

PROJETO:

EQUARS

FOTÔMETRO DE AIRGLOW DE 4-CANAIS (GLOW) PARA MISSÃO DO SATÉLITE CIENTÍFICO EQUARS

PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW

DOCUMENTO: EQUARS-0000-ANL-002-A		ESTADO: APROVA	DO
DESCRIÇÃO: Este docur ponto de vista da sua o em termos de sua acom de como deve ser sua o *O conteúdo dos Anexo	nento tem por objetivo descrever concepção científica e técnica, ben todação aos objetivos primários da peração orbital para o alcance do su s A, B e C deve ser completado em	em detalhe o ins n como dos requis missão do satélito ucesso da missão. uma próxima vers	strumento GLOW, do sitos do instrumento, e científico EQUARS e ão.
DATA: 27.09.2019	EDT: MISSÃO EQUARS		PÁGINAS: 83

EQUARS

PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW



AUTORES				
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA	
Delano Gobbi	CGCEA/DIDAE	30.09.2013	Off	
	_			
1				
	11			

REVISORES				
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA	
Hisao Takahashi	CGCEA/DIDAE	30/09/19	PI	
54				
1				

APROVADO POR			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Delano Gobbi	CGCEA/DIDAE	30.03.2018	O. pp
			U U
		1	

۴.	REVISÕES				
REV.	DATA	MUDANÇAS	AUTOR	APROVADO POR	
	1				
	5				
	(.)				



SUMÁRIO

1	INT	RODUÇÃO	
	1.1	Еѕсоро до Documento	9
	1.2	DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA	9
	1.2.1	l Documentos Aplicáveis (DA)	9
	1.2.2	2 Documentos de Referência (DR)	9
	1.3	ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES	9
	1.3.1	1 Lista de Definições e Acrônimos	9
2	0 00	ONCEITO DO INSTRUMENTO GLOW	11
3	A M	ISSÃO EQUARS	12
	3.1	INTRODUÇÃO	12
	3.2	OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS	12
	3.3	CARACTERÍSTICAS DA MISSÃO EQUARS	13
4	0 00	ONTEXTO DO INSTRUMENTO GLOW NA MISSÃO EQUARS	
	4.1	INTRODUÇÃO	
	4.2	QUESTÕES CIENTÍFICAS DO INSTRUMENTO GLOW DO PONTO DE VISTA DA MISSÃO EQUARS	
	4.3	ESTUDOS CORRELATIVOS COM OS INSTRUMENTOS DA MISSÃO EQUARS	
	4.4	Relação do Instrumento GLOW com Outras Missões de Aeronomia	19
5	OBJ	ETIVOS CIENTÍFICOS	21
	5 1		21
	5.2	VARIABILIDADE DO OXIGÊNIO ATÔMICO	
	5.3	BALANÇO DE ENERGIA DA MESOSFERA SUPERIOR EQUATORIAL	23
	5.4	MODOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS	23
	5.5	ACOPLAMENTO ENTRE A MESOSFERA E IONOSFERA: ONDAS EQUATORIAIS	25
	5.6	ACOPLAMENTO ENTRE A MESOSFERA E IONOSFERA: ONDAS DE GRAVIDADE	
	5.7	AQUECIMENTO TERMOSFÉRICO MTM	27
6	REQ	UISITOS DE ÓRBITA E PROCESSAMENTO	29
	6.1	COBERTURA GEOGRÁFICA	29
	6.2	ATITUDE	
	6.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	35
7	PRO	JETO DE CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW	41
	7.1	INTRODUÇÃO	41
	7.2	CONCEITOS BÁSICOS PARA MEDIDAS DE AIRGLOW	42
	7.3	MEDIDA DAS EMISSÕES DE AIRGLOW	45
	7.3.1	A Emissão Linha Vermelha do Oxigênio atômico	45
	7.3.2	2 Medida da Radiância do Airglow de $O(^1D - {}^3P)$	46
	7.3.3	3 Modelagem do Airglow de $O(^{1}D - {}^{3}P)$.	47
	7.3.4	A Emissão da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio	47
	7.3.5	5 Medida da Radiância da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio	
	7.3.6	5 Modelagem do airglow da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio	51
	7.4	CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA MEDIDAS DE AIRGLOW	51
	7.5	SUBSISTEMA ÓPTICO E DE DETECÇÃO (SOD)	53

EQUARS PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW



7.5.1	1 Conjunto Óptico	
7.5.2	2 Baffle Mecânico	
7.5.3	3 Obturador de Luz	
7.5.4	4 Unidade da Eletrônica de Fotodetecção (PD)	
7.6	SUBSISTEMA DE ELETRÔNICA DEDICADA (SED)	
7.6.1	1 Unidade de Eletrônica Auxiliar (AE)	60
7.6.2	2 Unidade de Potência (PWR)	60
7.6.3	3 Unidade Driver do Motor de Passo (SMDrv)	
7.6.4	4 Unidade de Controle, Processamento e Comunicação de Dados (ICDH)	
7.7	SOFTWARE EMBUTIDO	
7.7.1	1 Modos Operacionais	
7.7.2	2 Alocação de Memória	66
7.8	Projeto Mecânico	
8 REC	UISITOS DE VALIDAÇÃO	
8.1	CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE ABSOLUTA	
8.2	CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSMITÂNCIA DOS FILTROS ÓPTICOS	71
9 REF	ERÊNCIAS	
ANEXO A	- PARÂMETROS ESPECTROSCÓPICOS PARA UTILIZAÇÃO DO BANCO	DE DADOS HITRAN
(HIGH-RI	ESOLUTION TRANSMISSION)	
ANEXO E	- MODELAGEM DA EMISSÃO OI 630	
ANEXO C	C – MODELAGEM DA BANDA ATMOSFÉRICA DE O₂	



LISTA DE FIGURAS

- Figura 9 Distribuição das intensidades espectroscópicas (normalizadas) em função da Temperatura rotacional da distribuição, para emissão da banda Atmosférica (0-0) do O₂......49



Figura 15 Diagrama de blocos da unidade ICDH, representando, simbolicamente, os diversos circuitos
que constituem esta unidade, as respectivas interligações entre estes circuitos, as
interfaces com o OBC e outras unidades de eletrônica (AE, PD), e os sinais de hardware
mais representativos (analógicos e digitais)63
Figura 16 Diagrama de estado do fotômetro GLOW, em linguagem gráfica SysML, para o cenário de
operação Normal (dito, modo normal)65
Figura 17 Planilha de alocação de memória do instrumento GLOW 66
Figura 18 Fluxo de processo do projeto (design) e da manufatura do alojamento mecânico do
fotômetro GLOW67
Figura 19 Vista isométrica frontal do conjunto mecânico, com transparência da tampa superior e
frontal. As alças têm a função apenas de facilitar o translado do instrumento
Figura 20 Vista em corte lateral do conjunto mecânico, em que se observa nitidamente o berço do
apoio do motor de passo cujo eixo está acoplado diretamente ao disco obturador. Também
evidencia o conjunto as quatro unidades eletrônicas, ICDH, AE, PWR e SMDrv, na direção do
topo para base. A unidade de eletrônica da fotodetecção (PD) encontra-se disposta na linha
divisória entre o subsistema Óptico e de Detecção de sinal (SOD) e o subsistema eletrônico
(SED)
Figura 21 Elementos ópticos e de aquisição de sinal que caracterizam o fotômetro de airglow 70



LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos Orbitais do Instrumento GLOW
Tabela 2	Produtos de dados científicos e requisitos relevantes do GLOW para alcançar os objetivos
	científicos
Tabela 3	Quantidades para estimativa da Radiância da emissão OI $\lambda 630.0$, conforme equação (18).46
Tabela 4	Quantidades para estimativa da Radiância da emissão da banda $Atmosf{\acute{erica}}\left(0-0\right)$ do
	Oxigênio ${ m O}_2(b^1\Sigma)$, conforme equação (29)
Tabela 5	Especificação das Lentes e dos Filtros de Interferência (parâmetros comuns aos quatro
	conjuntos ópticos que constituem os canais do fotômetro)55
Tabela 6	Especificação dos Filtros Ópticos relativa às medidas das emissões de airglow55
Tabela 7	Especificação do projeto do baffle 56
Tabela 8	Análise Radiométrica Preliminar

EQUARS	PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW	(1
LOUINS			Ñ





1 INTRODUÇÃO

A energia solar absorvida pela atmosfera produz um regime térmico distinto em cada uma das regiões atmosféricas. A parcela energética relativa às emissões de airglow, que se originam por intermédio de reações espontâneas, participa do cômputo do equilíbrio térmico da alta atmosfera. O espectro das emissões de airglow é bastante amplo e é determinado, fundamentalmente, pela competição entre os processos fotoquímicos e dinâmicos em uma dada altura de camada. Tal característica intrínseca permite que se use o airglow como um excelente indicador para sondagem remota dos fenômenos atmosféricos. O fotômetro GLOW foi concebido com este princípio.

Este documento tem por objetivo descrever em detalhe o instrumento GLOW, do ponto de vista da sua concepção científica e técnica, bem como dos requisitos do instrumento, em termos de sua acomodação aos objetivos primários da missão do satélite científico EQUARS e de como deve ser sua operação orbital para o alcance do sucesso da missão.

1.1 ESCOPO DO DOCUMENTO

A Seção 2 deste documento sumariza os princípios de concepção do projeto do instrumento GLOW. A Seção 3 apresenta os objetivos e as características principais da missão EQUARS. A seção 4 mostra o alinhamento do instrumento GLOW frente aos objetivos da missão EQUARS; descreve também os estudos correlativos com os outros instrumentos do EQUARS, e a sinergia do GLOW com outras missões de satélite, pioneiras e futuras. A seção 5 apresenta os objetivos científicos detalhados, em consonância com a missão EQUARS. A seção 6 informa os requisitos de órbita e de processamento dos dados do GLOW. A seção 7 descreve em detalhes o projeto de concepção do instrumento GLOW, desde os conceitos básicos de radiometria de airglow indo até aos aspectos funcionais referentes à óptica do sensor, ao desempenho de sua radiometria, à eletrônica de aquisição de dados, monitoramento das funções vitais, controle dos subsistemas e comunicação com a plataforma orbital, incluindo os modos operacionais do software embarcado. A seção 8 explicita os procedimentos de calibração para validação dos dados de airglow adquiridos pelo GLOW.

1.2 DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA

1.2.1 Documentos Aplicáveis (DA)

[DA-1] EQUARS-0000-MS-001-C - Declaração do Escopo da Missão EQUARS

1.2.2 Documentos de Referência (DR)

- [DR-1] Mesopause Temperature Limb Sounder (MTLS) Final Report under CSA Contract 9F007-6-8005/001/SR (Glen Rumbold, Canadian Space Agency), September 30, 1997.
- [DR-2] EQUARS-2300-ANL-001-A Relatório de Análise de Missão

Outros Documentos de Referência: Vide Seção 9 (Referências Bibliográficas)

1.3 ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES

1.3.1 Lista de Definições e Acrônimos

Auxiliary Electronic (trad.: unidade de eletrônica auxiliar)

AE



BG	continuum Background (trad.: continuum espectral de Fundo)
BOL	Begin Of Life (trad.: Início de Vida)
EMI	Electromagnetic Interference (trad.: Interferência Eletromagnética)
EOL	End Of Life (trad.: Final de Vida)
FOV	Field of View (trad.: Campo angular de Visada)
GLOW	Airglow Photometer (trad.: Fotômetro de Airglow de 4 canais ópticos)
EGSE	<i>Electrical Ground Suport Equipment</i> (trad.: Equipamento para Suporte de testes funcionais de eletrônica)
HV	High Voltage (trad.: Alta Voltagem)
ICDH	Instrument Controller/Command & Data Handling (trad.: unidade eletrônica de Controle, Armazenamento e Comunicação de dados)
IRD	Interface Requirement Document (trad.: Documento de Requisitos de Interface)
ICD	Interface Control Document (trad.: Documento de Controle de Interface)
MLT	Mesosphere and Lower Thermosphere (trad.: Região (camada) entre a Mesosfera superior e a Termosfera Inferior)
NC	Not connected (trad.: Não Conectado)
NIR	Near Infrared (trad.: Infravermelho Próximo)
OBC	On-Board Computer (trad.: Computador de Bordo satelital)
PD	Photodetection (trad.: unidade eletrônica de detecção de sinal)
PDR	Preliminary Design Review (trad.: Revisão Preliminar de concepção de Projeto)
PW	Planetary Wave (trad.: Ondas Planetárias)
PWR	Power (trad.: unidade de eletrônica de potência)
SC	Spacecraft (trad.: Plataforma satelital)
SED	Subsistema de Eletrônica Dedicada
SMDrv	Stepping Motor Driver (trad.: Driver de motor de Passo (unidade de eletrônica))
SOD	Subsistema Óptico e de Detecção de sinal
SRD	Scientific Requirements Document (trad.: Documento de Requisitos Científicos)
ТВС	To Be Confirmed (trad.: Aguardando confirmação)
TBD	To Be Defined (trad.: Aguardando determinação)
TID	Travelling Ionospheric Disturbances (trad.: Distúrbios Ionosféricos Propagantes)



2 O CONCEITO DO INSTRUMENTO GLOW

O instrumento GLOW é um fotômetro de airglow. Airglow é um fenômeno óptico que pode ser definido, grosso modo, como a luz emitida continuamente pela atmosfera de um planeta. Caracteriza-se por ser uma radiação de intensidade relativamente tênue, amorfa, de extensa faixa espectral (ultravioleta ao infravermelho), e cuja origem está associada às transições radiativas espontâneas envolvendo átomos e moléculas, neutros ou ionizados, excitados pela absorção da energia solar (reações de fotólise ou reações de fotoionização) durante o dia ou por processos fotoquímicos decorrentes (reações de quimiluminescência) durante a noite.

A ocorrência do airglow depende, basicamente, da composição química atmosférica (especialmente, os constituintes minoritários), da Temperatura e da faixa de energia que excitam as espécies emissoras de fótons. Como uma consequência, a partir da análise do airglow, permite-se inferir informação sobre a concentração dos constituintes envolvidos e sobre o balanço de energia na camada de emissão. Além dos estudos derivados da natureza físico-química do airglow, também são de interesse as investigações sobre a variabilidade das estruturas de airglow devido à ação dos elementos dinâmicos e eletrodinâmicos nas camadas atmosféricas, como a Temperatura, as ondas e a variabilidade do plasma ionosférico.

O instrumento GLOW é classificado como um fotômetro espacial, destinado a medir a radiância omnidirecional, ou a taxa de emissão aparente, das emissões de airglow da alta atmosfera nos espectros da luz do Infravermelho Próximo (NIR, λ 761.9 nm) e do Visível (VIS, λ 630.0 nm). Estas emissões são provenientes, respectivamente, da região da mesosfera superior entre 90 – 100 km de altitude e da camada-F ionosférica entre 240 – 300 km de altitude.

O instrumento GLOW é concebido para ter sensibilidade adequada ao propósito de realização de medidas de airglow na visada do nadir da trajetória orbital do satélite. A operação do instrumento é condicionada ao setor de eclipse da órbita, evitando-se, por conseguinte, a complexidade de um projeto óptico dedicado à remoção dos efeitos de contaminação da radiação solar espalhada diretamente sobre a visada do instrumento.

A missão primária do GLOW é a medida da Radiância do airglow como indicador da dinâmica da alta atmosfera (neutra e ionizada) equatorial. O objetivo secundário do instrumento GLOW é a medida da Temperatura de airglow (propriedade termométrica) da mesosfera superior. Outros objetivos, como oportunidades, são as estimativas de: Densidade Espectral (SDE) da variabilidade do airglow que caracteriza os modos de Ondas Planetárias; Densidade do Oxigênio atômico; Taxa média de aquecimento mesosférico.



3 A MISSÃO EQUARS

3.1 INTRODUÇÃO

A concepção da missão do microssatélite científico EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*) visa a promover o avanço do conhecimento científico em Aeronomia Equatorial, com ênfase no entendimento da natureza e da evolução dos fenômenos físicos que perturbam o comportamento médio do plasma ionosférico, especialmente no setor da América do Sul. No contexto das alterações das condições do ambiente da alta atmosfera terrestre, o conjunto dos instrumentos científicos proporciona o monitoramento de parâmetros ionosféricos para aplicações em diagnósticos de Clima Espacial regional, estabelecendo uma relação profícua com os objetivos do programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) do INPE.

3.2 OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS

Possivelmente, certos modos de ondas atmosféricas, excitadas em altitudes da baixa atmosfera, e que alcançam a base da camada-F, atuam como gatilho às irregularidades na densidade de plasma, podendo evoluir, de acordo com as condições da velocidade de deriva vertical deste plasma, para depleções de plasma de larga escala, denominadas de bolhas ionosféricas, um processo eletrodinâmico característico da região ionosférica equatorial. Por intermédio da informação das condições eletrodinâmicas da ionosfera, bem como do espectro das ondas atmosféricas associadas às perturbações do plasma local, pode-se estudar a variabilidade da ocorrência e da amplitude do fenômeno das bolhas ionosféricas.

Do ponto de vista da influência das variações associadas aos campos elétricos da magnetosfera, o comportamento do plasma equatorial, particularmente sobre o setor brasileiro, exibe variações longitudinais significativas, geralmente diagnosticadas como intensificações de ionização na camada-E ionosférica. Neste sentido, estudos científicos desta natureza (*e.g.* Abdu, *et al.*, 2005) sugerem que a entrada de partículas energéticas (elétrons energéticos de até 30 keV) na região da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA) pode ser uma fonte importante destas modificações. Também, a precipitação destas partículas na região da SAMA pode contribuir para a variabilidade longitudinal observada na eletrodinâmica das bolhas ionosféricas. Estimando o fluxo destes elétrons que se precipitam na região da SAMA, é possível quantificar a condutividade ionosférica intensificada da camada-E, um parâmetro chave para o entendimento dos processos eletrodinâmicos que atuam na ionosfera equatorial.

Neste sentido, os processos de acoplamento energéticos entre a baixa e a alta atmosfera e a influência da SAMA sobre os processos da eletrodinâmica equatorial são os direcionadores principais da missão EQUARS.

Em suma, os principais objetivos científicos a serem investigados são:

(a) encontrar evidências diretas da importância da conexão entre as atividades dinâmicas da baixa atmosfera e a modificação das densidades de plasma ionosférico, concernente à geração e evolução das bolhas de plasma (irregularidades ionosféricas);



(b) identificar as fontes de excitação, a propagação e as características paramétricas dos modos de ondas atmosféricas;

(c) determinar a parcela de ionização devido à precipitação de partículas na região da SAMA e a sua influência nos processos da eletrodinâmica ionosférica equatorial.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA MISSÃO EQUARS

Com o objetivo de investigar tais processos, o sistema espacial que caracteriza a missão EQUARS é constituído por uma plataforma de microssatélite e uma carga útil de 5 (cinco) instrumentos: um analisador eletrostático denominado ELISA; o conjunto de sondas eletrostáticas denominado IONEX; o fotômetro de airglow (GLOW), o receptor de radio-ocultação GNSS (GROM); e o experimento tecnológico denominado APEX, e destinado a monitorar partículas energéticas ao longo da órbita satelital, compõem o conjunto dos instrumentos da missão EQUARS.

Os efeitos do acoplamento magnetosfera-ionosfera são verificados pelo analisador eletrostático de energia (ELISA) e pelo sensor de partículas de altas energias (APEX).

O instrumento ELISA é concebido para realizar medidas *in situ* do fluxo espectral de energias dos elétrons que participam dos processos de ionização característicos da camada-E e da camada-F, realizadas na região da trajetória do satélite a qual intercepta as linhas de campo geomagnético que guiam os elétrons à região da SAMA, em altitudes da ordem de 100 a 300 km. A grandeza física mensurável é o fluxo espectral direcional dos elétrons entre 1 a 27 keV. ELISA é constituído de 3 (três) módulos físicos — dois dos módulos referem-se aos sensores, com apontamentos perpendiculares entre si, e o terceiro refere-se à eletrônica dedicada —, que devem ser acomodados na plataforma do satélite, conforme os requisitos específicos que a técnica de medida de fluxo de partículas na região da SAMA exige e compatível com a especificação funcional e ambiental do instrumento.

O instrumento tecnológico APEX é concebido para realizar medidas *in situ* do fluxo espectral em altas energias das partículas (elétrons, prótons e alfa) que caracterizam o plasma ambiente ao longo da órbita satelital, proporcionando o mapeamento das fontes de energia exteriores (solar). A quantidade física que o detector mede é o fluxo espectral direcional das partículas. APEX é constituído de 2 (dois) módulos físicos — um dos módulos, denominado de sensor telescópico, é formado por um conjunto de quatro detectores de estado sólido; o outro módulo é a eletrônica dedicada —, que devem ser acomodados na plataforma do satélite, conforme os requisitos específicos que a técnica de medida de fluxo de partículas exige e compatível com a especificação funcional e ambiental do instrumento APEX.

As consequências das instabilidades magneto-hidrodinâmicas que originam as bolhas de plasma ionosféricas são verificadas pelo conjunto de sondas eletrostáticas (IONEX).

O instrumento IONEX é constituído pelas sondas *Langmuir* Dupla, Capacitiva de Alta Frequência e Temperatura Eletrônica. Basicamente, o conjunto das sondas eletrostáticas é concebido para realizar medidas *in situ* de parâmetros intrínsecos (temperatura dos elétrons e densidade numérica de plasma) do plasma ambiente da camada-F superior da região ionosférica, com o objetivo de caracterizar os eventos de irregularidades ionosféricas, determinando a ocorrência e a distribuição



destes eventos em função do tempo local e das condições ambientais ionosféricas. IONEX é constituído de 5 (cinco) módulos físicos — as quatro sondas eletrostáticas e o módulo da eletrônica dedicada —, que devem ser acomodados na plataforma do satélite, conforme os requisitos específicos que as técnicas de sondagem ionosférica exigem, e compatível com a especificação funcional e ambiental das sondas.

As ondas atmosféricas na base da camada-E ionosférica (região entre a mesosfera superior e termosfera inferior) e os eventos de bolhas ionosféricas, do ponto de vista óptico, são verificados pelo fotômetro de airglow (GLOW).

O instrumento GLOW é configurado para realizar medidas ópticas remotas da variabilidade do traçador radiométrico airglow, indicativo das assinaturas de eventos de bolhas ionosféricas, em altitude representativa do pico da camada-F ionosférica. Também, está configurado para realizar medidas da variabilidade do airglow para caracterização do espectro das ondas atmosféricas em altitude representativa entre a mesosfera superior e termosfera inferior. GLOW consiste de um único módulo físico, que acondiciona o subsistema óptico, e de detecção de fluxo de radiação, e a eletrônica dedicada. O subsistema óptico é constituído de quatro canais fotoelétricos para detecção das emissões de airglow noturno (nightglow), proveniente dos constituintes fotoquímicos presentes na alta atmosfera terrestre, sintonizados em quatro faixas de comprimentos de onda distintos. A análise da Radiância omnidirecional (integrada em 4π sr), ou equivalentemente, da Taxa de Emissão aparente (Taxa Volumétrica de Emissão integrada em uma coluna vertical), medida esta realizada em cada um dos canais ópticos, permite caracterizar a variabilidade das séries temporais, em latitude e longitude, de duas regiões distintas da alta atmosfera. As medidas nativas de airglow fornecidas pelo instrumento não têm resolução vertical. O instrumento GLOW deve ser acomodado na plataforma do satélite, conforme os requisitos específicos que a técnica de nightglow exige e compatíveis com a especificação funcional e ambiental do projeto deste instrumento óptico.

