R; HENRIKSEN, K. Polar mesopause gravity wave activity in the sodium and hydroxyl night airglow. Journal of Geophysical Research, 92(A3):2527-2534, 1987.
- NAGY, A.F.; LIU, S.C.; BAKER, D.J. Vibrational excited hidroxyl molecules in the lower atmosphere. Geophysical Research Letters, 3(12):731-734, 1976.

- NICOLET, M. Ozone and hydrogen reaction. Annales de Geophysique, 26(2):531-546, 1970.
- NICOLAIDES, C.; SINANOGLU, O., and WESTHAUS, P. Theory of atomic structure including electron correlation IV method for forbidden-transition probabilities with results for [OI], [OII], [NI], [NII] and [CI]. Physics Review A 4:1400-1415, 1971.
- NOXON, J.F. Effect of internal gravity waves upon night airglow temperatures. Geophysical Research Letters, 5(1):25-27, 1978.
- RAVISHANKARA, A.R.; WINE, P.H.; LANGEORD, A.O. Absolute rate constant for the reaction $\text{OH}(V=0) + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$ over the temperature range 238-357K. Journal of Chemical Physics, 70(2):984-989, 1979.
- RAYLEIGH, LORD, IV Absolute intensity of the aurora line in the night sky and the number of transition. Proceeding of the Royal Society of London, serie A, A129:458-467, 1930.
- _____ On a night sky of exceptional brightness and on distinction between the polar aurora and night sky. Proceeding of the Royal Society of London, serie A, A121:376-381, 1931.
- RICHARD, P.W. Chemistry of Atmospheres. Oxford, Clarendon Press 1974.
- RODRIGO, R.; LOPEZ-MORENO, J.J.; LOPEZ-PUERTAS, M.; MOLINA, A. Analysis of OI 5.557 nm, NaD, OH(6,2) and $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ (0,1) nightglow emissions from ground-based observations. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 47(11):1099-1110, 1985.
- SIMONICH, D.M.; CLEMESHA, B.R.; KIRCHHOFF, V.W.J. The mesospheric sodium layer at 23°S nocturnal and seasonal variations. Journal of Geophysical Research, 84(A4):1543-1550, 1979.
- SILVERMAN, S.M. Nightglow phenomenology. Space Science Review. 11(2/3):341-379, 1970

- SIVJEE, G.G.; DICK, K.A.; FELDEMAN, P.D. Temporal variations in nighttime hydroxyl rotational temperature. Planetary and Space Science, 20(2):261-269, 1972
- SLANGER, T.G.; BLACK, G. Interactions of $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ with $O(^3P)$ and O_3 . Journal of Chemical Physics, 70(7):3434-3447, 1979.
- _____. $O(^1S)$ production from oxygen atomic recombination. Journal of Chemical Physics, 64(9):3736-3773, 1976.
- _____. The product channel in the quenching of $O(^1S)$ by $O_2(a\Delta_g)$, Journal Chemical Physics 75(5):2247-2251, 1981.
- _____. The temperature dependence of $O(^1S)$ quenching by O chemical Physics Letters, 17(1):401-417, 1972.
- STEGMAN, J.; WITT, G. Sodium nightglow during post-Auroral conditions. COSPAR Space Research XVII, 287, 1977.
- SUSUKI, K. and TOHMATSUT, T. An interpretation of the rotational temperature of the airglow hydroxyl emission. Planetary and Space Science, 24(6):665-671, 1976.
- TAKAHASHI, H.; BATISTA, P.P. Comments on the paper entitled "The quenching of OH^* in the atmosphere". Planetary and Space Science, 28(5):559-561, 1980.
- _____. Simultaneous measurements of $OH(9,4)$, $(5,3)$, $(7,2)$, $(6,2)$ and $(5,1)$ bands in the airglow. Journal Geophysical Research, 86(A7):5632-5643, 1981.
- TAKAHASHI, H.; CLEMESHA, B.R.; SAHAI, Y. Nightglow $OH(9,3)$ band intensities and rotational temperature at $23^\circ S$. Planetary and Space Science, 22(9):1323-1329, 1974