Os processos geofísicos de acoplamento entre a baixa e a alta atmosfera, do ponto de vista das medidas que caracterizam o regime da atmosfera neutra (troposfera e estratosfera), bem como o regime do plasma ionosférico, são verificados pelo receptor GROM que emprega a técnica de radioocultação GNSS, em abreviação, GNSS-RO.

O instrumento GROM realiza, através da análise da refratividade de um sinal de satélite GNSS em ocultação, um sensoriamento indireto da atmosfera terrestre, permitindo-se inferir um vasto conjunto de dados atmosféricos, entre os quais: o mapeamento do TEC (Conteúdo Eletrônico Total); o perfil vertical de densidade eletrônica; o índice S4 de cintilação ionosférica; o perfil vertical da temperatura estratosférica e o perfil vertical da pressão devido ao conteúdo de vapor de água troposférico (atmosfera úmida). A técnica GNSS-RO apresenta grande potencial de aplicação, a qual vai desde o monitoramento da resposta ionosférica aos eventos associados às tempestades magnéticas solares, até o aperfeiçoamento de modelos prognósticos de mudanças climáticas globais. GROM é constituído por 5 (cinco) módulos físicos — o receptor modelo IGOR e dois pares de antenas (precisão orbital e radio-ocultação) — , que devem ser acomodados na plataforma do satélite, conforme os requisitos específicos que a técnica de radio-ocultação exige e compatível com a especificação funcional e ambiental do receptor.



Concernente à configuração orbital, a solução de compromisso que atende, no atual momento, o maior número de requisitos dos instrumentos, considera um satélite com massa aproximada de 150 kg e um envelope estático com diâmetro de base de 1250 mm, altura de 952 mm e diâmetro de topo de 1122 mm, tomando como nominal uma órbita circular, de apontamento Nadir-plano orbital, de 15^o de inclinação e 635 km de altitude.

Os dados recebidos por intermédio da rede de instrumentos terrena, armazenados e distribuídos pelo EMBRACE, bem como os modelos de previsão em Clima Espacial, apoiarão esta missão satelital na geração dos produtos de ciência e de aplicação.

Além disso, em níveis gerenciais da missão EQUARS, considera-se viabilizar uma cooperação com missões de satélite internacionais, que têm sinergia e complementariedade com a missão EQUARS, tais como as futuras missões SPORT (*Scintillation Prediction Observation Research Task*), ICON (*Ionospheric Connection Explorer*) e GOLD (*Global-scale Observations of the Limb and Disk*). Certamente os instrumentos da missão EQUARS seriam beneficiados com uma possível disponibilidade de dados destas três missões aeronômicas.



4 O CONTEXTO DO INSTRUMENTO GLOW NA MISSÃO EQUARS

4.1 INTRODUÇÃO

Os produtos principais que devem ser fornecidos pelo instrumento GLOW, a partir dos dados coletados em operação orbital, referem-se às medidas da radiância omnidirecional, ou equivalentemente, às medidas da Taxa de Emissão aparente (ao longo de uma coluna vertical atmosférica), das emissões de airglow. Neste contexto, o fenômeno óptico de airglow deve ser empregado como um indicador, ou traçador, dos processos aeronômicos de duas distintas regiões da alta atmosfera: a região da mesosfera superior entre 80 e 110 km; e a camada-F ionosférica entre 240 e 300 km. Assim, do ponto de vista das medidas de airglow, a seguinte abordagem deve ser utilizada para atender aos objetivos científicos da missão EQUARS:

- (a) A aquisição de dados relativa à Radiância omnidirecional (ou Taxa de Emissão aparente) do constituinte mesosférico excitado $O_2(^{1}\Sigma^{+})$ (0-0) (banda-A), com o objetivo de obter informação sobre o comportamento dinâmico (ondas atmosféricas) da mesosfera superior na região equatorial e em baixas latitudes;
- (b) A aquisição de dados relativa à Radiância omnidirecional (ou Taxa de Emissão aparente) do constituinte ionosférico excitado OI λ630.0 (linha vermelha), com o propósito de registrar as assinaturas de variabilidade do plasma da camada-F ionosférica na região equatorial e em baixas latitudes.

4.2 QUESTÕES CIENTÍFICAS DO INSTRUMENTO GLOW DO PONTO DE VISTA DA MISSÃO EQUARS

O instrumento GLOW deve efetuar medidas do espectro de emissão da banda-A (dito, banda Atmosférica) do Oxigênio molecular. Esta emissão origina-se a partir da transição entre o estado de energia ${}^{1}\Sigma^{+}$ e o estado fundamental da molécula, ${}^{3}\Sigma^{-}$. É uma transição espectroscópica não permitida pelas regras de seleção dipolar elétrica, cuja espécie excitada $O_2({}^{1}\Sigma^{+})$ é denominada de metaestável. Em condições normais de pressão atmosférica, tais espécies seriam rapidamente desativas por reações de desativação energética colisionais (*quenching*), antes de emitir radiação. Entretanto, na mesosfera superior, a pressão é suficientemente baixa de tal maneira a permitir que tais espécies permaneçam excitadas por um tempo relativamente longo, de modo que a reação que representa a relaxação radiativa ainda seja competitiva. Um mecanismo cinético de transferência de energia (reação envolvendo um passo intermediário) é o responsável pela produção de $O_2({}^{1}\Sigma^{+})$, cuja Taxa Volumétrica de Emissão (unidades: fótons s⁻¹ cm⁻³) é proporcional ao fator de potência entre 2 e 3 da densidade do Oxigênio atômico.

A banda-A do da molécula de O_2 emite um airglow intenso centrado no comprimento de onda de λ 761.9 nm — comprimento de onda de referência da estrutura das linhas rotacionais que caracterizam a transição vibracional entre os níveis (0-0) —, com valores de Radiância entre 2 e 10 kR



¹ na visada zenital, com pico de emissão médio localizado na altitude de 94 km e largura média da camada, tipicamente, entre 8 e 10 km.

Uma característica relevante da espécie $O_2({}^{1}\Sigma^{+})$ é a possibilidade de usá-la como propriedade termométrica da alta atmosfera, a partir da informação contida na distribuição das intensidades espectroscópicas associadas aos níveis de energias das linhas rotacionais, desde que seja possível demonstrar que as intensidades espectroscópicas da banda-A obedeçam ao modelo de distribuição de Maxwell-Boltzmann (*e.g.* Heidinger *et al.*, 2000). O parâmetro Temperatura rotacional (dito, Temperatura de airglow), por sua natureza de estimativa, é ponderado pela distribuição da emissão ao longo da camada de airglow. Assim, o valor da Temperatura de airglow calculada deverá representar a Temperatura cinética média local do gás atmosférico na altitude do pico da emissão, nominalmente em z = 94 km.

A emissão da banda-A (0-0) não é visível por instrumentação localizada em solo, devido à sua absorção pelo Oxigênio molecular da média atmosfera (em torno de 60 km). Tal especificidade é uma vantagem para observações por instrumentos embarcados em satélites, principalmente quando se posiciona o instrumento em direção de visada do nadir orbital, pois não há a componente retroespalhada da emissão pela baixa atmosfera e pelo solo terrestre, simplificando a análise da contaminação espectral.

Neste contexto, as medidas de airglow da banda-A (0-0) devem ser usadas para:

- (a) Determinar a variabilidade longitudinal relativa da densidade numérica do Oxigênio atômico equatorial, dado a importância que este constituinte, sobremaneira ativo quimicamente, desempenha nos mecanismos de transporte e balanço de energia na mesosfera superior;
- (b) Verificar o balanço de energia da mesosfera superior e termosfera inferior (MLT, *Mesosphere and Lower Termosphere*) na região equatorial, utilizando-se das medidas de temperatura de airglow;
- (c) Identificar eventos ondulatórios (escala horizontal) nas medidas de airglow mesosférico, ao longo de uma órbita satelital, preferencialmente àqueles associados às instabilidades de plasma ionosférico;
- (d) Caracterizar os modos de propagação (livres e confinados) das ondas planetárias (ondas de Rossby e ondas de Kelvin) nas medidas de airglow mesosférico, e inferir a variabilidade destes modos.

O instrumento GLOW também deve efetuar medidas do espectro de emissão da linha vermelha do Oxigênio atômico no comprimento de onda de λ 630.0 nm. Tal emissão ocorre entre as altitudes de 240 – 300 km (camada ionosférica F2), com valores de Radiância entre 10 e 800 R na visada zenital, e é o resultado de uma transição atômica proibida pela regra de seleção dipolar elétrica; consequentemente, a emissão radiativa ocorre pela relaxação da espécie metaestável O(¹D). O mecanismo principal responsável pela produção destas espécies excitadas são as reações de recombinação dissociativa entre os íons O₂⁺ e NO⁺ e os elétrons livres ionosféricos. A Taxa

¹ Rayleigh (R), unidade radiométrica comumente utilizada para medir a radiância omnidirecional de fontes de radiação uniforme, estendida e tênue, como por exemplo, as emissões espontâneas de airglow atmosférico. Se a radiância (*L*) for quantificada em unidades de Megafótons s⁻¹ cm⁻² sr⁻¹, então em Rayleighs, a radiância omnidirecional será dada por: $4\pi L$.



Volumétrica de emissão é proporcional ao produto entre a densidade eletrônica e a densidade do íon O_2^+ ; não obstante, em uma primeira aproximação, na faixa de altitude considerada, a Taxa volumétrica de emissão reflete, em sua maior parcela, a variabilidade da densidade eletrônica (vide Anexo B deste documento).

A radiância da emissão OI λ 630.0 é bastante dependente dos movimentos verticais da camada F noturna (deriva vertical do plasma, devido ao termo $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$). Quando a camada F ascende, a densidade numérica de O_2^+ diminui, decrescendo a produção de $O(^1D)$ e, consequentemente, decaindo a radiância da emissão. Em altitudes menores a densidade de O_2^+ é maior, e, neste caso, a radiância da emissão será maior. Esta emissão também pode apresentar significativa variabilidade quando há ocorrência de subtempestades magnetosféricas, devido ao influxo de elétrons supertérmicos originados pela corrente de anel ionosférica. Este mecanismo adicional gera um acentuado aquecimento da termosfera, tal que uma parcela de remoção desta energia é efetivada pela emissão radiativa do OI 630.0 nm.

Tendo em vista que o mecanismo de produção de O(¹D) é, em primeira aproximação, proporcional à densidade eletrônica, as medidas de airglow da linha vermelha devem ser usadas como indicador das variações da densidade de plasma ionosférico, sobretudo em estudos que enfatizam:

- (a) A variabilidade de plasma ionosférico, especialmente as depleções de larga escala (bolhas de plasma);
- (b) As perturbações ionosféricas propagantes (TIDs, *Travelling Ionospheric Disturbances*) e as ondas equatoriais (modos de Kelvin);
- (c) Os efeitos termosféricos associados à condição de Temperatura Máxima à Meia-noite local (MTM, *Midnight Temperature Maximum*) em latitudes equatoriais.

4.3 ESTUDOS CORRELATIVOS COM OS INSTRUMENTOS DA MISSÃO EQUARS

O instrumento GLOW deve proporcionar um conjunto de novos dados aeronômicos na região equatorial, mesmo na ausência de quaisquer dados correlatos; porém, na disponibilidade de dados dos outros instrumentos EQUARS, cresce as possibilidades de avançar na completude das respostas às questões científicas formuladas pela missão. Além disso, dados correlatos podem ser provenientes de outras missões satelitais de Aeronomia ou mesmo de instrumentação terrena, como àquela disponibilizada pela rede de instrumentos do EMBRACE (vide [DA-1]), em regiões de baixas latitudes do Brasil.

Conforme descrito na seção 3.3, o satélite EQUARS possui cinco instrumentos científicos, incluindo o fotômetro GLOW, alguns dos quais podem valorar as medidas do GLOW. Especialmente, com os dados de radio-ocultação do instrumento GROM, dado sua potencialidade em se determinar a estrutura do perfil vertical da Temperatura na estratosfera, bem como caracterizar a variabilidade de longo termo de estrutura horizontal da Temperatura, será possível, desde que a relação sinal-ruído intrínseca dos dados permita, estimar os modos de propagação das ondas equatoriais que atingem a mesosfera superior, confrontando tais informações com os resultados do GLOW. Isso poderá ser realizado para eventos individuais ou em um embasamento estatístico.

Ondas de Gravidade de média escala na ionosfera, também conhecidas pelo acrônimo de TIDs (*Travelling Ionospheric Disturbances*), são frequentemente observadas por instrumentação



aeronômica localizada em solo. O instrumento GLOW também está configurado para detectá-las, embora seja limitado em sua capacidade de revelar a característica espectral completa destas ondas. Outra maneira de detectar as TIDs é por intermédio da análise dos dados provenientes de sondas ionosféricas que medem a densidade eletrônica *in situ*, como o conjunto de sondas que compõem o instrumento IONEX. Ainda, os dados correlacionados, em espaço e tempo, entre os instrumentos GLOW e IONEX, são fundamentais para caracterizar a atividade das depleções de plasma de larga escala (bolhas de plasma equatoriais). O GROM também pode apoiar a análise dos dados do GLOW do ponto de vista da variabilidade do plasma ionosférico, desde que ele fornece o TEC (Conteúdo Eletrônico Total) e, por intermédio de modelagem analítica, o perfil vertical da densidade eletrônica.

4.4 RELAÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA

As missões de satélite precursoras a prover dados de airglow foram realizadas ainda na década de 1970, por intermédio de fotômetros embarcados nos satélites ISIS-II (*International Satellites for lonospheric Studies,* Shepherd *et al.,* 1973) e OGO 6 (*Orbiting Geophysical Observatory,* Torr *et al.,* 1977). Já na década de 90, uma expressiva quantidade de dados das taxas de emissões de airglow originou-se pela operação do interferômetro imageador tipo Michelson WINDII (*Wind Imaging Interferometer,* Shepherd *et al.,* 1993), embarcado no satélite UARS, concebido no princípio do desvio Doppler a partir do interferograma gerado por linhas de airglow na região espectral VIS e NIR, com o propósito de inferir ventos e temperaturas em altitudes da mesosfera superior e da camada-F ionosférica.

A notável missão TIMED-GUVI (*Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics - Global Ultraviolet Imager,* Christensen *et al.*, 1993) lançada em 2001, e que ainda nos dias atuais continua em operação orbital, estabeleceu o estado de arte na técnica de utilizar sensores de imageamento para medir a radiância espectral das emissões de airglow e aurora, na região espectral de 120 a 180 nm do FUV, com o objetivo de investigar a composição, temperatura e os processos dinâmicos. A vantagem desta técnica é que na banda do FUV a contaminação espectral é negligenciável, tendo em vista que a atmosfera absorve grande parte das emissões que emitem nesta banda espectral, em altitudes abaixo de 90 km.

Com o objetivo de elevar a acurácia das medidas de densidade eletrônica ionosférica, principalmente na presença de gradientes de elevada magnitude (*e.g.* bolhas de plasma), a missão global de radioocultação GNSS, COSMIC (-1,-2) (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), utiliza-se de medidas de um fotômetro de airglow UV como técnica alternativa para inferir a variabilidade ionosférica mencionada, com o objetivo principal de resolver uma limitação inerente ao processo de inversão da integral de Abel, devido à suposição de simetria esférica da camada ionosférica. Tal fotômetro é conhecido pelo acrônimo TIP (*Tiny Ionospheric Photometer,* Dymond *et al.*, 2016), e designado para medir a linha espectral λ 135.6 nm, uma linha de emissão oriunda de uma transição eletrônica da espécie iônica metaestável O⁺. A Taxa Volumétrica de emissão é proporcional ao produto entre a densidade eletrônica e a densidade do íon O⁺; entretanto na região F estas quantidades são aproximadamente iguais, assim a Taxa Volumétrica de emissão é proporcional ao quadrado da densidade eletrônica, portanto muito sensível à variabilidade do plasma ionosférico — mais sensível do que o indicador OI λ 630.0 utilizado pelo instrumento GLOW. O fotômetro TIP coleta dados em condições de eclipse orbital, posicionando-se na direção de visada do nadir. Exceto pelos dispositivos da fotodetecção e da óptica do fotômetro, desenvolvidos com



tecnologia específica para medida no espectro UV, a concepção e a caracterização do TIP alinham-se com os requisitos do fotômetro GLOW. Entretanto, do ponto de vista dos objetivos científicos, o GLOW amplia a gama de produtos de dados de airglow, contemplando os estudos de acoplamento entre a mesosfera superior e a ionosfera.



5 OBJETIVOS CIENTÍFICOS

5.1 INTRODUÇÃO

A principal razão do instrumento GLOW para observar duas camadas de airglow verticalmente separadas, em que a camada inferior fornece informações do regime do fluxo de fluido na atmosfera neutra, e que a camada superior mostra o estado de ionização da camada-F ionosférica, é permitir a investigação dos processos de acoplamento entre a atmosfera neutra e a ionosfera. E, um dos fenômenos mais intrigantes que diz respeito à ionosfera em baixas latitudes, a dinâmica de geração e evolução das bolhas de plasma, tipicamente um processo de acoplamento entre a atmosfera neutra e a ionosfera neutra de geração e evolução das bolhas de plasma, tipicamente um processo de acoplamento entre a atmosfera neutra e a ionosfera, ainda é um tópico de pesquisa aberto em Aeronomia equatorial, necessitando uma maior quantidade de dados satelitais, correlacionando-os com medidas de instrumentos em solo, como imageadores, digisondas, radares e a rede de GNSS-TEC.

O instrumento GLOW foi concebido para realizar o sensoriamento remoto do fluxo de energia radiante, mais propriamente a radiância omnidirecional, na visada do nadir orbital. Desta forma, não se tem disponível, nas duas camadas observacionais, a resolução vertical dos sinais de airglow adquiridos. Esta limitação instrumental impõe, muitas vezes, a necessidade de apoio de modelos analíticos e numéricos que auxilie no diagnóstico mais preciso do objeto em estudo. No que diz respeito à resolução horizontal da medida de airglow, um limite de resolução mínima de aproximadamente 30 km de diâmetro é suficiente para atender os requisitos científicos a que se propõe o instrumento GLOW. Entretanto, tal resolução horizontal não permite a caracterização das ondas de gravidade internas de pequena escala, que são as responsáveis, em grande parte, pela transferência de energia e momentum na mesosfera superior.

Os objetivos científicos abordados pelo instrumento GLOW, a partir das medidas de radiância ao longo da órbita do satélite e do espectro horizontal e temporal das flutuações da radiância, dos canais que monitoram as emissões da mesosfera (referência em 94 km) e da ionosfera (referência em 250 km), são relacionados a seguir.

- (a) A variabilidade do Oxigênio Atômico, caracterizada pelos processos de fotoquímica e dinâmica de larga escala presentes na mesosfera superior. Este estudo requer a solução de um problema inverso, em que as medidas observacionais referem-se à variabilidade da radiância do airglow mesosférico da emissão de O₂.
- (b) A temperatura representativa da mesosfera superior (no pico da camada de emissão da banda Atmosférica de O₂, aprox.. em 94 km) e sua variabilidade de larga escala. O objetivo é inferir o balanço de energia da mesosfera superior equatorial.
- (c) A identificação e avaliação das variações latitudinais e sazonais associadas aos modos espectrais das ondas planetárias na mesosfera, sobretudo de interesse os modos de Kelvin (ondas equatoriais). O procedimento requer estimativa espectral-3D, via mínimos quadrados, com espaçamento não uniforme, das medidas da variabilidade da radiância e da temperatura do airglow mesosférico da emissão de O₂.
- (d) A investigação dos efeitos de modulação das ondas equatoriais sobre a variabilidade dos parâmetros de plasma ionosférico da região F, tomando como base a informação da estrutura horizontal da variabilidade da radiância do airglow ionosférico da emissão de Oxigênio atômico (OI 630.0 nm). O alcance de um entendimento do papel exercido pelas



ondas equatoriais no que tange à variabilidade dia a dia de ocorrência de *spread* F é o principal foco de interesse.

- (e) As oscilações de média escalas, geralmente associadas às perturbações ionosférica propagantes (TIDs) na densidade eletrônica, detectadas pelas assinaturas de estruturas quase-periódicas da radiância do airglow ionosférico da emissão de Oxigênio atômico (OI630.0 nm).
- (f) A investigação do fenômeno MTM (*Midnight Temperature Maximum*), uma anomalia de temperatura de larga escala, e de elevada variabilidade, observada no entorno da meia noite local da termosfera em baixas latitudes. Tipicamente, esta anomalia pode ser correlacionada com a intensificação da radiância do airglow ionosférico da emissão de Oxigênio atômico (OI630.0 nm).

5.2 VARIABILIDADE DO OXIGÊNIO ATÔMICO

Na região entre a mesosfera superior e a termosfera inferior a densidade numérica do Oxigênio atômico (notação: [O] ou n(O)) exibe um valor máximo, destacando-se como o principal constituinte minoritário moderador dos processos fotoquímicos e dinâmicos na região. Tendo em vista que a Taxa Volumétrica de emissão do airglow (notação: ε) originado pela emissão da banda Atmosférica de O₂ é uma função bastante sensível da concentração do Oxigênio atômico (Melo *et al.*, 2001), variações associadas a esta variável podem ser utilizadas de modo a inferir variações no Oxigênio. Note que a medida da radiância (integrada) da emissão de airglow fornecida pelo instrumento pode ser representada por uma série temporal em função da latitude e longitude, e integrada ao longo de uma coluna vertical, $\int \varepsilon(t, \theta, \varphi, z) dz \propto \int (n(O)(t, \theta, \varphi, z))^a dz$, em que *a* é um expoente representativo das reações de segunda e terceira ordem que constituem o esquema cinético das reações que produzem as emissões de airglow da banda-A. Assim, para atender a este requisito, deve-se desenvolver um procedimento que requer a solução de um problema inverso não linear.

Por exemplo, para recuperar o perfil de [O], pode-se adotar a parametrização de Reed & Chandra (Reed and Chandra, 1975), que segue o tradicional modelo de distribuição de Chapman, com três parâmetros a serem ajustados. Também, utiliza-se, em conjunto, um modelo empírico de atmosfera neutra, tal como o modelo NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002), para inicializar os parâmetros da distribuição de Chapman e para fornecer as densidades dos constituintes majoritários. A variável Temperatura do modelo é proveniente dos dados de Temperatura do airglow. Uma simplificada parametrização dos processos difusivos também pode ser realizada na equação da continuidade que descreve o processo de emissão da banda-A. Neste caso, um modelo de ventos médios da mesosfera superior, por exemplo, o modelo HWM-2015 (Drob, et al., 2015), deveria ser empregado. Assim, a taxa volumétrica de emissão é calculada a partir da equação da continuidade representativa do esquema cinético das reações que produzem o airglow da emissão da banda-A e, em seguida, numericamente integrada na visada vertical de modo a proporcionar a radiância zenital esperada (dados do GLOW). Em um modo iterativo, por exemplo, via o algoritmo de Levenberg-Marquardt (Press et al., 1992), os três parâmetros da distribuição de Chapman são novamente ajustados, até que se reproduza a radiância medida pelo fotômetro, dentro do erro experimental desta medida (minimização- χ^2). Na hipótese de convergência, tem-se um perfil médio representativo de [O] em função do tempo local, da latitude e da longitude. Note que esta técnica não é sensível aos



gradientes de [O] provocados seja pela presença de camadas de inversões térmicas ou pela presença de acentuados gradientes de ventos na mesosfera superior.

5.3 BALANÇO DE ENERGIA DA MESOSFERA SUPERIOR EQUATORIAL

A temperatura é uma das variáveis atmosféricas básicas que descreve o regime de fluxo de fluido da atmosfera. O conhecimento da temperatura na região da mesosfera superior contribui para investigação dos processos dinâmicos, fotoquímicos e ao balanço de energia (Beig *et al*, 2008). Os dados oriundos da informação da radiância da emissão da banda-A, inferidos via dois canais ópticos distintos, uma vez convertidos em Temperatura de airglow, podem ser assimilados por modelos analíticos ou numéricos que estimam a taxa de aquecimento e resfriamento causado pelo movimento vertical adiabático.

Faz-se relevante diferenciar a perda de energia devido à emissão radiativa de airglow da dissipação de energia que provoca o real resfriamento do gás atmosférico (Mlynczak and Solomon, 1993; Mlynczak *et al*, 2007). Neste sentido, os efeitos da variação da temperatura medida a partir do airglow são indiretos, uma vez que o airglow reduz a eficiência do aquecimento tanto solar quanto devido às reações fotoquímicas exotérmicas, não atuando diretamente para reduzir a temperatura cinética dos gases desta camada atmosférica. Enfim, para determinar da taxa de aquecimento médio (em K/dia) da mesosfera superior da região equatorial impõem-se a necessidade de estimar as parcelas das energias envolvidas no processo de absorção da radiação solar.

Contudo, os dados do instrumento GLOW não permitem identificar a mesopausa (camada limite da mínima temperatura atmosférica), pois as medidas de temperatura não possuem resolução vertical. Porém, permite-se estabelecer a variabilidade da temperatura representativa no pico da camada de emissão em função da latitude, longitude e da época do ano.

Do ponto de vista do acoplamento dinâmico entre as camadas atmosféricas, a variabilidade da temperatura da mesosfera superior pode ser correlacionada com o perfil da temperatura estratosférica, e de sua variabilidade (proporcional à energia potencial), através dos dados do GROM e da constelação COSMIC-2. A correlação entre estes dois conjuntos de dados permite a investigação da propagação vertical de ondas atmosféricas, em uma ampla diversidade de escalas espaciais e temporais, em função do *grid* de análise.

5.4 MODOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PLANETÁRIAS

As ondas planetárias são oscilações de baixa frequência e de larga escala longitudinal nos campos atmosféricos (temperatura, densidade, pressão, ventos). Elas são relevantes no entendimento da dinâmica estratosférica e mesosférica, particularmente como um importante *driver* da circulação de Hadley. As ondas planetárias originam-se por forçantes localizados na baixa atmosfera ou pela resposta ressonante do fluido atmosférico (modos livres) à variação latitudinal da vorticidade absoluta deste fluido ($\omega_a = \nabla \times \mathbf{u} + 2\Omega$, \mathbf{u} : vento; Ω : rotação do geóide). A vorticidade absoluta é conservada durante o movimento do fluido relativo ao geóide em rotação. Dois conjuntos de modos distinguem-se em termos de propagação atmosférica: modos de Rossby, incluindo os modos de Rossby-gravidade (mistos) e os modos de Kelvin.



i. Modos de Rossby

Os modos de Rossby são predominantes em regiões atmosféricas das médias e altas latitudes, em que a vorticidade absoluta é mais acentuada (no equador a força de Coriolis é negligenciável), e as ondas planetárias são conhecidas como modos normais de Rossby. Conforme uma parcela de fluido se move para o hemisfério Norte ou Sul, a vorticidade desta parcela de fluido varia. Como a vorticidade absoluta é uma quantidade que se conserva, a parcela de fluido deve rotacionar para produzir vorticidade relativa. Este movimento de rotação traz a parcela de fluido para sua posição anterior (movimento de restauração). Em suma, os modos de Rossby são produzidos a partir da conservação da vorticidade absoluta.

Os modos de Rossby são caracterizados invariavelmente pela velocidade de fase em direção ao Oeste geográfico, porém com velocidade de grupo sem direção preferencial, ou seja, seu campo de propagação é dispersivo, com forte atenuação na direção vertical. Nos conjuntos de dados de ventos da mesosfera superior, seja inferidos por radares situados em solo (*e.g.* Lima *et al.*, 2006) ou por instrumento embarcado em satélite (*e.g.* Wang *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2002), a climatologia dos modos periódicos de 5, 10 e 16 dias é bem conhecida (Jacobi *et al.*, 1998), sendo classificados com modos livres ou normais de Rossby. O modo periódico de quase-2 dias, também de climatologia bem estabelecida é interpretado como a manifestação de um modo normal misto Rossby-Gravidade.

ii. Modos de Kelvin

Os modos de Kelvin são ondas de larga escala (comprimento de onda horizontal tipicamente acima de ~ 2000 km), confinadas em baixas latitudes, formando um guia de onda equatorial. As amplitudes destes modos de ondas decaem rapidamente com o distanciamento latitudinal do equador, limitados, assim, em latitudes entre ± 15°, sendo que a componente meridional de velocidade (vento) é quase nula. Em certas circunstâncias, os modos de Kelvin podem propagar energia e momentum verticalmente. Apresentam uma característica de baixa dispersão cromática em seus campos propagantes, ou seja, a velocidade de fase é aproximadamente igual à velocidade de grupo em todas as frequências. Além disso, a velocidade de fase é positiva, o que implica em um regime de propagação bem definido, em direção ao Leste geográfico. Esta peculiaridade facilita a identificação destes modos de onda (Das e Pan, 2013).

Embora de climatologia não tão bem determinada quanto aos modos de Rossby, a atividade das ondas equatoriais apresenta-se na mesosfera superior em três velocidades de fase distintas: modos lentos de Kelvin (modos-SK), com período compreendido entre 15 e 20 dias; modos rápidos de Kelvin (modos-FK), com período entre 6-7 dias; modos ultrarrápidos de Kelvin (modos-UFK), com períodos entre 3-4 dias. Em particular, os modos UFK apresentam um comprimento de onda vertical extenso, acima de 50 km, um atributo que torna possível o alcance de altitudes além da mesosfera superior, exercendo influência no campo elétrico do dínamo ionosférico (Takahashi *et al.*, 2005).

iii. Estimação Espectral

Para seleção do método de estimação espectral, referente à identificação dos modos de ondas equatoriais que modulam os dados de airglow, três características sobressaem-se com respeito ao processo de aquisição: os dados ópticos estão sujeitos à contaminação espectral por fontes não mapeadas na visada do instrumento; os registros de airglow são tomados apenas em condições de eclipse da órbita satelital (ciclo de trabalho do GLOW); e a revisita de uma dada região espacial é não uniforme, variando ao longo da época do ano. Estas características produzem séries temporais da



variabilidade da radiância e temperatura de airglow, em função da latitude e longitude, com amostragem bastante irregular, implicando a necessidade do uso de um método de estimativa espectral que não requeira registros igualmente espaçados. Neste contexto, a análise mais apropriada é aquela proporcionada pelo ajuste de funções harmônicas via mínimos quadrados (LSSA– *Least-Squares Spectral Analysis*), um dos quais, o método do Periodograma de Lomb-Scargle, usado, por exemplo, no trabalho de Takahashi *et al.* (2002). No entanto, originalmente, este método é parametrizado para atender às series temporais estacionárias (*trends* negligenciáveis). Para remover esta restrição, que de fato, em geral, não é aderente à natureza dos dados atmosféricos, uma generalização do periodograma de Lomb-Scargle, no qual o modelo paramétrico de ajuste segue a função: $\phi[t] = A \sin \omega t + B \cos \omega t + C$, é mais adequado para o propósito.

Dados de suporte provenientes de radares meteóricos localizados em regiões de baixas latitudes podem contribuir bastante para esta análise. Também, as informações provenientes dos perfis de Temperatura da estratosfera fornecidas pela análise de radio-ocultação do instrumento GROM podem auxiliar na identificação dos modos de propagação das ondas (vide seção 4.3).

É conhecido que o modelo numérico de Circulação Geral Kyushu-GCM (Fujiwara e Miyoshi, 2009), recentemente acoplado com os processos de fotoquímica (Shinagawa, 2009) e de eletrodinâmica ionosférica (Jin *et al.,* 2008) ora denominado de GAIA (*Ground-to-Topside model of Atmosphere and lonosphere for Aeronomy*), tem sido utilizado para avançar no entendimento da dinâmica das ondas planetárias na atmosfera (*e.g.* Egito, 2013). Por exemplo, Miyoshi e Fujiwara (2006) utilizaram o modelo para investigar o mecanismo de excitação da oscilação intra-sazonal observada no vento zonal médio da mesosfera equatorial, e mostraram que a interação do escoamento médio com os modos Kelvin UFK e com as marés diurnas é um fator importante para a geração desta oscilação intra-sazonal. A utilização deste modelo pode auxiliar muito no entendimento dos resultados a serem alcançados.

5.5 ACOPLAMENTO ENTRE A MESOSFERA E IONOSFERA: ONDAS EQUATORIAIS

Os dados de ionogramas, produzidos por ionossondas localizadas em baixas latitudes, têm evidenciado que os parâmetros característicos do plasma ionosférico são modulados por oscilações de períodos entre 3 – 4 dias, creditadas às ondas equatoriais, especificamente aos modos de Kelvin UFK (Abdu *et al.*, 2015).

A teoria sobre o acoplamento entre um campo de ondas propagantes da baixa atmosfera e o campo elétrico ionosférico sugere que se o alcance de propagação das ondas for limitado à camada-E (até aproximadamente 120 km), as ondas poderiam modular localmente o sistema de ventos neutros locais, tendo como resultado a modulação do campo elétrico desta região e o consequente efeito, pela teoria do dínamo ionosférico, de modificação do campo elétrico na camada-F. No entanto, se as ondas alcançarem altitudes superiores a 120 km, elas mesmo poderiam modular diretamente o vento neutro termosférico e, por conseguinte, o dínamo da camada-F. Também, os modos UFK poderiam transmitir oscilações à velocidade de deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ (subida da base da camada-F), com consequentes efeitos no campo elétrico em condições de início de noite local, podendo controlar a variabilidade dia-a-dia de desenvolvimento das bolhas de plasma equatoriais durante o período sazonal de ocorrência de *spread-F* (Abdu *et al.*, 2019).



O procedimento de análise dos dados de airglow, para discutir tais mecanismos sugeridos de acoplamento entre a baixa atmosfera e a ionosfera, deve seguir a mesma linha de ação descrita na seção 5.4, ou seja, a realização de estimativa espectral da radiância das emissões de airglow mesosférico (O₂ banda-A) e das emissões de airglow ionosférico (OI λ 630.0). Adicionalmente, uma análise de correlação dos resultados entre o comportamento espectral das duas séries temporais, apoiados por dados de solo de imageadores, ionossondas e de radares meteóricos, quando possível, fornecem suporte às conclusões deste estudo.

5.6 ACOPLAMENTO ENTRE A MESOSFERA E IONOSFERA: ONDAS DE GRAVIDADE

As ondas de gravidade (GWs) atmosféricas têm um amplo espectro de escalas (espacial e temporal), desde as ondas de gravidade acústica de pequena escala até ondas de gravidade inerciais de larga escala. As GWs são observadas por instrumentos de solo (LIDAR, Radar Meteórico, imageadores de airglow etc.) e por instrumentos embarcados em satélite. Tipicamente, a fonte destas ondas pode estar conectada com sistemas meteorológicos convectivos e/ou forçantes orográficos da baixa atmosfera ou com processos de instabilidades e/ou interações não lineares (ondas secundárias) da mesosfera superior. Conforme uma GW propaga-se verticalmente, ela interage continuamente com o fluxo médio da atmosfera (ventos e temperatura), modificando a sua transmissividade de atenuação, que depende de vários processos físicos dissipativos — a saber, a viscosidade molecular e turbulenta, a difusão não linear (saturação ou quebra de onda), a condução térmica, o amortecimento radiativo e o arraste iônico. Neste sentido, a propagação vertical de uma GW pode ser entendida como a competição entre o crescimento exponencial $\exp(z/2H)$, próprio da amplitude das variáveis de fluido, e a atuação dos processos dissipativos ao longo da sua trajetória ascendente na atmosfera. Este percurso é caracterizado por uma transferência contínua de fluxo de momentum e energia da onda ao fluxo médio atmosférico, acelerando ou amortecendo este fluxo médio.

As assinaturas das GWs na região ionosférica geralmente são referidas como distúrbios ionosféricos propagantes (TID, *Travelling Ionospheric Disturbances*) e modulam a densidade de plasma ionosférica. O trabalho pioneiro de Hines (1960) já associava as TIDs com a atividade das GWs verticalmente propagantes que alcançavam altitudes da ionosfera (acima de 200 km). O trabalho de Miller *et al.* (1997) investigou o mecanismo das TIDs eletrodinâmicas, que ocorrem no período noturno e estão relacionadas às intensas modificações do campo elétrico na camada-E ionosférica, produzindo acentuadas flutuações no conteúdo eletrônico total ionosférico (TEC). O mecanismo de desenvolvimento das TIDs eletrodinâmicas tem sido atribuído à instabilidade local de plasma Perkins, com o objetivo de entender a ocorrência do *spread-F* em médias e baixas latitudes.

Em geral, as TIDs podem ser classificadas em dois grupos: TIDs de larga escala (LSTID) e TIDs de média escala (MSTID). LSTIDs apresentam períodos entre 0.5 e 5 horas e comprimentos de onda horizontal maior do que 1000 km, propagando-se verticalmente em regime de baixa atenuação, portanto, relativamente, de importância secundária em termos de transferência local de momentum e energia ao fluxo médio. A fonte destas ondas geralmente é associada à migração latitudinal dos efeitos de aquecimento Joule do plasma ionosférico na região auroral (altas latitudes), além de outras fontes sugeridas, como por exemplo, os efeitos dissipativos proporcionados pela precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA).



As MSTIDs manifestam-se com períodos menores do que 60 min e comprimentos de onda horizontal menores do que 1000 km. Têm importância primária em processos que envolvem a transferência local de momentum e energia ao fluxo médio, pois são facilmente absorvidas na ionosfera.

Conforme mencionado anteriormente, a assinatura das TIDs é manifestada como flutuações de natureza quase periódica da densidade eletrônica ionosférica. A radiância do airglow da emissão OI630.0 nm é proporcional à densidade eletrônica e, tipicamente, tem sido usado como um indicador do regime de propagação das TIDs. Neste sentido, o instrumento GLOW tem resolução espacial suficiente para detectar eventos de TID de larga escala.

As TIDs são reconhecidas como importantes drivers da variabilidade diária da ionosfera. Por exemplo, as depleções de plasma de larga escala (bolhas de plasma), de particular importância na eletrodinâmica ionosférica equatorial, têm como um dos mecanismos principais de desenvolvimento a instabilidade de plasma Rayleigh-Taylor na camada-F. Neste mecanismo, atribuem-se às TIDs o papel de desencadear a instabilidade. Um segundo exemplo diz respeito à relação entre a atividade das TIDs e a ocorrência das camadas-E esporádicas, uma composição de nuvens alongadas não uniformes, de intensa ionização, no interior da camada-E.

5.7 AQUECIMENTO TERMOSFÉRICO MTM

A temperatura termosférica em baixas latitudes e no equador exibe um comportamento anômalo de larga escala e alta variabilidade no entorno da meia noite de tempo local, apresentando valores de temperatura entre 50 – 200 K acima da média. Esta anomalia, conhecida desde a década de 1970, é denominada de Máxima Temperatura à Meia Noite Local (MTM). A formação do MTM foi pela primeira vez modelada com sucesso por Akmaev *et al.* (2009), usando um modelo sofisticado de Circulação Global (GCM) para energética do sistema Termosfera-Ionosfera e Mesosfera. O processo de desenvolvimento desta anomalia é conjecturado como o resultado do acoplamento entre os efeitos das marés térmicas que se propagam da baixa atmosfera e as marés termosféricas geradas *in situ* pela radiação solar no espectro EUV, em um ponto subsolar na região equatorial. Basicamente, tal acoplamento produz uma expansão súbita e localizada da pressão hidrostática e da temperatura, invertendo a direção da componente meridional do vento termosférico, afastando-se do equador. Por sua vez, esta inversão causa uma deriva descendente da camada-F (dínamo ionosférico), aumentando subitamente e momentaneamente a taxa de recombinação dissociativa da emissão de airglow Ol630.0 nm e, por consequência, intensificando a radiância da emissão (Figueiredo *et al.*, 2017).

Por ser um fenômeno de bastante complexidade em termos de acoplamento entre a energética da atmosfera neutra e do plasma ionosférico, é de interesse realizar um estudo estatístico detalhado do fenômeno MTM, de modo a analisar a sequência de observações da radiância da emissão OI λ 630.0 e a sua variabilidade em escala espacial e temporal. Para uma interpretação mais detalhada do fenômeno, o modelo ionosférico IRI-2012 (Bilitza *et al.*, 2012) ou mesmo o modelo SUPIM, devem apoiar a investigação.

Um estudo similar a atual proposta do instrumento GLOW foi realizado por Chiang *et al.* (2013) fazendo uso dos dados do imageador óptico ISUAL, embarcado no satélite FORMOSAT-2, com uma taxa de revisita regular na região equatorial. Ao menos dois resultados importantes apontados por



este estudo sugerem: (a) uma correlação entre a localização das anomalias MTM com os efeitos do campo magnético próximo à região equatorial; (b) uma notável dependência sazonal da ocorrência do fenômeno MTM. Os dados do instrumento GLOW têm a potencialidade de revisitar estes resultados, podendo sugerir novos desdobramentos a cerca do entendimento do fenômeno MTM.



6 REQUISITOS DE ÓRBITA E PROCESSAMENTO

6.1 COBERTURA GEOGRÁFICA

O instrumento GLOW fornecerá um conjunto de observações de uma das regiões geográficas mais ativas em termos de disponibilidade de energia para geração de ondas: as baixas latitudes, no entorno do equador geográfico, conforme é mostrado pelo excelente exemplo da Figura 1, por intermédio de dados de radio-ocultação. Sabe-se que a faixa de cobertura das latitudes observadas é definida pela inclinação da órbita e pela direção de visada do instrumento; enquanto que a resolução longitudinal no entorno do equador é determinada pela altitude orbital do satélite.



Figura 1 Dados de Rádio-Ocultação da constelação COSMIC-1: Estrutura horizontal da variabilidade da Temperatura no nível de 30 km de altitude. (http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/)

Em um primeiro *insight*, admitindo-se a órbita circular, uma cobertura latitudinal maior seria mais atrativa para efeitos de procedimentos de assimilação de dados em modelos numéricos de Circulação Geral, tal como os que fornecem suporte aos resultados previstos pelo GLOW. No entanto, este ponto de vista pode dificultar os estudos das ondas equatoriais, objeto de interesse científico maior. Conforme mencionado na Seção 5.4, as ondas equatoriais são confinadas em latitudes próximas ao equador geográfico e a amplitude de seu campo de propagação decai rapidamente a partir de ±15° de latitude. Como consequência, a quantidade de revisitas satelitais (observações da mesma área de alvo do fenômeno depois de um ciclo operacional de repetição) está diretamente relacionada ao processo de amostragem dos dados, em ambos os domínios espacial e temporal, de modo a evitar que uma possível insuficiência de amostras prejudique a confiança na estimação espectral da variabilidade de airglow que caracteriza os modos de propagação horizontais das ondas.

Um software de simulação especialmente concebido para análise de missão do instrumento GLOW **[DR-2]**, que emprega grades espaciais e revisitas ao longo de um ano de operação, na condição de eclipse orbital, permite discutir a inclinação satelital mais favorável à observação das ondas equatoriais na altura de emissão do airglow mesosférico. Neste sentido, uma grade cartesiana padrão foi estabelecida, permitindo-se variações das longitudes geodésicas entre -180° – +180° e das



latitudes geodésicas em termos do ângulo (positivo e negativo) de inclinação satelital (não necessariamente coincidente). Os resultados são discutidos em termos das células da grade, discretizada em unidades de $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ (resolução da grade), compatível com a escala horizontal mínima destas ondas (vide Seção 5.4), conforme critério de amostragem de Nyquist. A simulação inicia em 15h UTC (01.01.2019) e finaliza em 14h UTC (31.12.2019), com passo de 1 s, sob a condição de sombra, em uma altitude de 635 km, excentricidade de 0.004, altitude do alvo de 94 km e em duas órbitas distintas de inclinação: 15° e 25° .

A Figura 2 é composta de três distintas formas gráficas para exibir o número de ocorrência de revisitas, em termos da latitude e longitude geodésicas, calculada para um ângulo de inclinação orbital de 15°, em função da resolução da grade de $6^{\circ} \times 6^{\circ}$. Da mesma forma, a Figura 3 caracteriza o número de ocorrência de revisitas em função da resolução da grade, porém para um ângulo de inclinação orbital de 25°, com o objetivo de discutir a tendência de inclinação mais favorável às observações do instrumento GLOW. Observe que as estatísticas das coordenadas estão no sistema geodésico, fazendo com que a latitude supere o ângulo de inclinação orbital. Também, as células de ±180° de longitude, e de igual latitude, correspondem à mesma célula. Para efeitos práticos, as quantidades de revisitas são atribuídas ao centro de cada célula. Por exemplo, na Figura 2, o número de revisitas de 299 vezes abrange as latitudes entre -03° e $+03^{\circ}$ e as longitudes entre -003° e $+003^{\circ}$. De maneira geral, referente às células centradas ao longo do equador, que são significativas para detecção dos modos de ondas equatoriais, para uma inclinação de 15° as quantidades de revisitas estimadas mostram um valor médio de 296 (± 6) revisitas por célula, bastante favorável quando comparado ao valor médio de 191 (± 11) revisitas por célula, estimada ao simular a órbita para uma inclinação de 25°. Isto implica que um acréscimo médio de 55% de ocorrência de revisitas por célula é alcançado, ao optar-se pelo ângulo de inclinação orbital de 15° em detrimento a uma inclinação maior, como por exemplo, o ângulo de 25°.

Também, o tempo de revisita (*RT*), ou período de revisita, definido como o tempo decorrido entre duas observações sucessivas do mesmo alvo representado por uma determinada célula de resolução em área, está diretamente relacionado ao processo de amostragem das séries temporais em termos da latitude e longitude. Em geral, o valor de *RT*, para uma dada célula, é função do ângulo de inclinação orbital e varia bastante durante o ciclo de um ano de operação orbital. Especialmente, se, para uma determinada célula, o valor de *RT* é muito elevado (muito acima de 2 dias), prejudica-se a confiabilidade estatística de detecção dos modos espectrais das ondas equatoriais. Na faixa dos ângulos de inclinação (entre 15° e 25°), os resultados alcançados pela simulação ao longo de 1 ano, do ponto de vista dos valores de *RT*, para uma determinada célula (resolução de 6°× 6°), mostram as seguintes propriedades gerais:

- (a) Lacunas (valores elevados de *RT*) com extensão bastante variável, em média, entre 10 e 30 dias, alternam-se periodicamente, cujo valor médio é equivalente à extensão da lacuna.
- (b) Excepcionalmente, em algumas células, estas lacunas podem ser muito extensas, com valores de *RT* acima de 60 dias, prejudicando seriamente a análise das ondas;
- (c) As séries temporais exibem intervalos segmentados de baixos valores de RT, nos quais a distribuição estatística associada é relativamente uniforme, apresentando um padrão quase unimodal, com valores médios de RT em torno de 1 dia, suficiente para o propósito de análise espectral das ondas. Esta é a propriedade mais significativa exibida pelos valores de RT.