- TAKAHASHI, H.; SAHAI, Y.; BATISTA, P.P. Airglow $O_2(^1\Sigma_g^+)$ atmospheric band at 8645 Å and the rotational temperature observed 23°S. Planetary and Space Science, 34(3):301-306, 1986.
- TAKAHASHI, H.; BATISTA, P.P.; CLEMESHA B.R.; SIMONICH, D.M.; SAHAI, Y. Correlations between OH, NaD and OI 5577 Å emissions in the airglow. Planetary and Space Science, 27(6):801-807, 1979.
- THOMAS, R.J.; BARTH, C.A. Seasonal variations of ozone in the upper mesosphere and gravity waves. Geophysical Research Letters, 11(7):673-676, 1984
- THOMAS, R.J.; YOUNG, R.A. Measurement of atomic oxygen and related airglows in the lower thermosphere. Journal Geophysical Research, 86:7389-7393, 1981.
- TURNBULL, D.N.; LOWE, R.P. Vibrational population distribution in the hydroxyl night airglow. Canadian Journal of Physics, 61(2):244-250, 1983.
- VALLANCE, J. Aurora. Dordrecht, D. Reidel Publish, 1974.
- WALTERSCHEID, R.L.; SCHUBERT, G.; STRAUS, J.M. A dynamical-chemical model of wave-driven fluctuations in the OH nightglow. Journal Geophysical Research, 92(A2):1241-1254, 1987.
- WATANABE, T.; MASATOSHI, N.; OGAWA, T. Rocket measurements of O_2 atmospheric and OH Meinel bands in the airglow. Journal Geophysical Research, 86(A7):5768-5774, 1981.
- WEINSTOCK, J. Theory of the interaction of gravity waves with $O_2(^1\Sigma)$ airglow. Journal Geophysical Research, 83(A11):5175-5185, 1978.

WILSON, W.F. A critical review of the gas-phase reactions kinetics of hydroxyl radical. Journal of Physical Chemistry, 1(1):535-573, 1973.

WITT, G.; STEGMAN, J.; SOLHEIM, B.H.; LLEWELLYN, E.J. A measurement of the $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ atmospheric band and the $OI(^1S)$ green line in the nightglow. Planetary and Space Science, 27(4):341-350, 1979.

APÊNDICE A

ESPECTRO DA BANDA O₂A (0,1)

Energia Vibracional + Energia Eletrônica
dos estados

3-SIGMA V = 1

2343.569214

1-SIGMA V = 0

13908.076936

TERMOS ROTACIONAIS DO 02

ESTADO 3-SIGMA

K	F31(1,K)	F32(1,K)	F33(1,K)
1	0.954484	2.843939	0.008350
3	15.102973	17.063021	14.974846
5	40.657514	42.654805	40.637223
7	77.590037	79.614893	77.634554
9	125.338645	127.936934	125.984160
11	185.543045	187.612623	185.683283
13	256.542089	258.631701	256.723649
15	338.873108	340.981954	339.093935
17	432.521673	434.649213	432.780429
19	537.471505	539.617358	537.767269
21	653.704425	655.868312	654.036536
23	781.200337	783.382045	781.568302
25	919.937205	922.136572	920.340651
27	1059.391058	1072.107955	1070.329693
29	1231.035977	1233.270301	1231.509568
31	1403.344097	1405.595762	1403.852456
33	1586.785601	1589.054538	1587.328573
35	1781.328723	1783.614874	1781.906181
37	1985.939744	1989.243059	1987.551579
39	2203.582992	2205.903430	2204.229115
41	2431.220845	2433.558369	2431.901176

ESTADO 1-SIGMA

K	F1(0,K)
0	0.000000
2	3.347729
4	27.824263
6	53.426003
8	100.147292
10	152.980420
12	216.915615
14	291.941053
16	378.042850
18	475.205066
20	583.409707
22	702.636718
24	832.863990
26	974.067357
28	1126.220597
30	1289.295428
32	1463.261516
34	1648.086465
36	1843.735829
38	2050.173099
40	2267.359712