EQUARS-0000-ANL-002-A

31 de 83



150

100

200

300

400

-20

satelital de 25°.

200



A Figura 4 exemplifica os resultados alcançados pela simulação de *RT*, especialmente para duas células observacionais, superpostas no mesmo gráfico, identificadas nos diagramas da Figura 2 ou da Figura 3 pelas células vermelhas, que abrangem os sítios de observações aeronômicas terrenas: São João do Cariri (-7.39°; -36.53°) e Boa Vista (2.82°, -60.67°).



S. J. Cariri (-7.39, -36.53)

Boa Vista (2.82, -60.67)

Figura 4 Simulação dos valores de *RT* (*Revisit Time* ou *Revisit Period*) associadas às células que contém os sítios observacionais terrenos de São João do Cariri (PB) e Boa Vista (RR), calculada para um ângulo de inclinação orbital de 18°. Observe que as séries temporais, a serem adquiridas pelo instrumento GLOW ao longo de 1 ano, apresentam amostragem bastante irregular, com alternação de lacunas, conforme sintetizado no texto. Os intervalos (segmentos) de amostragem quase uniforme (períodos próximos a 1 dia) exibem um comprimento médio de 15 dias, compatível com os requisitos de amostragem para os modos espectrais das ondas equatoriais rápidas e ultrarrápidas (ver Seção 5.4).

De maneira geral, conclui-se que uma órbita circular de menor ângulo de inclinação orbital, **próxima ao entorno de 15°**, parece fornecer uma revisita mais favorável aos estudos das ondas equatoriais. Entrementes, a simulação apresentada nesta seção ainda pode evoluir, com o objetivo de, estabelecendo uma faixa de valores desejados à estimativa do Tempo de Revisita (*RT*), proceder-se à otimização do ângulo de inclinação orbital referente às observações de airglow. No entanto, os estudos de dinâmica de ondas planetárias realizadas em observatórios terrenos, também mostram que resultados muito significativos são obtidos quando se privilegia a abordagem de Tempo Local em detrimento da cobertura latitudinal, ou seja, fixando-se uma célula espacial e estabelecendo um *binning* temporal, restrito à condição de eclipse orbital. Uma simulação de estimativas de *RT* com esta abordagem também pode ser realizada.



6.2 ATITUDE

Geralmente, em se tratando de sensores ópticos, o grau de definição de controle da atitude e o conhecimento do apontamento exercem consequências relevantes sobre os dados adquiridos em órbitas satelitais. As medidas têm como alvo as camadas de emissões de airglow na mesosfera, entre 90 km e 100 km, e na ionosfera, entre 240 km e 300 km. É requisito fundamental que as duas regiões de altitude, de forma simultânea, permaneçam durante todo o tempo da eclipse orbital na visada do instrumento GLOW. A Figura 5 mostra uma visão simplificada da direção de apontamento do instrumento GLOW e as extensões médias (diâmetro da seção transversal de uma coluna de airglow) das amostras de airglow adquiridas na ionosfera e na mesosfera. Considerando a altitude representativa do airglow mesosférico (z = 94 km), a geometria simplificada da Figura 5 permite estimar, aproximadamente, a resolução espacial da medida do airglow, cujo valor é de 35.9 (± 3.5) km de extensão, ou $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ (± 0.03°) no equador. Para o airglow ionosférico, usando como referência a altitude z = 250 km, a mesma geometria simplificada permite também estimar a resolução espacial da medida, neste caso, 25 (± 2.6) km de extensão, ou $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ (± 0.02°) no equador.



Figura 5 Descrição esquemática simplificada do apontamento do instrumento GLOW, supondo uma altitude orbital média de 635 km e uma órbita circular de velocidade tangencial de 7.5 km/s. A largura de banda (nominal) do sinal de airglow é de 10 Hz.

Considerando a altitude orbital nominal de 635 km, uma mudança de ±0.8° de apontamento ao longo da linha de visada é equivalente, na altitude de referência do airglow mesosférico (z = 94 km), a um desvio de ~ 40 km no ponto de tangência desta linha de visada [**DR-1**], significando que, com esta mudança de magnitude do apontamento, a mesma parcela de airglow ainda continua a ser visualizada. Basicamente, isto se justifica em função da elevada taxa de aquisição do instrumento (*gate* de 50 ms), dado que o satélite tem uma velocidade tangencial de 7.5 km/s na altitude orbital nominal, fazendo com que a separação espacial entre cada amostra adquirida seja da ordem de ~0.5 km, ou seja, existe uma alta sobreposição em volume (integrado em uma coluna atmosférica) de amostras do instrumento. Assim, as medidas de airglow não experimentam perda de acurácia pelo desvio de apontamento no grau considerado.



Usando um sistema de estabilização de três eixos, o desempenho em acurácia de atitude alcançado é geralmente menor do que $\pm 0.1^{\circ}$ [**DR-1**]. Isto leva a uma incerteza máxima de 5 km em altitude. Observe, no entanto, que a medida de airglow efetuada pelo instrumento GLOW não tem resolução em altitude, pois se refere a um único "pixel" integrado em uma coluna atmosférica de airglow; sendo assim, uma acurácia de apontamento de $\pm 0.1^{\circ}$ é bastante aceitável.

A Tabela 1 a seguir detalha os requisitos de apontamento e de cobertura geográfica do instrumento GLOW, conforme discussão sumária realizada ao longo desta Seção.

Características da órbita	Equatorial, circular, altitude de 630 km (ELEO)
	Inclinação: entre 15° e 25°
Orientação do instrumento	Apontamento para o Nadir (nominal)
Acurácia	Conhecimento de Atitude: \pm 0.1 $^{\circ}$
Aculacia	Controle de Atitude: \pm 0.8 $^{\circ}$
Controle de Atitude	Ativo, 3-eixos
	- Camada entre 90 km e 100 km, altitude de referência
Cobartura am Altituda (alva)	(pico) em 94 km (airglow mesosférico);
cobertura em Attitude (alvo)	- Camada entre 240 km e 300 km altitude de referência
	(pico) em 250 km (airglow ionosférico)
Cobertura Latitudinal geográfica	Ênfase entre -15° e +15°
Largura de Banda do sinal*	10 Hz (nominal)
Resolução vertical	Não possui
Resolução horizontal nativa em	∼ Ø35.9 ± 3.5 km \Rightarrow
z=94 km (airglow mesosférico)	grid ~ 0.4 $^{\circ}$ $ imes$ 0.4 $^{\circ}$ (± 0.03 $^{\circ}$) (no equador)**
Resolução horizontal nativa em	~ ∅25.4 ± 2.6 km ⇒
z=250 km (airglow ionosférico)	grid ~ $0.3^\circ imes 0.3^\circ$ (± 0.02°) (no equador)**

Tahela 1	Requisitos Orbitais do Instrumento GLOW

* (Largura de Banda do sinal) $\Delta f = 1 / (2 \tau_{gate})$ (τ_{gate} : gate do sinal da fotodetecção)

** O grid deforma-se à medida que a mensuração se afasta das latitudes equatoriais.

6.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

A Figura 6 apresenta uma descrição esquemática do Processamento de Dados do instrumento GLOW. Os dados brutos das emissões de airglow (DATA_GLOW) são sinais de pulsos em unidades do tempo de aquisição dos dados, também denominado tempo de *gate* do sinal da fotodetecção — intervalo temporal no qual o fotosensor é habilitado a realizar a contagem dos fotoelétrons. Estes sinais são codificados e transmitidos em registros de 2 Bytes. O instrumento está programado para responder a três distintos tempos de aquisição da fotodetecção (*gate*): 20 ms, 50 ms e 100 ms. O modo nominal estabelece como padrão um *gate* de 50 ms.



Basicamente, os sinais são gerados em órbita satelital e transmitidos via telemetria, em *frames* de 256 bytes, para estação terrena. Faz-se importante mencionar que, no mesmo *frame* de recepção, estes pacotes de dados vêm acompanhados de dados de monitoração do instrumento (DATA_MON), geralmente chamados de dados de *housekeeping*, dos dados de calibração do instrumento (DATA_CAL) e dos dados de referência de *clock*. A Figura 6 identifica o fluxo destes dados provenientes do GLOW e transmitidos via telemetria do OBC (Computador de Bordo). O instrumento GLOW aceita vários telecomandos (estação terrena) e comandos especiais a partir de subsistemas de satélite.

A mesma Figura 6 aponta que o processamento dos dados de ciência, dos dados de calibração e dos dados de housekeeping deve ser realizado em solo (off-line). Uma vez que os pacotes dos dados sejam enviados à estação terrena, eles são segmentados por instrumento e ordenados em tempo, removendo-se possíveis erros de telemetrias. Concernente aos dados de ciência, este estágio é conhecido como dados de nível LO (dados brutos). Em seguida, os dados brutos, que são provenientes dos 4 (quatro) canais eletro-ópticos, são convertidos em variáveis físicas observáveis, neste caso, a Radiância omnidirecional das emissões, em unidades Rayleighs. A conversão é realizada a partir de manipulações matemáticas relativamente simples — envolve um procedimento matemático de convolução discreta entre parâmetros radiométricos (instrumental) e os fatores de intensidade espectroscópicos (teórico) —, porém dependentes de um conjunto de fatores que requerem correções em função do monitoramento da temperatura operacional dos filtros ópticos (vide: bloco da Correção da Curva de Transmitância) e, eventualmente, em função de decalagem de longo termo (aging) da responsitividade dos fotosensores, realizada a partir do procedimento periódico da luz (LED) de calibração interna (vide: bloco da Correção Radiométrica). A técnica radiométrica envolvida na geração dos produtos de dados de ciência é descrita em detalhe na seção 7.3. Também, nesta etapa os dados brutos de ciência e de calibração são integrados em unidades de tempo de 1 s, para posterior conversão em grandezas físicas. O processo sequencial que define esta etapa é denominado de nível L1-B. Os produtos de dados científicos são denotados por B_OI, B_Atm, B1_Atm, B2_Atm e BG, e referem-se, respectivamente, à Radiância da emissão OI 630, à radiância da emissão da banda-A do O2, à Radiância de um dos canais que abrange parte do espectro da banda-A do O_2 , à Radiância do segundo canal que abrange outra porção (distinta) do espectro da banda-A do O₂, e à Radiância espectral da radiação de fundo.

A Figura 7 destaca a etapa de filtragem dos dados de radiância, geralmente em função de critérios de qualidade dos dados de airglow bem estabelecidos, tendo em vista à geração dos produtos de dados do GLOW em um nível de processamento mais adequado à posterior análise dos resultados.

Vencida a etapa de qualificação dos dados da Radiância omnidirecional das emissões de airglow, o processamento da Temperatura de airglow é realizado. A mesma Figura 7 mostra esquematicamente o fluxo sequencial desta etapa. Basicamente, é um cálculo envolvendo uma relação (quociente) entre os dois canais de Radiância que medem faixas distintas do espectro da banda-A (0-0) do O₂. A técnica de cálculo da Temperatura de airglow também é discutida na seção 7.3. Não obstante, para se ter uma relação sinal/ruído aceitável, faz-se necessário que os dados de Radiância já tenham sido previamente qualificados, conforme mencionado anteriormente. Não obstante, note que o fluxo de redução dos dados mostra a necessidade de georreferenciar os valores de Radiância, por intermédio de dados auxiliares de bordo. Assim, denota-se pelo nível L2 o procedimento que resulta na geração das séries temporais de Radiância (EOI e EO2) e Temperatura de airglow (TO2), em função da latitude


e da longitude. Observe ainda que uma correção dos efeitos de variabilidade da Temperatura de airglow também deve ser empreendida na determinação da Radiância da emissão da banda-A do O_2 , tendo em vista a dependência do modelo espectroscópico dos fatores de intensidade com a Temperatura rotacional. Neste caso, o produto gerado é denominado de Radiância da emissão da banda-A (0-0) do O_2 corrigida, com acurácia superior ao nível gerado em L1B, com relevância à análise do objetivo científico descrito na Seção 5.2.

Em um nível de processamento L3, as séries temporais são mapeadas em um *grid* espacial unifome, para efeitos de análises estatísticas. Em um nível superior, L4, o produto de dado científico é oriundo a partir da aplicação de um modelo estatístico do fenômeno estudo e/ou envolvendo a execução de um modelo numérico de variáveis de estado da atmosfera (formulação empírica, semi-empírica, ou analítica) sobre os produtos gerados em L3. A Tabela 2 compila os produtos de dados científicos em níveis L2, L3 e L4, que sintetiza, sob vários aspectos, os requisitos do instrumento GLOW para alcançar os objetivos científicos estabelecidos na Seção 5 do presente documento.









B_Atm : Radiância da Emissão O2 Atm B1_Atm: Radiância do espectro-1 B2_Atm: Radiância do espectro-2 BG : Radiância Espectral de Fundo

B_OI : Radiância da Emissão OI 630

PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW

EQUARS





Figura 7 Procedimento de geração de produtos de dados científicos até o nível L2.



Tabela 2Produtos de dados científicos e os requisitos relevantes do GLOW para alcançar os objetivos
científicos.

	OBJETIVOS CIENTÍFICOS DO GLOW								
REQUISITOS	VARIABILIDADE DO OXIGÊNIO ATÔMICO	BALANÇO DE ENERGIA DA REGIÃO MLT	PW: MODOS DE PROPAGAÇÃO	ACOPLAMENTO MESOSFERA- IONOSFERA: PW	ACOPLAMENTO MESOSFERA- IONOSFERA: TID/GW	AQUECIMENTO TERMOSFÉRICO, MTM			
Grandezas Físicas georreferenciadas [L2: "Variável"]	Radiância da Emissão de O ₂ A, [L2: EO2] Temperatura do airglow O ₂ A, [L2: TO2]	Radiância da Emissão O ₂ A, [L2: EO2] Temperatura do airglow O ₂ A, [L2: TO2]	Radiância da Emissão O ₂ A, [L2: EO2] Temperatura do airglow O ₂ A, [L2: TO2]	Radiância da Emis [L2: EO2] Temperatura do a [L2: TO2] Radiância da Emis [L2: EOI]	são O2A, irglow O2A, são O1630,	Radiância da Emissão Ol630, [L2: EOI]			
Métodos Espectrais /Parâmetros derivados via métodos numéricos e analíticos [L3: "Variável"] [L4: "Variável"]	Método para solução de um Problema Inverso. Densidade numérica do Oxigênio, [L4: DENO]	Aquecimento: Absorção radiação solar (EUV) + Reações Exotérmicas. Resfriamento: Airglow + Reações Quimi- luminescentes. Taxa de Variabilidade da Temperatura (Heating Rate) (K/dia), [L4: RH]	Estimação espectral das ondas via dados espacialmente uniformes (L3) da variabilidade da Temperatura e Radiância, [L4: PWT] [L4: PWEO2] Modelo analítico para determinar número de onda meridional; Correlação entre séries temporais.	Estimação espectral das ondas via dados espacialmente uniformes (L3) ou a partir dos dados diretos (L2) da variabilidade da Temperatura e da Radiância, [L4: PWT] [L4: PWEO2] [L4: PWEO1] Modelo analítico para determinar número de onda meridional (quando possível) ; Correlação entre séries temporais.		TBD			
Região de cobertura: (z)	(remota) ~ 90-100 km	(remota) ~ 90-100 km	(remota) ~ 90-100 km	(remota) ~ 90-100 superior) (remota) ~ 240-30) km (mesosfera 10 km (camada-F)	(remota) ~ 240-300 km			
Região de cobertura: (φ, Θ)	Todas as latitudes e longitudes	Todas as latitudes e longitudes	Ênfase entre ±15° LAT; todas as longitudes	Ênfase entre ±15° LAT; todas as longitudes	Todas as latitudes e longitudes	Ênfase entre ±15° LAT; todas as longitudes			
Resolução espacial	Limite da Resolução do instrumento	Limite da Resolução do instrumento	Limite superior de $6^0 \times 6^0$	Limite superior de $6^0 \times 6^0$	Limite da Resolução do instrumento	Limite da Resolução do instrumento			
Resolução temporal	Limite da Resolução do instrumento	Limite da Resolução do instrumento	Tempo de Revisita menor do que 2 dias	Tempo de Revisita menor do que 2 dias	Limite da Resolução do instrumento	Limite da Resolução do instrumento			
Estudos Correlativos > EQUARS	TBD	Sim. - Dados de Temperatura da baixa atmosfera do GROM .	Sim. - Dados de Temperatura e Pressão da baixa atmosfera do GROM.	Sim. - Dados ionosféricos e da baixa atmosfera do GROM.	Sim. - Dados do GROM; - Dados dos parâmetros de plasma do IONEX.	Sim. - Dados ionosféricos do GROM.			
Estudos Correlativos > Dados da Rede Terrena	TBD	TBD	Sim. Radar Meteórico, se disponível.	Sim. Radar Meteórico, se disponível; Digissondas; Imageadores de airglow.	Sim. Radar Meteórico, se disponível; Digissondas; Imageadores de airglow.	Sim. Digissondas; Imageadores de airglow.			
Apoio de Modelagem Numérica	Sim. Modelo de ventos médios (HWM-2015) e Modelo de Atmosfera Básica (NRLMSISE-00).	Sim. Modelo GCM (Modelo de Circulação Geral) GAIA (<i>TBC</i>).	Sim. - Modelo GCM GAIA (<i>TBC</i>).	Sim. - Modelo GCM GAIA (<i>TBC</i>); - Modelo ionosférico SUPIM.	Sim. - Modelo Ray- Tracing, para eventos singulares; - Modelo GCM GAIA (TBC); - Modelo ionosférico SUPIM.	Sim. - Modelo de temperatura iônica, IRI- 2012; - Modelo GCM GAIA (<i>TBC</i>).			



7 PROJETO DE CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO GLOW

7.1 INTRODUÇÃO

GLOW é um fotômetro de airglow concebido para realizar medidas de fluxo de energia radiante, ao longo da visada do nadir orbital, em condições de eclipse orbital, de uma emissão do Oxigênio atômico da ionosfera, na faixa do espectro Visível (VIS), e de uma emissão do Oxigênio molecular da mesosfera superior, na faixa do espectro Infravermelho Próximo (NIR). Com ajustes nos parâmetros do software embutido, via comando de solo, medidas de airglow também podem ser realizadas se o posicionamento do fotômetro é alterado para o modo do Limbo orbital, cujos valores de radiometria de fluxo superam em até 8 (oito) vezes os valores esperados de fluxo ao longo do Nadir.

O fotômetro GLOW, em termos mecânicos, caracteriza-se por um único módulo físico compartimentalizado em dois subsistemas: Subsistema Óptico e de Detecção de sinal (SOD), que compreende os canais eletro-ópticos para detecção do sinal de airglow, e o Subsistema da Eletrônica Dedicada (SED) para monitoramento operacional, controle, processamento e comunicação dos dados radiométricos com o computador de bordo do satélite (OBC).

O subsistema SOD é constituído de quatro canais eletro-ópticos, dispostos simetricamente em relação ao eixo principal do posicionamento do fotômetro. Cada canal eletro-óptico consiste de um *baffle* óptico (atenuação da luz indesejada), de um conjunto de componentes ópticos (janela, filtro banda passante tipo *Fabry-Perot*, e lente biconvexa), de um fotosensor (tipo PMT) de material Multialkali e de um circuito para amplificação, discriminação e formatação de pulsos sensíveis à carga elétrica. Os quatro circuitos de detecção, envoltos em blindagem EMI individuais, constituem a unidade da eletrônica de fotodetecção do instrumento (PD – eletrônica de Fotodetecção).

Cada um dos fotosensores mencionados encontra-se no plano focal do respectivo conjunto óptico, formando um FOV (ângulo de visada) de 3.72°. Este FOV resulta em uma cobertura de aproximadamente 35 km de diâmetro, quando projetado em 94 km (referência da emissão da mesosfera superior) e visualizado de uma órbita de 635 km de altitude. Além disso, integra o subsistema SOD um mecanismo obturador de luz solar, controlado por um motor de passo, que atua para proteger o conjunto dos fotosensores às condições de luminosidade que excede o limite tolerável destes componentes, como também para medir o corrente de escuro e realizar um procedimento de calibração interna periódica dos fotosensores.

O subsistema de Eletrônica SED é composto de quatro unidades (placas de circuito eletrônico): (*i*) a unidade de controle, processamento e comunicação de dados (ICDH – Interface de Controle e Comunicação); (*ii*) a unidade que compreende um conjunto de circuitos condicionadores de sinais (AE – Eletrônica Auxiliar); (*iii*) a unidade responsável pelo *driver* de controle do mecanismo obturador de luz (SMDrv – *Driver* eletrônico do Motor de Passo) e (*iv*) a unidade da potência de alimentação (PWR – conversores DC/DC).

Em particular, é na interface ICDH que se encontra o software operacional do instrumento. O software embarcado atua conforme um protocolo de comunicação entre o Computador de Bordo (OBC) e o fotômetro GLOW. Os objetivos do software embarcado são: executar as funções de controle; realizar as funções de aquisição e armazenamento de dados de ciência e dados de



monitoração (*housekeeping*); e tratar os eventos de envios de comandos (telecomandos) e recepção de dados (telemetria) sob a demanda do OBC, via comunicação serial EIA-422.

Um elemento necessário para verificar a funcionalidade do fotômetro é o EGSE (*Electric Ground Support Equipment*), que deve fornecer suporte a um conjunto especificado de testes funcionais e de testes ambientais (procedimentos de Verificação), acompanhando o fotômetro até o final de seu ciclo de desenvolvimento. Basicamente, o EGSE é constituído por: (a) um computador portátil com interface externa para comunicação RS-422; e (b) um conjunto de aplicativos de software codificados em linguagem Labview[™], tanto para verificação de funcionalidade dos subsistemas e de desempenho frente aos testes ambientais, quanto para simular a comunicação com o OBC (Computador de Bordo), particularmente importante para validação do software embarcado responsável pela operação em órbita do instrumento.

Nas próximas subseções, são descritas as diversas etapas de concepção e projeto do fotômetro GLOW, de uma forma crescente a partir de seus aspectos mais básicos, com ênfase nas propriedades construtivas (radiometria, espectroscopia, *layout* óptico, elétrica, mecânica etc.) que caracterizam o seu desenvolvimento ao longo do ciclo de vida do projeto.

7.2 CONCEITOS BÁSICOS PARA MEDIDAS DE AIRGLOW

Considere o arranjo de um fotômetro de airglow elementar, conforme a geometria detalhada na Figura 6. A taxa da energia radiante, $\Phi_{h\nu}$ [fótons s⁻¹], incidente no cátodo do detector, integrado no espectro em λ , é uma função das seguintes quantidades: transmitância óptica do sistema (incluindo o meio entre a fonte de radiação e o detector), $T(\lambda)$; distribuição espectral da radiância, $L_{\lambda}(\lambda)$ da fonte estendida [fotóns s⁻¹ cm⁻² sr⁻¹ nm⁻¹]; área efetiva de abertura da óptica que coleta a radiação, A [cm⁻²]; e do ângulo sólido projetado, Ω [sr]. A equação (1) relaciona estas quantidades físicas:





Figura 8 Diagrama Ray-Tracing do fotômetro, enfatizando os parâmetros ópticos relacionados com a análise radiométrica de airglow e os componentes do conjunto. O ângulo de visada linear (FOV, Field of Fiew) do fotômetro é definido em termos do Número F (F-Number) da lente, relação entre o diâmetro da abertura efetiva (D) e a distância focal (f), definição esta comumente utilizada em projetos de telescópios astronômicos.



O sinal fotoelétrico (elétrons) na saída do fotômetro, Φ [pulsos s⁻¹], pode ser estimado conhecendose as características intrínsecas do detector, como por exemplo, a eficiência quântica da conversão fotoeletrônica (número de fotoelétrons emitido pelo cátodo dividido pelo número de fótons incidentes), ganho do estágio de pré-amplificação do sinal etc. Assim, representando a eficiência de detecção geral por $q(\lambda) = \Phi/\Phi_{hv}$ (em geral, uma função de λ), deste modo, o sinal de saída é:

(2)
$$\Phi = \int_{\lambda} L_{\lambda} T(\lambda) q(\lambda) A \Omega d\lambda \qquad [\text{cont. s}^{-1}].$$

Considerando uma fonte de radiância espectral omnidirecional e tênue, característica das emissões de airglow, a radiância pode ser quantificada em unidades Rayleigh,

(3)
$$B_{\lambda} = (4\pi/10^6)L_{\lambda}$$
 [R nm⁻¹].

Admitindo-se que os filtros ópticos empregados geralmente são do tipo banda passante, relativamente estreitos, com uma curva característica de transmitância relativa (valores entre 0 e 1) especificada por $t = t(\lambda)$, a transmitância do conjunto óptico pode ser descrita na forma:

(4)
$$T_{opt}(\lambda) = T_{janela} \times T_{filtro} \times T_{lente} \times T_{detector} = T_{opt}(\lambda_c)t(\lambda)$$
 [adim.],

sendo $T_{opt}(\lambda_c)$ a transmitância do conjunto óptico estimada em λ_c , máximo valor da transmitância (comprimento de onda central do filtro). A transmitância do sistema de detecção inclui, além dos componentes, as perdas devido à absorção e espalhamento pelo meio atmosférico (T_{air}) e a reflectância não ideal (T_r) dos componentes ópticos. Assim representamos, em primeira aproximação, $\frac{\partial}{\partial \lambda}(T_r, T_{air}) \sim 0$, a transmitância do sistema de detecção como,

(4')
$$T(\lambda) = T_{air} \times T_r \times T_{out}(\lambda)$$
 [adim.].

Também, definindo-se a sensibilidade radiométrica absoluta do instrumento como uma relação de medidas dos parâmetros que caracterizam o detector, a transmitância absoluta do filtro e o projeto óptico do fotômetro, tem-se, a partir das considerações anteriores representadas pelas equações (2), (3) e (4) e (4'),

(5)
$$S(\lambda) = \left(\frac{10^6}{4\pi}\right) q(\lambda) T_{air} T_r T_{opt}(\lambda_c) A \Omega \qquad [\text{cont. s}^{-1} \text{R}^{-1}],$$

o que resulta na denominada equação radiométrica de airglow:





Inicialmente considere que, dentro da faixa de variação espectral do filtro banda passante, a natureza da distribuição das linhas espectroscópicas da emissão possa ser caracterizada por um comportamento quasi-*continuum* (radiação espectral de fundo, *background*), centrado em $\lambda \equiv \lambda_{BG} \cong \lambda_c$. Assim, negligenciando a variação da eficiência de detecção e da variação da radiância da fonte na região de cobertura espectral do filtro (banda passante), $B_{\lambda} \cong G_{\lambda}(\lambda_{BG})$, e a equação (6) pode ser descrita como:

(7)
$$\Phi_{(BG)} = SG_{\lambda}(\lambda_{BG}) \Delta \lambda_{eff}, \qquad \Delta \lambda_{eff} = \int_{\lambda} t(\lambda) d\lambda,$$

em que $\Delta \lambda_{eff}$ é a largura de banda efetiva do filtro. Todavia, quando se considera que, dentro da faixa de variação espectral do filtro banda passante, o instrumento tem resolução suficiente para caracterizar a medida em termos da natureza de distribuição discreta das linhas espectroscópicas da emissão, resolvendo uma linha espectral ou um conjunto destas linhas espectrais, deve-se determinar a radiância espectral da fonte com o auxílio de um modelo teórico de distribuição dos níveis de energia, tal que seja possível predizer o fator de contribuição de cada uma das linhas espectrais para a emissão como um todo. Assim, representa-se a radiância de uma emissão resolvível, na faixa de variação espectral do filtro, pela expressão:

(8)
$$B_{\lambda} = B_{emi} \sum_{k=1}^{N} i_k(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_k), \qquad \sum_{k=1}^{N} i_k(\lambda_k) = 1,$$

em que k (k = 1,...,N) representa um índice associado aos níveis de energias rotacionais das emissões; $i(\lambda_k)$ são os fatores de ponderação de intensidade (valores normalizados) do k-ésimo nível de energia rotacional, em $\lambda = \lambda_k$, determinados a partir de um modelo teórico das intensidades espectroscópicas das emissões; e $\delta(\lambda)$ é a função generalizada delta de Dirac, cuja unidade de dimensão é o inverso da dimensão de seu argumento.

Assim, em uma primeira aproximação, negligenciando a variação da eficiência de detecção na faixa espectral considerada (desde que a banda passante do filtro seja estreita), a equação (6) pode ser escrita como:

(9)
$$\Phi_{(B)} = SB_{emi}\sum_{k=1}^{N}i(\lambda_k)t(\lambda_k).$$

No entanto, o sinal de um fotômetro, em modo de aquisição atmosférico, é constituído de duas componentes: a radiância da emissão de airglow considerada e de um sinal radiométrico de fundo, também denominado de ruído espectral. Deste modo, o sinal do fotômetro, para qualquer canal fotoelétrico, pode ser representado pela adição das equações (9) e (7):

(10)
$$\Phi_{(B)+(BG)} = SB_{emi}\sum_{k=1}^{N} i(\lambda_k)t(\lambda_k) + SG_{\lambda}(\lambda_{BG}) \Delta\lambda_{eff}.$$



A equação (10) mostra explicitamente a necessidade de o fotômetro, quando projetado, ter um canal fotoelétrico específico para medir o ruído espectral (G_{λ}) . A recomendação é que, em termos da faixa espectral, quanto mais próximo o canal concebido para estimativa do ruído espectral estiver do canal que caracteriza a emissão de airglow, mais acurácia terá o dado mensurado. Neste sentido, a emissão de airglow selecionada para estudos dos fenômenos da alta atmosfera, deve satisfazer, na maior parte do processo de aquisição, a seguinte condição básica:

(11) $SNR_{glow} = \Phi_{(BG)} / \Phi_{(B)+(BG)} <<1$, denominada de relação sinal ruído de airglow.

7.3 MEDIDA DAS EMISSÕES DE AIRGLOW

7.3.1 A Emissão Linha Vermelha do Oxigênio atômico.

A equação fotoquímica representativa da emissão de fótons $h\nu$ (airglow) originada a partir da transição eletrônica entre os estados ${}^{1}D - {}^{3}P$ é:

(12)
$$O(^{1}D) \rightarrow O(^{3}P_{0,1,2}) + h\nu \qquad (A_{D}),$$

sendo $A_{\rm D}$ a probabilidade da transição por segundo para uma emissão espontânea, também denominada de coeficiente de Einstein [unidade: s⁻¹]. Segundo a espectroscopia da espécie metaestável O(¹D), as regras de seleção do tipo dipolar magnética (M1) permite três possíveis transições eletrônicas (*e.g.* Link e Cogger, 1989):

(13)
$${}^{1}D - {}^{3}P_{0} \quad \lambda_{1} = 639.2 \text{ nm} \qquad (A_{D,0} = 2.74 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})$$

 ${}^{1}D - {}^{3}P_{1} \quad \lambda_{2} = 636.4 \text{ nm} \qquad (A_{D,1} = 1.82 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}),$
 ${}^{1}D - {}^{3}P_{2} \quad \lambda_{3} = 630.0 \text{ nm} \qquad (A_{D,2} = 5.63 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$

Neste caso, $A_{\rm D} = A_{{\rm D},0} + A_{{\rm D},1} + A_{{\rm D},2} = 7.72 \times 10^{-3} {\rm s}^{-1}$. Dado que a intensidade espectroscópica associada a uma determinada linha do espectro de emissão de um átomo é proporcional à população eletrônica do nível de energia superior e ao coeficiente de Einstein da transição, por conseguinte, através das relações entre as probabilidades da equação (13), permite-se estabelecer a contribuição relativa destas intensidades espectroscópicas (vide definição da equação 8):

(14)
$$\begin{array}{c} A_{\rm D,0} << (A_{\rm D,1}, A_{\rm D,2}) \ e \ A_{\rm D,2} \approx 3 \times A_{\rm D,1} \quad \Rightarrow \\ i(\lambda_1) = 0.03 \approx 0; \ i(\lambda_2) = 0.24 \approx 1/4; \ i(\lambda_3) = 0.73 \approx 3/4. \end{array}$$

De fato, geralmente duas linhas de emissão são detectáveis no airglow atmosférico noturno ionosférico, sendo ${}^{1}D - {}^{3}P_{2}$ em $\lambda = 630.0$ nm a transição predominante (maior intensidade relativa), amplamente conhecida na literatura aeronômica como a linha vermelha do airglow do Oxigênio atômico.



7.3.2 Medida da Radiância do Airglow de $O(^{1}D - {}^{3}P)$.

A metodologia de medida da radiância da emissão $O({}^{1}D - {}^{3}P)$, doravante denotada por B_{OI} , (OI: notação para Oxigênio atômico neutro), faz uso das equações (10) e (7), em que o canal-1 representa a medida da emissão de airglow e o canal-2, a correção do ruído espectral (denotado por BG). Assim,

(15)
$$\Phi_1 = S_1 B_{OI} \sum_{k=1}^3 i(\lambda_k) t_1(\lambda_k) + S_1 G_{\lambda}^{(1)}(\lambda_1) \Delta \lambda_{eff}^{(1)},$$
$$\Phi_{BG} = S_{BG} G_{\lambda}^{(BG)}(\lambda_{BG}) \Delta \lambda_{eff}^{(BG)}.$$

Em geral, a amplitude da radiação do *continuum* de fundo, $G_{\lambda}(\lambda)$, entre a região do espectro que separa o canal-1 e o canal do BG, altera-se em função do comprimento de onda. Admitindo-se uma variação lenta e linear com λ ,

(16)
$$G_{\lambda}(\lambda) \cong G_{\lambda}(\lambda_{BG}) + \frac{dG_{\lambda}}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{BG}} |\lambda - \lambda_{BG}|, \text{ segue}$$
$$G_{\lambda}(\lambda_{1}); \quad G_{\lambda}(\lambda_{BG}) + \xi |\lambda_{c}^{(1)} - \lambda_{BG}|,$$
(17)
$$\text{sendo, } \xi = \frac{dG_{\lambda}}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{BG}} \text{ e } \lambda_{1}; \quad \lambda_{c}^{(1)} \ (\lambda \text{ central do filtro)}.$$

Assim, a partir das equações (15) e (17), tem-se:

(18)
$$B_{\text{OI}} = \frac{1}{S_1} \times \left(\sum_{k=1}^3 i(\lambda_k) t_1(\lambda_k) \right)^{-1} \times \left(\Phi_1 - S_1 \Delta \lambda_{eff}^{(1)} \left(\frac{\Phi_{BG}}{S_{BG} \Delta \lambda_{eff}^{(BG)}} + \xi \left| \lambda_c^{(1)} - \lambda_{BG} \right| \right) \right).$$

A Tabela 3 a seguir relaciona as técnicas envolvidas na obtenção dos parâmetros e das grandezas físicas que são usadas para a estimativa da radiância da emissão $O({}^{1}D - {}^{3}P)$.

Quantidades	Unidades	Técnica	Comentários
Intensidades Espectroscópicas, $\left\{i(\lambda) ight\}_k$	adim.	Modelo Teórico	Equação (14)
Sensibilidade Absoluta, S_1, S_{BG}	cont. s ⁻¹ R ⁻¹	Calibração absoluta via técnica de radiometria comparativa, usando fonte padrão de baixa radiância.	Vide seção 8
Função Transmitância e comprimento de onda central $t = t(\lambda); \lambda_c$ Largura de Banda,	adim.; nm	Aferição da curva de transmitância do filtro, usando monocromador (resolução de 0.01 nm).	Vide seção 8
$\Delta \lambda_{eff}$	nm		
Sinais do Fotômetro (subtraídos da corrente de escuro média <i>DC</i>), $\Phi_1 - DC$; $\Phi_{BG} - DC$	cont. s ⁻¹	Concepção radiométrica dos canais eletro-ópticos para aquisição de dados de airglow do <i>continuum</i> de fundo.	-
Declividade espectral do <i>continuum</i> de fundo, ζ	R nm ⁻²	Modelo de radiação do <i>continuum</i> de fundo	TBD

Tabela 3 Quantidades para estimativa da Radiância da emissão OI λ 630.0, conforme equação (18).



7.3.3 Modelagem do Airglow de $O({}^{1}D - {}^{3}P)$.

Para simular os valores de radiância da emissão de $O({}^{1}D - {}^{3}P)$ na ionosfera, em unidades Rayleigh, na linha de visada (vertical) do nadir orbital, necessita-se de uma modelagem da taxa volumétrica de emissão, $\mathcal{E} = \mathcal{E}(z)$, em unidades fótons s⁻¹ cm⁻³, em que os valores de radiância, ou taxa de emissão aparente, podem ser determinados, por exemplo, pela seguinte expressão numérica (uma simples soma de Riemann por retângulos):

(19)
$$B = \frac{1}{10^6} \int_{z_0}^{z_n} \varepsilon(z) dz \cong 10\Delta z \sum_{j=0}^{n-1} \varepsilon(z_j), \quad z_j = z_0 + j\Delta z, \ \Delta z \text{ em km}.$$

Então, uma expressão analítica simplificada para modelagem de $\varepsilon_{OI} = \varepsilon_{OI}(z)$ pode ser obtida admitindo-se válido o equilíbrio fotoquímico na determinação da distribuição das densidades numéricas de O(¹D). O Anexo B detalha as reações químicas que participam do esquema cinético de emissão. Uma análise deste esquema cinético mostra que (*e.g.* Sobral *et al.*, 1993):

(20)
$$\varepsilon_{\rm OI}(z) = A_{\rm D} \frac{n_e \, \vartheta(z) \, \varsigma_{\rm D} \, \gamma_1 \, [{\rm O}_2]}{k_1 [{\rm O}({}^{3}{\rm P})] + k_2 [{\rm O}_2] + k_3 [{\rm N}_2] + k_4 \, n_e + A_{\rm D}}$$

7.3.4 A Emissão da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio.

A equação fotoquímica representativa da emissão de fótons $h\nu$ (airglow) originada a partir da transição eletrônica entre os estados $b^{1}\Sigma_{g}^{+} - X^{3}\Sigma_{g}^{-}$ da molécula diatômica O₂ é:

(20)
$$O_2(b^1\Sigma_g^+) \to O_2(X^3\Sigma_g^-) + h\nu(0-0)$$
 $(A_{0-0}).$

A espécie $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ é metaestável. A transição eletrônica representada pela equação (20) também viola as regras de seleção do tipo dipolar elétrica e pode ser explicada pelas regras de seleção do tipo dipolar magnética (M1). Tal transição eletrônica consiste de um sistema de diferentes bandas vibracionais, dito Bandas Atmosféricas do Oxigênio. Em particular, a banda vibracional (0-0) é mensurável no airglow atmosférico, porém apenas acima de 60 km de altitude, pois sofre de uma pronunciada absorção pelo Oxigênio da média e da baixa atmosfera [Ref.]. Por sua vez, a banda vibracional é constituída por uma série de níveis de energia rotacionais, resolvíveis do ponto de vista da atual espectrometria atmosférica.

A configuração do espectro rotacional de emissão da banda (0-0) possui quatro agrupamentos distintos de níveis de energia, cada qual denominado simplesmente de ramo rotacional, sendo dois ramos principais ^PP e ^RR e dois ramos satélites ^PQ e ^RQ, conforme notação indicada no quadro seguinte, que especifica os comprimentos de onda destes ramos, em ambiente de vácuo atmosférico:



Par de Ra	imos P	Par de Ra	Par de Ramos R		
PP	PQ	RQ	R R		
762.0985		1	1		
762.4488	762.3277	761.5049	761.6138		
762.8210	762.7039	761.2049	761.3179		
763.2149	763.1000	760.9288	761.0438		
763.6308	763.5173	760.6750	760.7916		
764.0685	763.9563	760.4434	760.5613		
764.5282	764.4171	760.2338	760.3530		
765.0099	764.8999	760.0464	760.1666		
765.5138	765.4048	759.8811	760.0024		
766.0399	765.9318	759.7380	759.8603		
766.5883	766.4811	759.6173	759.7406		
767.1592	767.0529	759.5189	759.6433		
767.7527	767.6473	759.4432	759.5685		
768.3689	768.2644	759.3901	759.5165		
769.0080	768.9044	759.3599	759.4873		
769.6702	769.5675	759.3527	759.4811		

O modelo de distribuição das intensidades (estatística de Maxwell-Boltzmann) associadas às linhas do espectro rotacional (número quântico *J*) de emissão de uma molécula é proporcional à população eletrônica (densidade *N*) do nível de energia superior ${}^{1}\Sigma$ (energia *F*), à matriz dos coeficientes de Einstein da transição ($A_{J'J''}$), e ao fator de Boltzmann, definido em termos do parâmetro térmico Θ , dito Temperatura Rotacional ou Temperatura de airglow em um contexto observacional:

(21)
$$I(J', v' = 0, {}^{1}\Sigma \to J'', v'' = 0, {}^{3}\Sigma) = N_{v'=0}A^{0,0}_{J',J'} \exp\left(-\frac{hc}{k_B\Theta}F(J', v' = 0, {}^{1}\Sigma)\right).$$

As intensidades espectroscópicas normalizadas dos pares de ramos P e R são dependentes do parâmetro Θ_r , e calculadas pelas expressões:

(22)
$$i(\lambda_{\rm P},\Theta) = \frac{I(\lambda_{\rm P},\Theta)}{\sum_{\rm P,R} I(\lambda_{\rm P,R},\Theta)}; \quad i(\lambda_{\rm R},\Theta) = \frac{I(\lambda_{\rm R},\Theta)}{\sum_{\rm P,R} I(\lambda_{\rm P,R},\Theta)}.$$

O Anexo A apresenta fornece uma descrição geral dos conceitos de espectroscopia aplicada ao monitoramento de emissões de airglow e detalha, especificamente, o cálculo das intensidades a partir do modelo de distribuição de equilíbrio Térmico (Maxwell-Boltzmann), mostrando que as intensidades associadas ao conjunto de ramos R, de um mesmo número quântico J são mais fracas (valores menores) quando comparadas às intensidades associadas ao conjunto de ramos P. Esta constatação é verificada ao mensurar o airglow atmosférico da banda (0-0). Também, pode-se verificar que a distribuição espectral das intensidades varia consideravelmente com o parâmetro Θ (temperatura rotacional), um dos requisitos básicos para que Θ possa caracterizar a variabilidade da temperatura atmosférica.





Figura 9 Distribuição das intensidades espectroscópicas (normalizadas) em função da Temperatura rotacional da distribuição, para emissão da banda Atmosférica (0-0) do O₂.

7.3.5 Medida da Radiância da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio.

A metodologia de medida da radiância da emissão da banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio $O_2(b^1\Sigma)$, doravante denotada por B_{Atm} , faz uso das equações (10) e (7), em que os canais eletroópticos-1 e -2 representam a medida da emissão em duas faixas espectrais distintas, cobrindo o conjunto de ramos R e P respectivamente (somatórios sobre os respectivos conjuntos de linhas), e o canal eletro-óptico-3, que representa a correção do ruído espectral. Assim, as equações são representadas por:

(23)
$$\Phi_{1} = B_{\text{Atm}} S_{1} \sum_{\alpha}^{(R)} i_{\alpha} t_{\alpha} + G_{\lambda}^{(1)}(\lambda_{1}) S_{1} \Delta \lambda_{eff}^{(1)}$$
$$\Phi_{2} = B_{\text{Atm}} S_{2} \sum_{\beta}^{(P)} i_{\beta} t_{\beta} + G_{\lambda}^{(2)}(\lambda_{2}) S_{2} \Delta \lambda_{eff}^{(2)};$$
$$\Phi_{BG} = S_{BG} G_{\lambda}^{(BG)}(\lambda_{BG}) \Delta \lambda_{eff}^{(BG)}$$

De maneira similar ao adotado na análise da amplitude da radiação do *continuum* de fundo para à emissão OI 630 (vide Seção 7.3.2), omitindo o supraescrito *BG* nos termos relacionados a G_{λ} , segue os seguintes resultados:

(24)

$$G_{\lambda}(\lambda_{1}); \quad G_{\lambda}(\lambda_{BG}) + \xi_{1} \left| \lambda_{c}^{(1)} - \lambda_{BG} \right|,$$

$$G_{\lambda}(\lambda_{2}); \quad G_{\lambda}(\lambda_{BG}) + \xi_{2} \left| \lambda_{c}^{(2)} - \lambda_{BG} \right|,$$

$$(24) \quad \text{sendo,} \quad \xi_{1} = \frac{dG_{\lambda}}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{BG}} \quad \text{e} \quad \lambda_{1}; \quad \lambda_{c}^{(1)} \quad (\lambda \text{ central do filtro-1}),$$

$$\xi_{2} = \frac{dG_{\lambda}}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{BG}} \quad \text{e} \quad \lambda_{2}; \quad \lambda_{c}^{(2)} \quad (\lambda \text{ central do filtro-2}).$$

Agrupando o conjunto de equações (23) e utilizando-se do modelo de radiância de fundo descrito na equação (24), tem-se uma equação que descreve a razão entre os ramos P e R:



(25)
$$\frac{\sum_{\alpha}^{(P)} i_{\alpha} t_{\alpha}}{\sum_{\beta}^{(R)} i_{\beta} t_{\beta}} = \frac{S_{1}}{S_{2}} \times \left(\frac{\Phi_{2} - C_{BG}^{(2)} S_{2} \Delta \lambda_{eff}^{(2)}}{\Phi_{1} - C_{BG}^{(1)} S_{1} \Delta \lambda_{eff}^{(1)}} \right),$$

em que, $C_{BG}^{(m)} = \frac{\Phi_{BG}}{S_{BG} \Delta \lambda_{eff}^{(BG)}} + \xi_{m} \left| (\lambda_{c}^{(m)} - \lambda_{BG}) \right|, \quad \forall m = 1, 2.$

O lado esquerdo da equação (25) representa o quociente entre dois processos de convolução espectral discreta em função de fatores experimentais (transmitância relativa do filtro óptico) e fatores teóricos (modelo de distribuição de intensidades espectroscópicas); o lado direito da equação envolve as medidas calibradas das radiância nos dois canais eletro-ópticos definidos na equação (23),

(26)
$$\mathcal{R}(\Theta) = \frac{t_2(\lambda) \otimes i(\lambda, \Theta) \delta(\lambda - \lambda_{\alpha})}{t_1(\lambda) \otimes i(\lambda, \Theta) \delta(\lambda - \lambda_{\beta})},$$

(27)
$$\mathcal{R}(\Theta) = \frac{B_{\text{Atm}}^{(2)}}{B_{\text{Atm}}^{(1)}} = \frac{S_1}{S_2} \times \left(\frac{\Phi_2 - C_{BG}^{(2)} S_2 \Delta \lambda_{eff}^{(2)}}{\Phi_1 - C_{BG}^{(1)} S_1 \Delta \lambda_{eff}^{(1)}}\right).$$

A Temperatura rotacional (ou Temperatura de airglow) aparece explicitamente no argumento da razão \mathcal{R} , pois o modelo que representa a distribuição de intensidades é um modelo de equilíbrio térmico. Mostra-se que a função $\mathcal{R} = \mathcal{R}(\Theta)$ é uma função monótona; sendo assim, esta função é inversível, e pode ser determinada pelo tradicional método dos mínimos quadrados polinomiais de ordem-*n*:

(28)
$$\mathcal{R}^{-1}: \Theta = \Theta(\mathcal{R}) = \sum_{j=0}^{n} a_j (\mathcal{R})^j.$$

Os valores de \mathcal{R} na equação (28) são oriundos das medidas calibradas nos dois canais definidos explicitamente pela equação (27). Assim, se produz a medida experimental da Temperatura de airglow.