TERMOS ROTACIONAL + VIBRACIONAS DO O2

ESTADO 3-SIGMA

K	GF31(1,K)	GF32(1,K)	GF33(1,K)
1	2344.523698	2346.413153	2343.577564
3	2358.672188	2360.632236	2358.544060
5	2384.226729	2386.224019	2384.206437
7	2421.159251	2423.184107	2421.203768
9	2469.457859	2471.506148	2469.553374
11	2529.112259	2531.181838	2529.252497
13	2600.111304	2602.200915	2600.292854
15	2682.442322	2684.551168	2682.663149
17	2776.090887	2778.218428	2776.349643
19	2881.040719	2883.186573	2881.336483
21	2997.273640	2999.437527	2997.605750
23	3124.769551	3126.951260	3125.137516
25	3263.506419	3265.705787	3263.909866
27	3413.460272	3415.677170	3413.898907
29	3574.605192	3576.839515	3575.078783
31	3746.913312	3749.164977	3747.421670
33	3930.354816	3932.623753	3930.897788
35	4124.897937	4127.184088	4125.475395
37	4330.508958	4332.812273	4331.120794
39	4547.152206	4549.472644	4547.798329
41	4774.790059	4777.127583	4775.470391

ESTADO 1-SIGMA

K	GF100(K)
0	13908.076936
2	13916.424665
4	13935.901199
6	13966.502939
8	14008.224229
10	14061.057356
12	14124.992552
14	14200.017989
16	14286.119786
18	14383.232003
20	14491.486643
22	14610.713654
24	14740.940926
26	14882.142294
28	15034.297533
30	15197.372364
32	15371.338452
34	15556.163402
36	15751.812766
38	15958.250036
40	16175.436649

A.3

COMPRIMENTO DE ONDA NO VACUO

K	PP	PQ	RQ	RR
0	8649.274177	0.000000	0.000000	0.000000
2	8653.668765	8652.105297	8641.622521	8643.033751
4	8658.250655	8656.738432	8637.645494	8639.108112
6	8663.019835	8661.533887	8633.881474	8635.370590
8	8667.976395	8666.509450	8630.313215	8631.821638
10	8673.120524	8671.669459	8626.937122	8628.461811
12	8678.452510	8677.015689	8623.752357	8625.291758
14	8683.972743	8682.549196	8620.759004	8622.312230
16	8689.681714	8688.270814	8617.957567	8619.524074
18	8695.580016	8694.181331	8615.348796	8616.928236
20	8701.668344	8700.281561	8612.933617	8614.525761
22	8707.947497	8706.572383	8610.713095	8612.317794
24	8714.418379	8713.054750	8608.688420	8610.305577
26	8721.081997	8719.729708	8606.860897	8608.490454
28	8727.939465	8726.598399	8605.231943	8606.873869
30	8734.992005	8733.662063	8603.803080	8605.457366
32	8742.240945	8740.922045	8602.575938	8604.242590
34	8749.687724	8748.379795	8601.552250	8603.231289
36	8757.333890	8756.036871	8600.733856	8602.425314
38	8765.181103	8763.894942	8600.122701	8601.826619
40	8773.231137	8771.955788	8599.720836	8601.437262

COMPRIMENTO DE ONDA NO AR

K	PP	PQ	RQ	RR
0	8646.917000	0.000000	0.000000	0.000000
2	8651.310390	8649.747349	8639.267429	8640.679275
4	8655.891031	8654.379221	8635.291486	8636.753706
6	8660.658912	8659.173369	8631.528492	8633.017202
8	8665.614122	8664.147576	8627.961206	8629.469218
10	8670.756848	8669.306179	8624.586032	8626.110306
12	8676.087381	8674.650952	8621.402135	8622.941117
14	8681.606110	8680.182950	8618.409598	8619.962401
16	8687.313525	8685.903009	8615.608925	8617.175005
18	8693.210219	8691.811915	8613.000865	8614.579875
20	8699.296888	8697.910484	8610.586344	8612.178055
22	8705.574330	8704.199591	8608.366427	8609.970689
24	8712.043448	8710.680191	8606.342304	8607.959020
26	8718.705250	8717.353330	8604.515279	8606.144392
28	8725.560850	8724.220149	8602.886769	8604.528248
30	8732.611467	8731.281898	8601.458296	8603.112130
32	8739.858432	8738.539891	8600.231487	8601.897685
34	8747.303181	8745.995609	8599.208078	8600.886660
36	8754.947263	8753.650598	8598.389907	8600.080905
38	8762.792338	8761.506528	8597.778919	8599.482373
40	8770.840178	8769.565177	8597.377163	8599.093122