Finalmente, a Radiância da emissão, corrigida pela Temperatura de airglow, Θ , pode ser obtida, por exemplo, pela expressão:

(29)
$$B_{\text{Atm}} = \frac{\Phi_1 - C_{BG}^{(1)} S_1 \Delta \lambda_{eff}^{(1)}}{S_1 \sum_{\alpha} {}^{(\text{R})} i_{\alpha}(\Theta) t_{\alpha}}.$$

A Tabela 4 a seguir relaciona as técnicas envolvidas na obtenção dos parâmetros e das grandezas físicas que são usadas para a estimativa da radiância da emissão da banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio $O_2(b^1\Sigma)$.



Tabela 4	Quantidades para estimativa da Radiância da emissão da banda Atmosférica $(0\!-\!0)$ do
	Oxigênio $ \mathrm{O}_2(b^1\Sigma)$, conforme equação (29).

Quantidades	Unidades	Técnica	Comentários	
Intensidades Espectroscópicas normalizadas, $\left\{i(\lambda) ight\}_k$	adim.	Modelo Teórico	Equações (21) e (22) & Anexo A	
Sensibilidade Absoluta, S_1, S_2, S_{BG}	cont. s ⁻¹ R ⁻¹	Calibração absoluta via técnica de radiometria comparativa, usando fonte padrão de baixa radiância.	Vide seção 8	
Função Transmitância e comprimento de onda central $t = t(\lambda); \lambda_c$	adim.; nm	Aferição da curva de transmitância dos filtros,	Vide seção 8	
Largura de Banda, $\Delta \lambda_{e\!f\!f}$	nm	(resolução de 0.01 nm).		
Sinais do Fotômetro (subtraídos da corrente de escuro média <i>DC</i>), $\Phi_1 - DC$; $\Phi_2 - DC$; $\Phi_{BG} - DC$	cont. s ⁻¹	Concepção radiométrica dos canais eletro-ópticos para aquisição de dados de airglow do <i>continuum</i> de fundo.	-	
Declividade espectral do continuum de fundo, ζ	R nm ⁻²	Modelo de radiação do <i>continuum</i> de fundo	TBD	

7.3.6 Modelagem do airglow da Banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio.

Para simular os valores de radiância da banda Atmosférica (0-0) do Oxigênio $O_2(b^1\Sigma)$ na mesosfera superior, em unidades Rayleigh, na linha de visada (vertical) do nadir orbital, necessita-se de uma modelagem da taxa volumétrica de emissão, $\mathcal{E} = \mathcal{E}(z)$, em unidades fótons s⁻¹ cm⁻³, em que os valores de radiância, ou taxa de emissão aparente, podem ser determinados, seguindo o mesmo procedimento numérico da equação (19).

Então, uma expressão analítica simplificada para modelagem de $\varepsilon_{Atm} = \varepsilon_{Atm}(z)$ pode ser obtida admitindo-se válido o equilíbrio fotoquímico na determinação da distribuição das densidades numéricas de $O_2(b^1\Sigma)$. O Anexo C detalha as reações químicas que participam do esquema cinético de emissão. Uma análise deste esquema cinético resulta que:

(30)
$$\varepsilon_{\text{Atm}} = \frac{A_2^{(0-0)} \alpha \, k_1 \, n^2(\text{O}) \, n(\text{M}) \, \delta \, k_*^{(\text{O}_2)} n(\text{O}_2)}{(A_2 + \sum_i k_3^{(\text{Q}_i)} n(\text{Q}_i)) \times (A_* + \sum_i k_*^{(\text{Q}_i)} n(\text{Q}_i))}.$$

7.4 CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA MEDIDAS DE AIRGLOW

As equações (18) e (29) mostram que ao menos três fatores se destacam para que os dados de radiância sejam fornecidos com qualidade aceitável:

(a) A sensibilidade do canal de medida do airglow **não deve** alterar-se significativamente ao longo do tempo;



- (b) A função transmitância relativa do filtro não deve apresentar variação em comprimento de onda; ou em outras palavras, a dependência da temperatura do filtro de interferência deve ser monitorada, com o propósito de corrigir deslocamentos em comprimento de onda;
- (c) Uma estratégia para correção do continuum de fundo (ruído espectral) deve ser desenvolvida, em face da limitação apresentada pela aproximação embutida no modelo de correção dado pela equação (16).

O primeiro fator (item a) pode ser verificado, em parte, através dos dados periódicos da calibração interna embutida, que emprega um LED emissor de luz, calibrado (validado) em condições que antecedem o voo orbital. Dados de telemetria do sinal do LED devem ser adquiridos em cada operação orbital de aquisição de dados. Quando as séries obtidas pela aquisição dos sinais do LED, $(\Phi)_{LED}$, revelarem (em um ou mais canais) mudanças temporais discrepantes em um nível superior a 5%, indicando, provavelmente, uma degradação na eficiência quântica do fotodetector daquele canal, a sensibilidade do canal (ou dos canais verificados) deve ser modificada. Tal correção deve ser registrada ao longo do processamento de dados, em conformidade com os preceitos de Qualidade da missão.

No entanto, a outra parcela que pode alterar, em longo prazo, a sensibilidade radiométrica dos canais do fotômetro é a degradação temporal da Transmitância absoluta do conjunto óptico (janela, filtro e lente). Esta degradação não poderá ser monitorada. Em operação orbital, a principal causa do decaimento da Transmitância se deve ao efeito cumulativo da incidência de radiação cósmica (dose ionizante total, TID) em componentes ópticos. Para mitigar o problema, uma janela óptica com *coating* efetivo deve ser concebida, se constituindo em uma proteção ao filtro de interferência, talvez o componente mais suscetível a este efeito.

O segundo fator (item b) revela uma limitação inerente à característica intrínseca dos filtros ópticos tipo Fabry-Perot, ou seja, a variação da temperatura ambiente a que se submetem os filtros causa uma variação (deslocamento) da curva de transmitância em comprimento de onda da banda. Tal desvio tornam imprecisos os valores $t(\lambda_k)$ usados nas equações que determinam as radiâncias das emissões do airglow mesosférico e ionosférico. É usual o filtro comercial apresentar um coeficiente térmico entre 0.015 – 0.030 nm/^oC, na faixa espectral de 400 a 1000 nm. Para caracterizar tal variabilidade (função analítica do coeficiente térmico), deve-se calibrar o desempenho do filtro em laboratório. Já, na ausência de um controle térmico ativo por parte do instrumento, deve-se monitorar a temperatura ambiente em órbita, de todos os canais do fotômetro, por intermédio de sensores de temperatura de estado sólido, previamente calibrados em laboratório de testes ambientais. Assim, em operação orbital, o monitoramento contínuo da temperatura dos canais, via telemetria dos sinais dos sensores mencionados, assegurará a correção das equações que determinam as radiâncias no processamento em solo dos dados de airglow.

O terceiro fator (item c) talvez seja o mais crítico para garantia da qualidade dos dados. As fontes luminosas indesejadas principais incluem a iluminação das cidades, emissões do espectro continuum de airglow, aurora equatorial e a brilhância lunar refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre. (*TBD*)



7.5 SUBSISTEMA ÓPTICO E DE DETECÇÃO (SOD)

O diagrama de Blocos da Figura 10 fornece uma visão compartimentalizada do subsistema SOD, que, basicamente, deve ser constituído de quatro canais eletro-ópticos e de um obturador eletromecânico de luz. Quando o obturador não obstrui a luz incidente, o fluxo radiante incide pelo *baffle* (aqui não representado) e transpassa o conjunto óptico (janelas, filtros e lentes), que seleciona o espectro a ser medido (filtros) até a sua focalização (lentes) na superfície fotosensível dos fotosensores, tipo PMT. Deste modo, os pulsos das saídas destes fotosensores são amplificados e discriminados, utilizando-se da técnica de contagem de fotoelétrons, por intermédio dos componentes PAD (pré-amplificadores sensíveis à carga), presentes na unidade de eletrônica fotodetecção (PD). Em seguida, um circuito temporizador tipo PIT (*Programmable Interval Timer*) atribui aos pulsos valores digitais, com barramento de endereço limitado à arquitetura de processadores de 8-bit, que deve ser implementado no subsistema de Eletrônica de Interface, especificamente, na unidade ICDH.



Figura 10 Diagrama de blocos do subsistema SOD, representando, simbolicamente, os circuitos que constituem esta unidade, os componentes principais (eletro-ópticos), o mecanismo obturador de luz, as interfaces com outras unidades de eletrônica (AE, ICDH, SMDrv), e os sinais de hardware mais representativos (analógicos e digitais).



7.5.1 Conjunto Óptico

Basicamente, o conjunto dos elementos ópticos do fotômetro, constituídos de janelas protetivas, filtros ópticos banda passantes e lentes, tem por finalidade direcionar a radiação de airglow adequadamente para os sensores tipo PMT. Neste caso, o termo adequadamente significa que apenas a radiação dentro do FOV especificado deve incidir sobre o detector da PMT. Deve ser empregado o processo tradicional de otimização de sistemas ópticos, em que o plano focal coincida com o detector (vide Figura 8). Neste sentido, o fotômetro pode ser tratado como um pixel elementar de um imageador espectral.

As janelas protetivas têm a finalidade de proteger os outros elementos ópticos e os fotosensores do ambiente agressivo externo. Em sua superfície, deve ser impregnado um acabamento (*coating*) anti-reflexão para maximizar a eficiência de eliminação da radiação espalhada que não pertence ao FOV do instrumento (*stray lights*).

Os filtros de interferência óptica são os elementos responsáveis pela seleção da banda espectral da radiação de airglow que se deseja medir. É um dos componentes mais críticos do instrumento, dado a sua dependência com a temperatura operacional e a sua rápida degradação em ambientes sem controle de umidade. Ao se especificar o filtro, vários parâmetros construtivos e funcionais devem ser levados em consideração, como por exemplo: (a) o ângulo de incidência da radiação; (b) a faixa de temperatura a que será submetido; (c) a forma da banda passante espectral, o que implica no número de cavidades em seu processo construtivo; (d) a estabilidade ambiental em termos de umidade; (e) o limite da dose de radiação espacial recebida em sua vida útil; (f) a qualidade de sua superfície (*scratches/digs*); (g) as dimensões; (h) os parâmetros de transmitância óptica (largura de banda, comprimento de onda central e Transmitância do pico) e (i) o espectro de rejeição.

As lentes são os elementos que representam fisicamente o desempenho do método de *ray-tracing* ao projetar o layout óptico do instrumento. O *spot diagram* é a ferramenta de projeto mais representativa de quão fino o sistema óptico focalizará a radiação de comprimento de onda especificado no plano da imagem (*field stop*). O desvio da geometria circular do *spot diagram* pode ser interpretado como desalinhamento óptico, astigmatismo, ou aberração esférica. Ao verificar a qualidade de uma lente, depois de especificada pelo layout óptico e manufaturada, deve-se medir, com o auxílio de um interferômetro de precisão, se os raios de curvatura estão dentro da tolerância especificada e se o desvio de planicidade de superfície (*flatness surface*) atende ao requisito mínimo de $\lambda/2$ (RMS), considerada de grau de precisão nominal para este propósito.

A Tabela 5 mostra a especificação, como uma consequência do layout óptico preliminar do instrumento GLOW, de alguns dos parâmetros básicos relacionados às lentes e aos filtros de interferência.

A Tabela 6 mostra a especificação dos parâmetros dos filtros de interferência diretamente relacionados às medidas de airglow.



Tabela 5Especificação das Lentes e dos Filtros de Interferência (parâmetros comuns aos quatro conjuntos
ópticos que constituem os canais do fotômetro).

LENTE			FILTRO DE INTERFERÊNCIA		
Tipo de Lente	biconvexa		Diâmetro do filtro	Ø50.0 mm	
Diâmetro da lente	Ø50 mm		Abertura óptica mínima	Ø45.0 mm	
Abertura mínima	Ø45 mm		Transmitância no pico	> 60 %	
Distância focal	126.0 mm		Espessura (max)	10 mm	
<i>f-Number</i> do projeto	2.8		Forma da Banda passante espectral	3 ou 4 cavidades	
Campo de visão (FOV)	3.72° (linear)		Espectro de rejeição	1×10^{-4} X-ray - FIR	
Material da lente	Quartzo		Faixa da Temperatura operacional	-10 °C – +30 °C	
Qualidade da Lente (flatness surface) $\lambda/2$			Máxima Taxa de mudança de Temperatura	5°C / min	
			Ângulo de incidência	0°	
			Tolerância à radiação	30 kRad (Si) TID	

 Tabela 6
 Especificação dos Filtros Ópticos relativa às medidas das emissões de airglow.

FILTROS DE INTERFERÊNCIA								
Comprimento de Onda Central (CW) / Largura de Banda passante (HPBW)								
Canal	Airglow	CW (tolerância)	HPBW (Tolerância)					
		(nm)	(nm)					
1	OI 630	630.2 (+0.40/-0.0)	2.0 (±0.5)					
2	BG 710	710.0 (+2.0/-0.0)	10.0 (±2.0)					
3	O ₂ A (0-0) 762	762.0 (+1.0/-0.0)	5.0 (±1.0)					
4	O ₂ A (0-0) 763	763.0 (+0.4/-0.0)	2.0 (±0.5)					

7.5.2 Baffle Mecânico

A análise de luz espalhada (*stray light analysis*) para este projeto óptico deve demonstrar a resposta do instrumento em relação às fontes de radiação incidentes fora do campo de visão do fotômetro (radiação não desejada). Assim, a configuração mecânica do *baffle* (defletor de luz) deve garantir que, qualquer raio de luz (representando o fluxo luminoso) com um ângulo superior ao ângulo de corte em relação ao eixo óptico poderá entrar pela janela óptica com, ao menos, duas reflexões na superfície interna do *baffle*. Desta maneira, o projeto requer dois parâmetros: o ângulo de corte, θ_c , que deve definir o tamanho do *baffle*, e o quanto o *baffle* será maior (altura *h*) que a abertura efetiva da óptica do fotômetro, o que, na prática, define o número de *vanes* que o *baffle* deve possuir. A Figura 11 mostra uma concepção mecânica do *baffle*.





Figura 11 Metodologia de concepção do baffle mecânico do fotômetro GLOW. A análise mostra que a configuração do baffle deve possuir três *vanes* (anéis de diferentes tamanhos com angulação nas bordas).

Outro ponto a considerar relativo à análise de luz espalhada é a quantificação da capacidade espalhadora de luz em cada uma das superfícies internas que alojam o conjunto óptico, incluindo a superfície interna dos *baffles*. A análise assume que todas as superfícies internas devem refletir ao menos 10% da radiação incidente de maneira difusa (modelo de superfície *Lambertiana*), independentemente do ângulo de incidência e do comprimento de onda. Na prática, considera-se que estas partes mecânicas devem receber um tratamento superfícial com tinta preta fosca qualificada para ambiente espacial. A Tabela 7 mostra a especificação dos parâmetros construtivos do baffle do instrumento GLOW.

Baffle Frontal					
Тіро	superfícies refletoras difusas				
	(lambertian)*				
Comprimento	97.9 mm				
Diâmetro	Ø85.7 mm				
Número de <i>vanes</i>	3				
Ângulo de Corte (nominal)	25 ⁰				
Bafj	fle Interno				
Тіро	baffle de segunda ordem (cilindros				
	concêntricos*				
Field stop	Ø8 mm (fotocátodo)				

Tabela 7	Especificac	ão do projet	o do baffle.
	Lopeenicaç	uo uo projet	o uo bunne.

* A superfície interna dos *baffles* e das *vanes* deve ser áspera e enegrecida.



7.5.3 Obturador de Luz

A função do mecanismo obturador de luz do fotômetro GLOW em órbita é simples: enquanto ele permanecer fechado, os fotosensores não ficam expostos ao fluxo radiante ambiental, protegendoos, por exemplo, da radiação solar difusa; porém, quando o mecanismo é posicionado no modo aberto, os fotosensores ficam expostos à luz atmosférica noturna, através de orifícios do disco de anteparo, permitindo-se, assim, o registro das emissões de airglow. Um motor de passo deve ser utilizado para acionar o disco de anteparo (diafragma) em posições geométricas bem determinadas (fechado ou aberto), e dois sensores ópticos de posição, do tipo transmissivo, devem identificar, com redundância dual ativa, as posições fechado e aberto do diafragma.

O mecanismo obturador de luz também possui duas outras funções relevantes em operação orbital. Quando posicionado de modo a obstruir a luz incidente, e em uma sequência de atividade específica do software embutido, uma lâmpada (LED) interna (vide Figura 10) é habilitada (energizada) para aferir os sinais dos fotosensores, quanto à sua degradação temporal. Denomina-se este procedimento de calibração relativa dos fotosensores (*aging performance*). Do mesmo modo, podem-se aferir as contagens de ruído escuro dos fotosensores (*dark noise*), que são dependentes da temperatura ambiental.

7.5.4 Unidade da Eletrônica de Fotodetecção (PD)

O método da estatística de contagem de fotoelétrons (vide diagrama da Figura 12), na região espectral entre o visível e o infravermelho próximo, deve ser utilizado para concepção do circuito de detecção da radiação incidente, de baixa radiância, característica das emissões de airglow.



Figura 12 Diagrama ilustrativo do Circuito de contagem de fotoelétrons.

Dois princípios físicos caracterizam a operação de uma fotomultiplicadora: o efeito fotelétrico (fotoemissão) do catodo e a emissão de elétrons secundários dos eletrodos em vácuo (dinodos). Em termos de sistema, a fotomultiplicadora é, basicamente, um transdutor que converte sinais ópticos em pulsos de corrente detectáveis. Neste sentido, os parâmetros de especificação que se destacam quanto ao seu propósito de medida são: a eficiência quântica de conversão na faixa espectral desejada e o ganho dos dinodos (etapa de multiplicação eletrônica), em função dos níveis de radiância estimados. O dispositivo denominado fotosensor, da fabricante Hamamatsu™, modelo H10720, deve atender aos requisitos do fluxo espectral das emissões de airglow a serem medidas. Tal dispositivo contém um tubo fotomultiplicador, com fotocátodo de Multialkali (combinação dos metais alcalinos Sb-K-Na-Cs), um circuito que fornece a alta tensão e um circuito divisor de tensão



para distribuir a tensão adequada a cada um dos dinodos, elementos estes integrados em um compacto invólucro metálico, de secção retangular, e alta permeabilidade magnética, que proporciona uma ótima blindagem a campos magnéticos externos. A janela do fotosensor emprega o vidro de Borossilicato, de alta transmitância na região espectral selecionada pelos filtros ópticos e resistência a choques térmicos e mecânicos. O compartimento interno dos circuitos é impregnado de borracha siliconada RTV566, que apresenta razoável aceitação quanto ao critério de baixo *outgassing*.

O pré-amplificador e discriminador sensível à carga, PAD A111, do fabricante Amptek, deve ser usado para amplificar, discriminar e formatar o sinal de saída do módulo fotosensor, na configuração de circuito anodo-aterrado. Em seguida, um circuito temporizador típico (PIT), programado no modo contador de 16 bits, é utilizado para o registro dos pulsos.

A partir dos parâmetros básicos de especificação do *layout* óptico — área fotossensível do detector tipo PMT, comprimento óptico focal (EFL), área efetiva de abertura, entre outros —, e das características radiométricas associadas à PMT especificada — radiância estimada das emissões, fluxo de radiação no cátodo, transmitância do conjunto óptico, funções de resposta e eficiência quântica da PMT, figuras de mérito do detector ENI (*AC Equivalent Noise Input*) e NEP (*DC Noise Equivalent Power*) —, determina-se o desempenho radiométrico do subsistema de fotodetecção, para cada um dos canais de airglow, em termos da relação Sinal-Ruído, do nível do pulso de sinal a ser adquirido e endereçado pela eletrônica de interface, e em termos da sensibilidade radiométrica absoluta. A Tabela 8 mostra todos os passos e os valores teóricos das sensibilidades radiométricas.

A seguir, apresentam-se as definições dos parâmetros necessários para realizar uma análise radiométrica preliminar dos canais que medem o airglow:

- (1) λ_{emi} : comprimento de onda de referência da emissão [nm];
- (2) λ_c : comprimento de onda central (pico) do filtro de interferência óptica [nm];
- (3) $B(\lambda)$: Radiância da emissão em Rayleigs [R]; $B_{\lambda}(\lambda)$: Radiância espectral [R nm⁻¹];
- (4) $L(\lambda)$: Radiância da fonte difusa [W cm⁻²sr⁻¹]; $L_{\lambda}(\lambda)$: Radiância espectral [W cm⁻²sr⁻¹ nm⁻¹];
- (5) $L(\lambda_{emi}) \cong B(\lambda_{emi}) 10^{-10} / (2 \pi \lambda_{emi})$: Relação entre L e B em $\lambda = \lambda_{emi}$ (em nm) [W cm⁻² sr⁻¹];
- (6) $T(\lambda_c) \approx T_{air} \times T_{glass} \times T_{filter}(\lambda_c) \approx 1.0 \times T_{glass} \times T_{filter}(\lambda_c) \approx 1.0 \times (0.91)^n \times T_{filter}(\lambda_c)$:

Transmitância absoluta do fotômetro, em $\lambda = \lambda_c$, sendo *n* é o número de superfícies de vidros que a radiação de airglow atravessa [adim.];

- (7) F: F-number da configuração (layout) do projeto óptico [adim.];
- (8) $A_d = \pi (d/2)^2$: área efetiva do fotodetector (d, diâmetro, via datasheet) [cm²];
- (9) $\Upsilon_{fs} = n_{air} A_d \Omega_{fs} \cong \frac{A_d}{(4/\pi)F^2}$: Étendue ou *field-stop* (*fs*) *Throughput* do detector [cm² sr];
- (10) $\Phi_{fs}(\lambda) = L(\lambda)T_{glass}T_{filter}(\lambda)\Upsilon_{fs}$: Fluxo de Radiação que incide no *field stop* (fs) do detector [W];
- (11) $R_{C}(\lambda_{emi})$: Responsividade à radiação do cátodo (C), em $\lambda = \lambda_{emi}$ (*datasheet*) [A W⁻¹];
- (12) $q(\lambda_{mi}) = (hc/e) \times \frac{R_{\rm C}(\lambda_{emi})}{\lambda_{emi}} \cong 1240.0 \times \frac{R_{\rm C}(\lambda_{emi})}{\lambda_{emi}}$: efficiência quântica da PMT em $\lambda = \lambda_{emi}$ (nm) [adim];
- (13) $q(\lambda_c)$; $q(\lambda_{emi})$: aproximação utilizada no cálculo da Sensibilidade;



- (14) G: Ganho eletrônico característico, em função da tensão de controle (calibração do fabricante);
- (15) $i_{\rm A}$: Corrente de escuro do anodo [nA], spec. em $T = 25^{\circ}$ C e em função da tensão de controle;
- (16) $i_{\rm C} = i_{\rm A} / G$: corrente de escuro do cátodo [nA];
- (17) $R_{A}(\lambda_{emi}) = G R_{C}(\lambda_{emi})$: Responsividade à radiação do anodo, em $\lambda = \lambda_{emi}$ [A W⁻¹];
- (18) NEP = $i_A / R_A (\lambda = \lambda_{emi})$: Figura de Mérito, *DC Noise Equivalent Power* [W];
- (19) ENI = $(2ei_A G)^{1/2} / R_A(\lambda = \lambda_{emi})$: Figura de Mérito, AC Equivalent Noise Input [W Hz^{-1/2}];
- (20) $\Delta f_w = 1/2\tau_{gate}$: Largura de banda do sinal amostrado (em função do *gate* da aquisição) [Hz];
- (21) SNR: Relação Sinal-Ruído, SNR = $100 \times \frac{\Phi_{fs}}{\text{ENI} \times \sqrt{\Delta f_w}}$ (%);
- (22) $S = \frac{q(\lambda_c) T_{glass} T_{filter}(\lambda_c) A_d}{(4/\pi) F^2} \frac{10^6}{4\pi}$: Sensibilidade radiométrica absoluta em $\lambda = \lambda_c$ [counts s⁻¹ R⁻¹];
- (23) $\Phi = S \times B \times \tau_{gate}$: Sinal da PMT adquirido em um tempo de gate τ_{gate} [counts s⁻¹].