A.6

Temperatura	MP1	MP2	MP1/MP2
150	1,96	5,91	0,44
160	2,08	5,72	0,48
170	2,20	5,53	0,51
180	2,30	5,36	0,54
190	2,39	5,19	0,57
200	2,46	5,04	0,59
210	2,53	4,89	0,62
220	2,59	4,74	0,64

$$MP = \sum_i I_P^i t_i$$

$$MP = \sum_i I_P^i T_i$$

MP3, MP1: soma das intensidades relativas do ramo PP e PQ da banda $O_2A(0,1)$, multiplicada pela transmissão de cada linha, quando o filtro está na posição 1 ou na posição 3.

I_P^i : intensidade relativa das linhas do ramo PP e PQ da banda $O_2A(0,1)$

t_i : transmissão de cada linha em uma determinada posição do filtro.

TERMOS ROTACIONAIS DA MOLECULA DE OH

J	F1(0,J)	F1(1,J)	F1(2,J)	F1(3,J)	F1(4,J)	F1(5,J)	F1(6,J)	F1(7,J)	F1(8,J)	F1(9,J)
1.5	-38.4806	-39.7773	-40.2484	-42.0403	-43.0608	-44.2445	-45.1703	-46.6151	-48.1383	-49.4120
2.5	45.3148	41.0577	36.9225	32.8673	28.8344	24.7558	20.8745	16.5100	12.0729	7.8744
3.5	163.6270	155.1075	146.7131	138.4085	130.1874	121.8481	113.7526	105.2226	96.6353	87.2317
4.5	316.9529	302.8124	288.3154	274.7312	261.1513	247.2916	233.5828	219.6998	205.8860	191.9109
5.5	505.5912	484.4481	463.4756	442.5525	421.7646	401.2452	380.7950	360.0422	339.2956	318.3049
6.5	729.5730	700.1232	670.7977	641.5937	612.5914	583.7554	555.1207	526.2589	497.4535	468.9333
7.5	989.1824	949.3296	910.7421	871.8945	833.2822	794.7625	756.5266	718.2530	680.0654	642.1896
8.5	1283.7886	1233.4180	1183.1735	1133.2322	1083.5891	1034.1127	985.0345	935.9040	886.9335	838.3227
9.5	1613.7673	1550.5634	1487.8655	1425.4377	1363.3907	1301.5724	1240.2266	1178.9255	1117.8375	1057.2730
10.5	1978.5190	1901.2792	1824.5156	1748.2030	1672.3526	1596.8353	1521.8557	1447.0235	1372.5411	1298.5764
11.5	2377.5745	2234.3831	2192.7562	2131.1752	2010.1364	1919.5338	1829.0517	1739.8272	1650.5477	1561.2627

J	F2(0,J)	F2(1,J)	F2(2,J)	F2(3,J)	F2(4,J)	F2(5,J)	F2(6,J)	F2(7,J)	F2(8,J)	F2(9,J)
0.5	89.7742	87.9440	87.3803	86.7334	86.0121	85.4623	84.6435	84.3650	84.1655	83.7058
1.5	149.5435	145.5170	143.5893	140.5022	137.3901	134.4400	131.2669	128.5375	125.1114	123.3607
2.5	250.7608	243.7560	236.6953	229.6221	222.5417	215.6735	208.6242	202.1244	195.7634	189.2301
3.5	391.2363	378.6422	366.0443	353.4320	340.7599	328.6802	316.2809	304.4403	292.7812	281.0126
4.5	570.7197	550.5750	530.9844	511.4317	492.0725	472.9418	453.7589	435.1489	416.7585	398.3481
5.5	787.0608	758.9337	730.9223	703.0583	675.3454	647.9536	620.5818	593.8042	567.3092	540.2481
6.5	1041.1985	1003.1727	965.3301	927.6994	890.2824	853.2377	816.2890	779.9649	743.9818	708.1109
7.5	1332.1301	1282.7966	1233.7194	1184.9239	1136.4148	1088.3349	1040.4324	993.1945	946.3522	899.7248
8.5	1659.3820	1597.3349	1535.6241	1474.2728	1413.2954	1352.7938	1292.5665	1233.0538	1174.0135	1115.2558
9.5	2022.4264	1946.3216	1870.5799	1795.2329	1720.4348	1646.1576	1572.2373	1499.0929	1426.5047	1354.2927
10.5	2420.9670	2329.2803	2238.1112	2147.4795	2057.3893	1967.9542	1878.9759	1790.8433	1703.3544	1615.3416
11.5	2854.3273	2745.7143	2637.7217	2530.3668	2423.6538	2317.6886	2212.2869	2107.8117	2004.0756	1900.9219

TERMOS VIBRACIONAL*ROTACIONAL DA MOLECULA DE OH

J	GF1(0,J)	GF1(1,J)	GF1(2,J)	GF1(3,J)	GF1(4,J)	GF1(5,J)	GF1(6,J)	GF1(7,J)	GF1(8,J)	GF1(9,J)
1.5	1809.2945	5377.5251	8780.3907	12019.5605	15096.2520	18010.2555	20750.7751	23344.2686	25756.7767	27992.3415
2.5	1993.0900	5458.4613	8958.2617	12094.4673	15168.1773	18079.2669	20826.3199	23407.3937	25816.9879	28049.6279
3.5	2011.4041	5572.5107	8968.0525	12200.0093	15269.5003	18176.3592	20919.6920	23496.1063	25901.5504	28130.0352
4.5	2164.7280	5720.2153	9110.1557	12336.5320	15400.4642	18301.9027	21039.5232	23510.5835	26010.6010	28233.5644
5.5	2353.7664	5901.8515	9284.9107	12504.2534	15561.2775	18455.7563	21186.7415	23750.9259	26144.2106	28360.5584
6.5	2577.4431	6117.5316	9492.1370	12703.2546	15752.0043	18638.2664	21361.0662	23917.1426	26302.3535	28510.5358
7.5	2836.9576	6367.2330	9732.0814	12933.4953	15972.5951	18849.2733	21562.5321	24109.1517	26434.9804	28633.9430
8.5	3131.7637	6650.8214	10004.5133	13194.9330	16222.9920	19088.6236	21790.7799	24326.7977	26691.9735	28880.1452
9.5	3461.5429	6968.0713	10309.2048	13437.0365	16502.6935	19356.0835	22046.1720	24559.8092	26922.3025	29099.0455
10.5	3826.2941	7318.5326	10645.2549	13809.8089	16811.6655	19651.7469	22327.3011	24837.9072	27177.4552	29340.3239
11.5	4225.7496	7702.2855	11014.0955	14162.7751	17149.4493	19974.0449	22635.4972	25130.7108	27455.4627	29603.6231

J	GF2(0,J)	GF2(1,J)	GF2(2,J)	GF2(3,J)	GF2(4,J)	GF2(5,J)	GF2(6,J)	GF2(7,J)	GF2(8,J)	GF2(9,J)
0.5	1936.1493	5505.3474	8908.7197	12148.3342	15225.3250	18139.9734	20890.5889	23475.2487	25889.0806	28125.4593
1.5	1997.3136	5564.0204	8964.9292	12202.1090	15276.6930	18188.9511	20937.2123	23519.5211	25931.0255	28165.1142
2.5	2093.5360	5661.1594	9058.0352	12291.2229	15361.3545	18270.1845	21014.5596	23593.0081	26000.6785	28230.9836
3.5	2239.0114	5796.0454	9187.3841	12415.0929	15480.2727	18383.1713	21122.2264	23695.3240	26097.6962	28322.7661
4.5	2417.9949	5967.9784	9352.3233	12573.0826	15631.3853	18527.4529	21259.7044	23826.0326	26221.5335	28440.1016
5.5	2634.9355	6175.3371	9552.2621	12764.6591	15814.6533	18702.4543	21426.5272	23984.5879	26372.2242	28582.6016
6.5	2888.9736	6420.5761	9786.6695	12989.2992	16029.5953	18907.7488	21622.2344	24170.8486	26543.8968	28749.8644
7.5	3179.9053	6700.2000	10055.0533	13246.5243	16275.7276	19142.8460	21846.3778	24384.0732	26751.2772	28941.4783
8.5	3507.1571	7014.7383	10356.9635	13535.3737	16552.5933	19407.3049	22093.5119	24623.9375	26978.9335	29157.0193
9.5	3870.2616	7363.7250	10691.9193	13856.3337	16859.7476	19700.6687	22378.1932	24889.9756	27231.4177	29395.0462
10.5	4263.7421	7746.6337	11059.4506	14209.0804	17196.7022	20022.4652	22684.9213	25151.7270	27508.2595	29658.0951
11.5	4702.1024	8163.1182	11459.0611	14591.9675	17562.9566	20372.1997	23013.2323	25495.6954	27808.9906	29942.5754