Canal Fotométrico	OI 630.0 - Li	nha Vermelha	BG - Continuum		O2 A(0-0) Ramo R		O2 A(0-0) Ramo P	
Comprimento de Onda de Referência [nm]	630		710		762		763	
Radiância da emissão	Mínima Típica		Mínima	Típica	Mínima	Típica	Mínima	Típica
[Rayleigh, R] na direção de apontamento zenital - dados observacionais	50	300	10	100	300	3000	400	4000
Radiância da fonte estendida [pW/cm2/sr]	1.26	7.58	2.24	4.48	6.27	62.66	8.34	83.43
Fluxo de Radiação efetivo que incide no cátodo [pW]	0.019	0.12	0.0035	0.034	0.1	0.98	0.13	1.31
<i>Responsivity</i> do Catodo da PMT (típica, conf. <i>datasheet</i>) [mA/W]	38.9		22.7		11.7		11	
Eficiência Quântica [%]	6.0		3.5		1.8		1.7	
<i>Responsivity</i> do Anodo da PMT [A/mW]	130.3		87.0		46.8		42.9	
Figura de Mérito: Direct- Coupled Noise Equivalent Power, NEP-dc [W]	5.12E-15		7.67E-15		1.43E-14		1.55E-14	
Figura de Mérito:AC Equivalent Noise Input, ENI (W / ^{√H} Z)	2.	2E-16	3.3E-16		6.2E-16		6.7E-16	
SNR - Relação Sinal Ruído, via ENI	90.0	533.9	10.5	105.4	158.6	1585.6	193.6	1935.7
Sensibilidade radiométrica absoluta [counts/s/R]	74.3		44.0		22.0		20.2	
Limiar de detecção [%] para valores típicos da Radiância de emissão [Rayleigh, R]	2% (7 R)		11% (11 R)		0.8% (23 R)		0.6% (25 R)	
Sinal esperado (e desvio RMS) na saída da unidade de fotodetecção [counts/s], integrado em um gate de 100 ms	474 ± 21	2332 ± 48	94 ± 10	490 ± 22	712 ± 27	6674 ± 82	858 ± 29	8135 ± 90

Tabela 8 Análise Radiométrica Preliminar.



7.6 SUBSISTEMA DE ELETRÔNICA DEDICADA (SED)

7.6.1 Unidade de Eletrônica Auxiliar (AE)

A unidade AE abrange um conjunto de circuitos condicionadores de sinais que devem monitorar a funcionalidade do instrumento GLOW quando em operação de aquisição de dados. Os dados aqui referidos são denominados de dados de *housekeeping*, que fornecem informações a respeito da vitalidade do instrumento quando em operação orbital. A seguir, e de maneira resumida, descrevem-se os circuitos.

- a. O circuito de monitoração das tensões de referência dos sensores térmicos de precisão (microcircuito), que indica a temperatura do conjunto óptico e da eletrônica de fotodetecção.
- b. O circuito de monitoração do sinal analógico (pulsos do pré-amplificador de corrente) e do sinal digital da saída do canal-4 (canal de referência) da eletrônica de fotodetecção. Tais sinais (analógico e digital) devem ser monitorados com o propósito específico de verificar-se a contagem (frequência) de sinal *overflow*, indicativos do limiar da luz incidente tolerável pelos fotosensores.
- c. O circuito que fornece uma corrente constante ao diodo emissor de luz (LED) durante a calibração interna da sensibilidade dos módulos fotosensores. Também, o circuito monitora a corrente deste LED, por intermédio de uma tensão de referência, indicando o nível analógico da corrente e o estado digital (ligado ou desligado) do LED.
- d. O circuito que monitora a corrente do *driver* do motor de passo, por intermédio de uma tensão de referência, que indica o estado digital de acionamento do motor de passo, que é um componente crítico do mecanismo obturador de luz.
- e. O circuito que monitora as tensões de alimentação internas +5V, +12V e -12V, configurado por intermédio de um divisor resistivo para gerar apropriadas tensões de referência.
- f. O circuito indicativo do estado digital de posicionamento (aberto ou fechado) do disco obturador de luz.

7.6.2 Unidade de Potência (PWR)

A unidade PWR é responsável pela interface de energia entre o barramento não regulado de +28V, proporcionado pela plataforma satelital, e as tensões de alimentação usadas no fotômetro GLOW (+5V, +12V e -12V). Basicamente, a unidade PWR deve empregar um conjunto de conversores DC/DC devidamente desacoplados de correntes residuais, um filtro passivo EMI especificado para suprimir formas de onda transientes da linha de entrada, e um circuito ativo limitador de corrente *inrush spike* que deve anteceder o filtro EMI. A topologia de aterramento é a convencional, *single-point ground*. A Figura 13 fornece um diagrama de concepção da unidade PWR.





Figura 13 Diagrama de blocos da unidade PWR, que enfatiza os componentes principais, a sequência das interconexões e as interfaces com as unidades eletrônicas e com o OBC.

7.6.3 Unidade Driver do Motor de Passo (SMDrv)

A função básica da unidade SMDrv é a de fornecer a corrente elétrica de demanda à atuação do motor de passo, abrindo e fechando o obturador de luz, em resposta aos sinais de níveis lógicos provenientes da eletrônica do módulo de controle (ICDH). Estes sinais consistem de um comando (pulsos) relativo à ação de deslocamento por passo mecânico e de um comando relacionado à direção de rotação. Por exemplo, um driver típico (vide Figura 14) pode exigir de 200 pulsos (modo *full-step*) a 12800 pulsos (modo *microstepping*) para o eixo produzir uma revolução completa. Basicamente, as entradas do driver de motor de passo são a tensão de alimentação, preferencialmente não regulada, e os sinais de controles; as saídas são as fontes de correntes pulsadas. A seção de controle lógico do circuito, normalmente referida como o circuito sequenciador, constituída, entre outros, por um microcontrolador e um *array* lógico programável, deve converter os pulsos de passo e de direção em formas de onda apropriadas para atuar no circuito de chaveamento (amplificador MOSFET) das bobinas do motor de passo.



Figura 14 Elementos básicos que compõem o driver de motor de passo, conforme descrito nesta Seção. Note que o motor de passo aqui representado é do tipo bipolar (8 fios) e está configurado na conexão elétrica em série. Este tipo de conexão entre os solenoides proporciona uma indutância tal que amplia o torque (*holding torque*) do motor em baixas velocidades.

7.6.4 Unidade de Controle, Processamento e Comunicação de Dados (ICDH)

A unidade ICDH emprega a arquitetura CISC (*Complex Instruction Set Computer*) de microcontrolador da família MCS-51 de 8-bits (Aeroflex[™]), operando em 7.3728 MHz (XTAL), que recebe comandos procedentes do computador de bordo da plataforma satelital (OBC) e transmite respostas (telemetria) aos *drivers* de protocolo serial TIA/EIA-422 (RS-422). O circuito de comunicação de



dados deve empregar redundância simples (sem duplicação de componente), isolamento óptico das linhas (relé de estado sólido) e circuito de transição (switchover) para, via comando de pulso a partir do OBC (sinal Toggle), executar a alteração do canal de comunicação com o OBC, caso seja necessário. O software embutido do fotômetro GLOW deve ser codificado em linguagem Assembly MCS-51, e tem o objetivo de executar os procedimentos operacionais do instrumento, conforme um conjunto de comandos e respostas pré-estabelecidos com o OBC. Deve-se manter o código em uma memória não-volátil do tipo PROM, com uma configuração default de parâmetros. Durante a inicialização, esses valores são transferidos para a área de memória assíncrona SRAM (memória de acesso aleatório), em que são acessados pelas instruções do software embutido. A memória SRAM também deve ser utilizada para ler e escrever os frames de transmissão e recepção de dados do GLOW. Outros circuitos periféricos da unidade ICDH, porém não menos importantes, devem incluir: (a) o circuito de reset externo ao microcontrolador, que atua nos três seguintes modos: Power-On, reset via comando de pulso a partir do OBC e o watchdog timer; (b) o circuito dos contadores programáveis para pulsos temporizados de 16-bit (PIT - Programmable Interrupt Timer), oriundos dos canais de fotodeteção (sinais de airglow); (c) os circuitos lógicos constituídos de latches/flipflops, para atender aos estados digitais de comandos de controle específicos; (d) o circuito de conversão A/D (conversor analógico-digital do tipo aproximação sucessiva) de 12-bit, implementado para realizar uma representação digital das leituras dos sensores de housekeeping; (e) o circuito de multiplexação dos sinais analógicos; (f) o circuito que recebe os sinais digitais dos sensores de posição do obturador de luz; (g) o circuito decodificador de endereços que confirma a seleção das linhas dos sinais das memórias PROM e SRAM, dos contadores dos pulsos PIT, do multiplexador, do conversor A/D, dos latchs de controle e da habilitação (energização) dos módulos fotodetectores. A Figura 15 resume, através de um diagrama de blocos em alto nível, a concepção desta unidade.





Figura 15 Diagrama de blocos da unidade ICDH, representando, simbolicamente, os diversos circuitos que constituem esta unidade, as respectivas interligações entre estes circuitos, as interfaces com o OBC e outras unidades de eletrônica (AE, PD), e os sinais de *hardware* mais representativos (analógicos e digitais).



7.7 SOFTWARE EMBUTIDO

O software operacional embutido do GLOW baseia-se no conceito de estados de operação do instrumento, em órbita satelital, adquirindo dados de ciência (airglow noturno) e dados de *housekeeping*. Os estados ou modos operacionais do fotômetro GLOW devem ser especificados de modo a atender, fundamentalmente, ao ciclo de trabalho do instrumento — uma vez que a coleta de dados realiza-se apenas na região de eclipse da órbita — e aos requisitos de interface com o OBC.

7.7.1 Modos Operacionais

Os modos operacionais principais do fotômetro GLOW são definidos a seguir.

- a. ON / OFF Modes: Referem-se aos modos operacionais sinalizados pela presença ou ausência de consumo de energia, respectivamente. Quando o instrumento é energizado, ocorre o procedimento de inicialização dos parâmetros de órbita e das condições *default* para sua operação.
- b. *Standby Mode*: Modo operacional em que o instrumento encontra-se energizado e preparado para executar comandos (eventos externos) sob a demanda do cliente.
- c. Nominal Mode: Refere-se ao modo operacional de aquisição dos dados de ciência e dos dados de housekeeping. Existem três subestados possíveis por órbita completa realizada: Science (região de eclipse da órbita obturador aberto), No-Science (região da órbita com luminosidade solar obturador fechado) e Calibration (evento transitório, destinado à calibração interna da sensibilidade do instrumento). O sistema eletromecânico obturador de luz é o componente de hardware que executa o procedimento de transição entre estes três subestados.

Em função das características do software embutido, o entendimento dos modos operacionais, e das transições entre os possíveis estados, pode ser alcançado a partir de uma representação gráfica do modelo de comportamento do fotômetro GLOW, através dos diagramas de estado e de atividade em linguagem SysML (*Systems Modeling Language*), uma linguagem de modelagem de propósito geral para aplicação em engenharia de sistemas. Em termos dos diagramas construídos em SysML e das características da interface serial com o OBC, deve-se estabelecer o protocolo de comunicação OBC/GLOW, que compreende uma série de sinais digitais de comando e de resposta necessária para atender à demanda operacional e funcional do instrumento.

A Figura 16 mostra, em particular, o diagrama de estados que caracteriza o software embutido do instrumento. Os comandos (bordo/solo) que o *hardware* permite, tendo em vista a concepção do protocolo de comunicação serial OBC/GLOW, estão representados por uma simbologia própria (_cmd). Além destes comandos, estão previstos mais dois comandos especiais por nível de pulso: *Reset* (atua diretamente em uma das portas lógicas do microcontrolador) e *Toggle* (chaveamento do canal de comunicação serial).

Adicionalmente à operação normal, representada pelo diagrama de estado da Figura 16, o protocolo de comunicação OBC/GLOW responde a três níveis de operação em modos degradados (cenários operacionais), que visa a atender as condições decorrentes de uma falha funcional ou de uma deterioração do instrumento, ou ainda em função de uma contingência da plataforma orbital.



Finalmente, a Verificação e Validação do software embutido, em vários estágios do ciclo de vida de desenvolvimento do instrumento, deve ser realizada por intermédio de uma sequência de aplicativos codificados em linguagem gráfica LabView[™], que constitui parte integrante do EGSE do instrumento GLOW. Basicamente, tais aplicativos devem enviar comandos para o instrumento, simulando uma operação em órbita do GLOW, obedecendo ao protocolo de comunicação OBC/GLOW que recebe e apresenta, de forma digitalizada e gráfica, a resposta gerada pelo software embutido.



Figura 16 Diagrama de estado do fotômetro GLOW, em linguagem gráfica SysML, para o cenário de operação Normal (dito, modo normal).



7.7.2 Alocação de Memória

A planilha da Figura 17 identifica a demanda de memória do instrumento durante um processo típico de execução do software embutido, em função de um período orbital completo. O tipo de alocação de memória que comporta a arquitetura da ICDH do instrumento GLOW é a alocação estática, em que os dados adquiridos (ciência e *housekeeping*) têm um tamanho fixo (*frame* de recepção) e estão organizados sequencialmente em endereços mapeados da memória SRAM.

	Orbit period (min)	Data Lenght (bytes)	Number of channels		
	97.72	2	4		
	Acquisition Period (min)	Number of Data Subframe			
	97.72	28			
	Gate (ms)	Frame Length (bytes)	Sample rate (ms)	Frame Fill Rate (bit/s)	Frame Fill Rate (bytes/s)
	50	256	50	1432	179
		Readout Frame (ms)		Data Volume (Mbits/orbit)	Data Volume (Mbytes/orbit)
		1430		8.397	1.050
Serial Transmission (Tx):	Pooling (s)	Baud rate (bits/s)			
(start bit + 1 byte + stop bit)	1	57600		_	
Temperature monitoring:	Coefficient (mV/°C)	Accuracy (@25°C) (mV/°C)	D/A Converter (bits)	Sensitivity (°C)	
	10	0.5	12	0.24	
Voltage monitoring:	Range (V)	Accuracy (mV)		Sensitivity (mV)	
	10			2.44	
Analog signal monitoring (channel-4):	Range (kHz)	Accuracy (kHz)		Sensitivity (Hz)	
	1000			244	



7.8 PROJETO MECÂNICO

O fotômetro GLOW é constituído, basicamente, das seguintes partes mecânicas: os tubos ópticos; um mecanismo obturador de luz; o alojamento das placas de interface eletrônica; e uma caixa metálica para proteger e estabilizar a óptica e a eletrônica do fotômetro. A configuração geral do projeto mecânico do fotômetro GLOW é fundamentada na relação geométrica de interdependência entre as partes mecânicas que compõem a caixa metálica e o traçado óptico do conjunto baffle, lente e fotodetector (tubo óptico). A Figura 18 mostra o fluxo de processo do projeto e manufatura do fotômetro GLOW.

Os principais elementos constitutivos que devem ser utilizados no projeto mecânico e nos processos de manufatura são: (1) a seleção das ligas de alumínio e de outros materiais metálicos que atendam à normatização da área espacial; (2) a seleção dos termoplásticos utilizados para o eficaz desacoplamento térmico entre partes, e que atendam aos requisitos de baixa liberação de gases contaminantes (*outgassing*); (3) os processos de tratamento de superfície adequados para atenuação das luzes espalhadas, para proteção contra corrosão e para atender ao balanço radiativo estimado, devido aos fluxos de calor recebidos pelo instrumento em órbita satelital; (4) o software CAD para o projeto das partes mecânicas.





Figura 18 Fluxo de processo do projeto (*design*) e da manufatura do alojamento mecânico do fotômetro GLOW.

A Figura 19 mostra o desenho mecânico de concepção do instrumento GLOW em uma perspectiva isométrica frontal, com transparência da tampa superior e frontal para evidenciar os alojamentos dos tubos ópticos do obturador eletromecânico (disco obturador) e do *rack* eletrônico. A Figura 20 complementa a informação anterior, através de uma perspectiva em corte lateral.







Figura 19 Vista isométrica frontal do conjunto mecânico, com transparência da tampa superior e frontal. As alças têm a função apenas de facilitar o translado do instrumento.





Figura 20 Vista em corte lateral do conjunto mecânico, em que se observa nitidamente o berço do apoio do motor de passo cujo eixo está acoplado diretamente ao disco obturador. Também evidencia o conjunto as quatro unidades eletrônicas, ICDH, AE, PWR e SMDrv, na direção do topo para base. A unidade de eletrônica da fotodetecção (PD) encontra-se disposta na linha divisória entre o subsistema Óptico e de Detecção de sinal (SOD) e o subsistema eletrônico (SED).



8 REQUISITOS DE VALIDAÇÃO

8.1 CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE ABSOLUTA

A Figura 21 mostra, em um diagrama de blocos, os componentes ópticos e de aquisição de sinal que devemos caracterizar para avaliarmos a função resposta (ou sensibilidade absoluta) de um fotômetro de airglow.



Figura 21 Elementos ópticos e de aquisição de sinal que caracterizam o fotômetro de airglow.

O fluxo de fótons incidente no cátodo do detector é função da distribuição espectral da radiância da fonte emissora, da eficiência quântica do fotocátodo, da transmitância filtro óptico, da transmitância do conjunto de lentes, da área efetiva de abertura e do campo de visão (ângulo sólido) relacionado ao *layout* óptico. O método radiométrico define a Sensibilidade absoluta como um parâmetro representativo da função de resposta do *hardware* de fotodetecção do airglow, conforme descrito pelas equações (5) e (6).

Existem, basicamente, dois métodos para se determinar a Sensibilidade absoluta da fotodetecção:

- *Estimativa Radiométrica Teórica*. O cálculo da Sensibilidade é realizado diretamente a partir dos parâmetros característicos do projeto óptico (geometria e transmitância dos elementos ópticos) e do fotodetector (eficiência quântica). Esta estimativa foi realizada na Seção 7.5.4. Porém, este método não é o mais adequado, tendo em vista a dificuldade de precisar todos os elementos necessários.

- *Estimativa por Radiometria Comparativa*. Uma fonte de radiância espectral conhecida é colocada na entrada do baffle do instrumento. Por conseguinte, os dados dos fotosensores (*counts*/s) são registrados e, em seguida, subtraídos do ruído de escuro, que depende da temperatura operacional do instrumento. Enfim, os resultados desta operação são multiplicados pelo inverso da radiância espectral, incluindo a largura de banda passante do filtro (vide equação 6). A aproximação utilizada aqui é que na faixa espectral do filtro, a radiância espectral da fonte não se altera significativamente. Assim, se a radiância espectral da fonte calibrada é dada em unidades de Rayleigh (R)/nm, então a Sensibilidade absoluta tem unidades de *counts*/R/s. Este é o método preferido em processos de radiometria, pois, conforme mencionado, nem sempre as informações paramétricas disponíveis do *hardware* de fotodetecção a ser avaliado têm a confiabilidade que se deseja.

O sistema especificado para realizar a radiometria comparativa, sensível à radiância estimada pelas medidas de airglow é a fonte de radiância comercializada pela *Keo Consultants*, denominado: *Keo*



Alcor Low Brightness Source. Basicamente, ele é uma fonte de radiância portátil muito útil para instrumentos que devem ser calibrados *in situ*, como é o caso deste fotômetro quando em ambiente de testes de integração. A lâmpada consiste de um bulbo de composição de Halogêneo-Tungstênio de 100 W, montado em uma caixa termicamente controlada. A unidade emprega um sofisticado sistema holográfico de atenuadores para difundir a luz de forma homogênea e linear. Uma unidade de controle em separado, que contém uma fonte de potência precisa, fornece uma intensidade de corrente constante com estabilidade melhor do que 0.1%.

8.2 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSMITÂNCIA DOS FILTROS ÓPTICOS

A forma da curva de transmitância do filtro depende, também, do campo de visão do fotômetro em particular. Para assegurar a confiabilidade na determinação de $t = t(\lambda)$ é imprescindível utilizar o fotômetro que será destinado a medir a emissão atmosférica. A forma da curva de transmitância fornecida pelo fabricante do filtro serve apenas como referência.

O procedimento é realizado colocando-se um difusor branco na frente do fotômetro, iluminando-o com uma determinada luz monocromática através de uma fenda micrométrica de um monocromador, que possui uma fonte de luz contínua na fenda de entrada. Esta fenda de entrada cria uma função retangular no espectro da luz. A fenda de saída "convoluciona" esse efeito com sua própria função retangular, criando um banda passante instrumental triangular para o instumento inteiro. Quando o monocromador executa uma varredura em comprimento de onda λ , o *hardware* do fotômetro registra a convolução do passa-banda instrumental do monocromador com o perfil de transmitância do filtro. Na prática, deve-se assegurar que a largura do passa-banda instrumental seja estreita o suficiente para não influenciar na forma do perfil de transmitância a ser medido. Caso contrário, uma deconvolução numérica faz-se necessária.

A Largura efetiva do filtro banda passante $\Delta \lambda_{eff}$ é determinada pela expressão numérica da equação

(7). O processo de estimativa da largura efetiva geralmente gera uma incerteza menor do que 2%. Pelo método ora mencionado, outros parâmetros da curva de transmitância também podem ser aferidos e comparados com a calibração do fabricante: a transmitância absoluta e o comprimento de onda central do filtro.