COMPRIMENTO DE ONDA NO VACUO

J	P1	P2	Q1	Q2	R1	R2
0.5	0.0000	7782.3484	0.0000	7751.8573	0.0000	0.0000
1.5	7797.7913	7810.5110	7754.2886	7753.9022	0.0000	7728.1012
2.5	7824.6430	7842.7000	7763.1129	7770.5336	7719.9953	7719.4501
3.5	7855.7243	7879.3633	7775.7263	7786.6499	7714.9553	7715.5067
4.5	7891.1732	7920.5139	7792.2886	7807.1836	7713.5710	7716.1513
5.5	7931.1233	7966.2192	7812.9389	7832.1149	7715.9933	7721.2825
6.5	7975.6953	8016.5868	7837.7993	7861.4689	7722.3599	7730.8393
7.5	8025.0117	8071.7547	7866.9863	7895.3078	7732.7926	7744.8037
8.5	8079.2038	8131.3850	7900.6139	7933.7242	7747.4030	7763.1966
9.5	8138.4308	8197.1621	7938.8058	7976.8362	7766.2997	7786.0712
10.5	8202.8529	8267.7915	7981.6968	8024.7851	7789.5959	7813.5038

COMPRIMENTO DE ONDA CORRIGIDO PARA O AR

J	P1	P2	Q1	Q2	R1	R2
0.5	0.0000	7780.7273	0.0000	7749.7447	0.0000	0.0000
1.5	7795.6661	7803.3824	7752.1754	7756.7877	0.0000	7725.9950
2.5	7822.5156	7840.5626	7760.9972	7768.4159	7717.8913	7717.3463
3.5	7853.5834	7877.2160	7773.6072	7784.5278	7712.8527	7713.4040
4.5	7889.0226	7913.3554	7790.1650	7805.0560	7711.4683	7714.0484
5.5	7928.9621	7964.0482	7810.8097	7829.9805	7713.8905	7719.1733
6.5	7973.5217	8014.4020	7835.6638	7859.3264	7720.2554	7728.7324
7.5	8022.8246	8069.3549	7864.8423	7893.1561	7730.6852	7742.6930
8.5	8077.0050	8129.3689	7898.4608	7931.5620	7745.2915	7761.0309
9.5	8136.2129	8194.9281	7936.6423	7974.6623	7764.1334	7783.9493
10.5	8200.6174	8255.3383	7979.5215	8022.5081	7787.1731	7811.7700

B.5

Temperatura	MR	MQ	MQ/MR
160	3,17	4,55	0,70
170	3,27	4,31	0,76
180	3,35	4,09	0,82
190	3,43	3,89	0,88
200	3,50	3,71	0,92
210	3,56	3,54	1,01
220	3,62	3,40	1,07

$$M_R = \sum_i I_R^i t_i$$

$$MQ = \sum_i I_Q^i t_i$$

I_R^i : intensidades relativas das linhas do ramo R da banda OH (9,4).

I_Q^i : intensidades relativas das linhas do ramo Q da banda OH (9,4).

t_i : transmissão das linhas do ramo Q ou R em uma determinada posição do filtro.