9 REFERÊNCIAS

Abdu, M. A., C. G. M. Brum, P. P. Batista, S. Gururbaran, D. Pancheva, J. Bageston, I. S. Batista, H. Takahashi. Fast and ultrafast Kelvin wave modulations of the equatorial evening F region vertical drift and spread F development. *Earth, Planets and Space,* 67:1, 2015. DOI 10.1186/s40623-014-0143-5.

Abdu, M. A. Day-to-day and short-term variabilities in the equatorial plasma bubble/spread F irregularity seeding and development. *Progress in Earth and Planetary Science* 6:11, 2019. doi.org/10.1186/s40645-019-0258-1.

Akmaev, R., Wu, F., Fuller-Rowell, T., Wang, H. Midnight temperature maximum (MTM) in Whole Atmosphere Model (WAM) simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 36, 2009. doi.org/10.1029/2009GL037759.

Beig, G.; J. Scheer, M. G. Mlynczak, P. Keckhut. Overview of the temperature response in the mesosphere and lower thermosphere to solar activity. *Reviews of Geophysics*, Volume 46, Issue 3, 2008.

Bilitza, D., S. A. Brown, M. Y. Wang, J. R. Souza, P. A. Roddy. Measurements and IRI Model Predictions during the Recent Solar Minimum. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 86, 99-106, 2012. doi:10.1016/j.jastp.2012.06.010.

Chiang, C. Y., Chang, T. F., Tam, S. W. Y., Huang, T., Chen, A. B. C., Su, H. T., & Hsu, R. R. Global observations of the 630-nm nightglow and patterns of brightness measured by ISUAL. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(2), 283-293, 2013. doi.org/10.3319/TAO.2012.12.13.01.

Christensen, A. B., R. L. Walterscheid, M. N. Ross, C.-I. Meng, L. J. Paxton, D. E. Anderson Jr., G. Crowley, S. K. Avery, J. D. Craven, R. R. Meier, D. J. Strickland. Global Ultraviolet Imager (GUVI) for the NASA Thermosphere-Ionsphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research,* Proceedings, 2266, 1994. https://doi.org/10.1117/12.187583.

Das, U., C. J. Pan. Strong kelvin wave activity observed during the westerly phase of QBO – a case study. *Ann. Geophys.*, 31, 581–590, 2013. doi:10.5194/angeo-31-581-2013.

Drob, D. P., *et al*. An update to the Horizontal Wind Model (HWM):The quiet time thermosphere. *Earth and Space Science*, 2, 301–319, 2015. doi:10.1002/2014EA000089.

Dymond, K. F., S. A. Budzen, C. Coker, D. H. Chua. The Tiny Ionospheric Photometer (TIP) on the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC/FORMOSAT-3). *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 10,614–10,622, 2016. https://doi.org/10.1002/2016JA022900.

Egito, F. Efeitos das Ondas Planetárias na Aeroluminescência. *PHD Thesis*, INPE, 2013. sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.24.13.54-TDI.

Figueiredo, C. A. O. B., R. A. Buriti, I. Paulino, J. W. Meriwether, J. J. Makela, I. S. Batista, D. Barros, A. F. Medeiros. Effects of the midnight temperature maximum observed in the thermosphere–


ionosphere over the northeast of Brazil, Ann. Geophys., 35, 953-963, 2017. doi.org/10.5194/angeo-35-953-2017, 2017.

Fujiwara, H., Y. Miyoshi. Global structure of large-scale disturbances in the thermosphere produced by effects from the upper and lower regions: simulations by a whole atmosphere GCM. *Earth Planets Space*, 61, 463-470, 2009.

Heidinger, A. K., G. L. Stephens, Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part II: Application to remote sensing in the O_2 A band. J. Atmos. Sci., 57, 1615, 2000.

Jacobi, Ch., R. Schminder, D. Kürschner. Planetary wave activity obtained from long-period (2–18 days) variations of mesopause region winds over Central Europe (52 °N, 15 °E). *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 60, 1, 81-93, 1998. doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00117-X.

Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa. Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure. *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, 2008. doi:10.1029/2008JA013301.

Link, R. and L. L. Cogget. A reexamination of the OI 6300 A nightglow. *J. Geophys. Res.*, 93, 9883, 1988.

Lima, L. M., P. P. Batista, B. R. Clemesha, H. Takahashi. 16-day wave observed in the meteor winds at low latitudes in the southern hemisphere. *Adv. Space Res.*, 38(11), 2615–2620, 2006. doi:10.1016/j.asr.2006.03.033

Melo, S. M. L., I. C. McDade, H. Takahashi. Atomic oxygen density profiles from ground-based nightglow measurements at 23°S. *J. Geophys. Res.*, 106, D14, 15377-15384, 2001.

Mlynczak, M. G., and S. Solomon. A detailed evaluation of the heating efficiency in the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 98, 10,517–10,542, 1993. doi:10.1029/93JD00315.

Mlynczak, M. G., F. J. Martin-Torres, B. T. Marshall, R. E. Thompson, J. Williams, T. Turpin, D. P. Kratz, J. M. Russell III, T. Woods, L. L. Gordley. Evidence for a solar cycle influence on the infrared energy budget and radiative cooling of the thermosphere. *J. Geophys. Res.*, 112, A12302, 2007. doi: 10.1029/2006JA012194.

Miyoshi, Y., H. Fujiwara. Excitation mechanism of intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere. *J Geophys. Res.-Atmospheres*, 111, D14, 2006.

Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107, A12, 1468, 2002.

Press, W.H., S.A. Teukosky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery. *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 2-edition, 1992.

Reed, E.I., and S. Chandra. The global characteristics of atmospheric emissions in the lower thermosphere and their aeronomic implications, J. Geophys. Res., 80, 3053-3062, 1975.



Shepherd,G. G., C. D. Anger, L. H. Brace, J. R. Burrows, W. J. Heikkila, J. Hoffman, E. J. Maier, J. H. Whitteker. An observation of polar aurora and airglow from the ISIS-II spacecraft. *Planet. Space Sci.*, 21, 819-829, 1973. doi:10.1016/0032-0633(73)90099-8.

Shepherd, G. G., Thuillier, G., Gault, W. A., Solheim, B. H., Hersom, C., Alunni, J. M., Brun, J.-F., Brune, S., Charlot, P., Cogger, L. L., Desaulniers, D.-L., Evans, W. F. J., Gattinger, R. L., Girod, F., Harvie, D., Hum, R. H., Kendall, D. J. W., Llewellyn, E. J., Lowe, R. P., Ohrt, J., Pasternak, F., Peillet, O., Powell, I., Rochon, Y., Ward, W. E., Wiens, R. H., Wimperis, J. WINDII, The Wind Imaging Interferometer on the Upper Atmosphere Research Satellite, *J. Geophys. Res.*, 98, 10725–10750, 1993. doi:10.1029/93JD00227.

Shinagawa, H. Ionosphere simulation. J. Natl. Inst. Inf. Comm. Technol., 56, 1-4, 199-207, 2009.

Sobral, J. H. A., H. Takahashi, M. A. Abdu, P. Muralikrishna, Y. Sahai, C. J. Zamlutti, E. R. de Paula, P. P. Batista. Determination of the quenching rate of the O(¹D) by O(³P) from rocket-borne optical (630 nm) and electron density data. *J. of Geophys. Res.: Space Phys.*, 98(A5), 7791–7798, 1993. doi:10.1029/92ja01839.

Takahashi, H., R. A. Buriti, D. Gobbi, P. P. Batista. Equatorial planetary wave signatures observed in mesospheric airglow emissions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 64, 1263–1272, 2002.

Takahashi, H., L. M. Lima, C. M. Wrasse, M. A. Abdu, I. S. Batista, D. Gobbi, R. A. Buriti, P.P. Batista. Evidence on 2-4 day oscillations of the equatorial ionosphere h'F and mesospheric airglow emissions. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 2005. doi:101029/2004GL022318.

Torr, M. R., P. B. Hays, B. C. Kennedy, J. C. G. Walker. Intercalibration of airglow observatories with the Atmosphere Explorer satellite. *Planet. Space Sci.*, 25, 173–184, 1977. doi:10.1016/0032-0633(77)90022-8.

Wang, D. Y., W. E. Ward, G. G. Shepherd, D. L. Wu. Stationary planetary waves inferred from WINDII wind data taken within 90–120 km altitudes 90–120 km during 1991–1996, *J. Atmos. Sci.*, 57, 1906–1918, 2000. doi:10.1175/1520-0469(2000)057.

Wang, D. Y., W. E. Ward, B. H. Solheim, G. G. Shepherd. Longitudinal variations of green line emission rates observed by WINDII at altitudes 90–120 km during 1991–1996, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 64, 1273–1286, 2002. doi:10.1016/S1364-6826(02)00041-X.

EQUARS



ANEXO A - Parâmetros Espectroscópicos para Utilização do Banco de Dados HITRAN (*High-Resolution Transmission*)

O objetivo do anexo é apresentar as definições, unidades de medidas e equações básicas que constituem o cerne da espectroscopia do HITRAN, direcionando o tratamento para o espectro das emissões espontâneas — transições em um *sistema* de dois níveis de energia: nível quântico superior (estado de energia excitado) para um nível quântico inferior (por exemplo, o estado fundamental), envolvendo a emissão de energia quantizada por fótons — e para o cálculo das intensidades das linhas espectrais atmosféricas, especialmente para a molécula O₂ banda-A (0-0). Neste contexto, o conceito de *sistema* quântico é entendido como um átomo, molécula ou partícula subatômica.

1. Sistema de unidades. A constante de Planck *h* [ergs s]; a velocidade da luz *c* [cm s⁻¹]; a constante de Boltzmann k_B [ergs K⁻¹]; a temperatura rotacional T_r [K]; a frequência da transição da linha espectral v [s⁻¹], se redefinida como $v \rightarrow v/c$, a unidade é [cm⁻¹]; a emissão de fótons de energia *E* [ergs], se redefinida como $E \rightarrow E/hc$, a unidade é [cm⁻¹]; o momento de dipolo elétrico μ em unidades Deby, [$1.0D \cong 3.335 \times 10^{-28}$ C cm $\equiv 10^{-18}$ (ergs cm³)^{1/2}]; o momento de dipolo magnético **m** em unidades de *Bohr magneton* [$\mu_B = e\hbar/2m_ec$, $1.0\mu_{|B} = 9.274 \times 10^{-21}$ erg G⁻¹]; o tensor momento de quadrupolo elétrico \vec{Q} em unidades D Å [1.0 D Å = 10^{-30} (ergs cm⁵)^{1/2}].

2. Representação de transições em um sistema quântico de dois níveis.



3. Probabilidade de Transição ou Coeficientes de Einstein de uma emissão espontânea. Define-se $A_{\eta' \to \eta} [s^{-1}]$ como a probabilidade por unidade de tempo em que um sistema no estado de energia superior $(E_{\eta'} > E_{\eta})$ emitirá espontaneamente fotóns, realizando uma transição ao estado de energia inferior. A frequência da radiação emitida é $v_{\eta' \to \eta} = (E_{\eta'} - E_{\eta}) / h$, em unidades $[s^{-1}]$. Considerando o grau de degenerescência do nível superior, $d_{\eta'}$, tal como um sistema de dois níveis, nas situações (a), (b) ou (c) do esquema anterior, segue uma expressão geral para os coeficientes de Einstein: $A_{\eta' \to \eta} = (1/d_{\eta'}) \sum_{\xi',\xi} A_{\eta'\xi' \to \eta\xi}$.

4. Momento da Transição. De acordo com a eletrodinâmica, a radiação pode ser induzida por mudanças na configuração de dipolo elétrico, ou dipolo magnético, ou quadrupolo elétrico etc., do sistema quântico em consideração. Na mecânica quântica, muitas propriedades moleculares são definidas em termos dos operadores multipolos elétricos e magnéticos:



(dipolo elétrico)	$\boldsymbol{\mu}_{\alpha} = \int r_{\alpha} \rho(\mathbf{r}) d^{3}\mathbf{r} = \sum_{k} e_{k} (r_{\alpha})_{k}$
(quadrupolo elétrico)	$\ddot{\mathbf{Q}}_{\alpha\beta} = \int \rho(\mathbf{r}) r_{\alpha} r_{\beta} d^{3} \mathbf{r} = \sum_{k} e_{k} (r_{\beta})_{k} (r_{\alpha})_{k}$
(octopolo elétrico)	$\ddot{\mathbf{O}}_{\alpha\beta\gamma} = \int \rho(\mathbf{r}) r_{\alpha} r_{\beta} r_{\gamma} d^{3} \mathbf{r} = \sum_{k} e_{k} (r_{\gamma})_{k} (r_{\beta})_{k} (r_{\alpha})_{k}$
:	;
(dipolo magnético)	$(\mathbf{m})_{\alpha} = \frac{1}{2} \int (\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}))_{\alpha} d^{3}\mathbf{r} = \sum_{k} \left(2e_{k} / 3m_{k} \right) (L_{\alpha})_{k}$
(quadrupolo magnético)	$(\mathbf{\tilde{m}})_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \int (\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r}))_{\alpha} r_{\beta} d^{3} \mathbf{r} = \sum_{k} \left(3e_{k} / 4m_{k} \right) (r_{\alpha})_{k} (L_{\beta})_{k}$
•	κ :

em que a soma representa todas as partículas em uma molécula com carga *e* massa *m*. As densidades de carga e corrente, são dadas pelas expressões:

 $\rho(\mathbf{r}) = \sum_{k} e_k \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_k), \quad \mathbf{j}(\mathbf{r}) = \sum_{k} (e_k / m_k) \mathbf{\Pi} \, \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_k), \quad \text{sendo } \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{\Pi} \text{ por definição o}$

momento angular orbital. A magnitude dos momentos de expansão multipolar é ordenada de acordo com a seguinte hierarquia: dipolo elétrico >> {quadrupolo elétrico; dipolo magnético} >> {octopolo elétrico; quadrupolo magnético}.





ANEXO B - Modelagem da Emissão OI 630

A emissão OI 630.0 nm ocorre entre as altitudes de 240 – 300 km (porção inferior da camada ionosférica F) e é o resultado de uma transição atômica proibida pela regra de seleção dipolar elétrica entre os estados quânticos ${}^{1}D - {}^{3}P$. A Figura B1 mostra os níveis de energias e os processos de emissão espontânea de interesse em airglow ionosférico.



Figura 1B Níveis de energia e processos de emissão espontânea associados ao airglow do Oxigênio atômico.

O mecanismo principal responsável pela produção de átomos excitados no estado ¹D é a reação de recombinação dissociativa dos íons O_2^+ e NO⁺ com elétrons livres.

Na região F noturna, o íon molecular O_2^+ é produzido através do mecanismo de transferência de carga:

$$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O (+1.53 \text{ eV}) \qquad (\gamma_1),$$
 (0.1)

sendo γ_1 o coeficiente de reação (cm³ s⁻¹). O íon molecular NO⁺ é produzido através da reação

$$O^{+} + N_{2} \rightarrow NO^{+} + N \quad (+1.09 \ eV) \qquad (\gamma_{2})$$
 (0.2)

sendo γ_2 o coeficiente de reação (cm³ s⁻¹).

A recombinação dissociativa do O_2^+ com os elétrons livres podem gerar os seguintes produtos:

$$O_{2}^{+} + e \rightarrow O({}^{3}P, {}^{1}D) + O({}^{3}P, {}^{1}D, {}^{1}S) \qquad (\varsigma_{X} \alpha_{1}),$$
 (0.3)

em que α_1 é o coeficiente de reação (cm³ s⁻¹) e ζ_X é a eficiência quântica que representa a combinação dos diversos estados quânticos X produzidos pela equação.

Guberman⁽¹⁾ (1988) verificou que a produção dos estados quânticos ¹D e ¹S na equação (1.3) são dependentes do estado vibracional de O_2^+ . Ou seja, a produção de $O(^1D)$ é maior quando O_2^+ encontra-se em estados vibracionais inferiores (energia vibracional menor); ao contrário, a produção



de $O({}^{1}S)$ é maior quando O_{2}^{+} encontra-se em estados vibracionais superiores (energia vibracional maior).

Um segundo mecanismo de produção de $O(^{1}D)$ é a recombinação dissociativa do NO^{+} com elétrons livres, de acordo com a seguinte reação:

$$NO^{+} + e \rightarrow N(^{2}D) + O(^{3}P) \qquad (\alpha_{2})$$
(0.4)

onde α_2 é o coeficiente de reação, seguida das reações de desativação colisional (*quenching*) do N(²D),

$$N(^{2}D) + O(^{3}P) \rightarrow N(^{4}S) + O(^{1}D) \qquad (q_{1})$$

$$N(^{2}D) + O_{2} \rightarrow NO + O(^{1}D) \qquad (q_{2})$$
(0.5)

A espectroscopia de O(¹D) estabelece que três possíveis transições eletrônicas são possíveis:

$${}^{1}D - {}^{3}P_{0} \quad \lambda 639.2nm \qquad (A_{D,0})$$

$${}^{1}D - {}^{3}P_{1} \quad \lambda 636.4nm \qquad (A_{D,1}) , \qquad (0.6)$$

$${}^{1}D - {}^{3}P_{2} \quad \lambda 630.0nm \qquad (A_{D,2})$$

sendo A_D a probabilidade de uma dada transição, ou coeficiente de Einstein (s⁻¹). É importante mencionar que $A_{D,0} \stackrel{a}{=} (A_{D,1}, A_{D,2})$ e $A_{D,2} \approx 3 \times A_{D,1}$. A equação fotoquímica representativa da emissão de fótons (aeroluminescência) é (excluindo a emissão λ 639.2 nm):

$$O(^{1}D) \rightarrow O(^{3}P) + h\nu (\lambda 630.0, \lambda 636.4).$$
 (0.7)

O tempo de vida radiativa da espécie O(¹D) $[1/(A_{D,1} + A_{D,2})]$ de aprox. 110 s, é longo o suficiente de modo a competir com processos de desativação energética colisional (*quenching*), sem a emissão de fótons. As reações mais importantes que contribuem para a desativação de O(¹D) são:

$$O(^{1}D) + O(^{3}P) \rightarrow O(^{3}P) + O(^{3}P) (k_{1})$$

$$O(^{1}D) + O_{2} \rightarrow O(^{3}P) + O_{2} (k_{2})$$

$$O(^{1}D) + N_{2} \rightarrow O(^{3}P) + N_{2} (k_{3})$$

$$O(^{1}D) + e \rightarrow O(^{3}P) + e (k_{4})$$
(0.8)

em que os coeficientes de *quenching* são representados por k (cm³ s⁻¹). Uma análise dimensional do termo de *quenching* mostra que o desativador mais importante de O(¹D) é o N₂.

A modelagem da emissão OI 630.0 nm no airglow ionosférico pode ser obtida através do cálculo da taxa volumétrica de emissão, admitindo-se válido o equilíbrio fotoquímico na determinação da distribuição das densidades numéricas de O(¹D). Determinando os termos de produção e perda para O(¹D), tem-se:

$$\varepsilon_{\text{OI630}} = A_{\text{D},2} \frac{\zeta_{\text{D}} \alpha_1 [\text{O}_2^+] n_e + q_2 [\text{N}(^2\text{D})][\text{O}_2^-] + q_1 [\text{NO}][\text{O}(^3\text{P})]}{k_1 [\text{O}(^3\text{P})] + k_2 [\text{O}_2^-] + k_3 [N_2^-] + k_4 n_e + A_{\text{D},2} + A_{\text{D},1}}.$$
(0.9)

Note que as reações químicas relacionadas ao impacto de elétrons de altas energias (elétrons aurorais) não estão incluídas nesta modelagem.

Uma modelagem simplificada da emissão OI 630.0 nm pode ser alcançada tomando como referência os trabalhos de Sobral *et al.* (1983)⁽²⁾ e Semeter (2005)⁽³⁾:



$$\varepsilon_{\text{OI630}} \cong A_{\text{D},2} \frac{\mathcal{G} \,\varsigma_{\text{D}} \,\gamma_{1} \,n_{e} \,[\text{O}_{2}]}{k_{1} \,[\text{O}(^{3}\text{P})] + k_{2} \,[\text{O}_{2}] + k_{3} \,[\text{N}_{2}] + k_{4} \,n_{e} + A_{\text{D}}} \tag{0.10}$$

A função $\mathcal{G} = \mathcal{G}(z)$ é uma função empírica da razão entre concentração numérica do íon positivo Oxigênio e elétrons, dependente da altitude. Também, utilizou-se a aproximação de equilíbrio fotoquímico para equacionar a distribuição do íon O_2^+ ,

$$[\mathbf{O}_{2}^{+}] \cong \left(\frac{[\mathbf{O}^{+}]}{n_{e}}\right) [\mathbf{O}_{2}] \frac{\gamma_{1}}{\alpha_{1}} = \mathcal{P}[\mathbf{O}_{2}] \frac{\gamma_{1}}{\alpha_{1}}, \qquad (1.11)$$

negligenciando-se outros termos de produção para a espécie O(¹D). Kelly *and* Wickwar, (1981)⁽⁴⁾, fornecem a função $\mathcal{G} = \mathcal{G}(z)$, representada pela Figura 2B.



Figura 2B Função empírica $\mathcal{G} = \mathcal{G}(z)$.

A radiância da emissão OI 630.0 nm é bastante dependente dos movimentos verticais da camada F noturna (deriva vertical devido a $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$). Quando a camada F ascende, a densidade numérica de O_2^+ diminui, decrescendo a produção de O(¹D) e, consequentemente, decaindo a radiância da emissão. Em altitudes menores a densidade de O_2^+ é maior, e, neste caso, a radiância da emissão será maior. Esta emissão também pode apresentar significativas variações temporais quando há ocorrência de subtempestades magnetosféricas.

Para executar a modelagem da taxa volumétrica da emissão OI 630, \mathcal{E}_{OI630} , os seguintes coeficientes cinéticos, eficiências quânticas, podem ser empregados na equação (1.10):

$$A_{\rm D} = A_{\rm D,1} + A_{\rm D,2} \cong 7.45 \times 10^{-3} \, {\rm s}^{-1}$$

$$A_{\rm D,2} / A_{\rm D} \cong 0.756$$

$$k_1 = 9.2 \times 10^{-13} \, {\rm cm}^3 \, {\rm s}^{-1}$$

$$k_2 = 3.2 \times 10^{-11} \, {\rm cm}^3 \, {\rm s}^{-1}$$

$$k_3 = 2.3 \times 10^{-11} \, {\rm cm}^3 \, {\rm s}^{-1}$$

$$k_4 = 6.6 \times 10^{-10} \, {\rm cm}^3 \, {\rm s}^{-1}$$

$$\gamma_1 = 1.06 \times 10^{-11} \, {\rm cm}^3 \, {\rm s}^{-1}$$

$$\zeta_{\rm D} = (1.2 \pm 0.2) \, ({\rm Abreu}, \, et \, al. \, 1983)^{(5)}$$



Para a densidade numérica das espécies químicas, O, O₂ e N₂, o modelo atmosférico de referência NRLMSISE-00 pode ser usado. Também, para os valores da densidade eletrônica, o modelo ionosférico IRI pode ser empregado.

Por conseguinte, a radiância da emissão OI 630 observada pelo instrumento GLOW pode ser simulada a partir da modelagem da taxa volumétrica de emissão de OI 630, usando uma aproximação ao processo de integração numérica:

$$B_{\text{OI630}} = \frac{1}{10^6} \int_{z_0}^{z_n} \varepsilon_{\text{OI630}}(z) \, dz \cong 10 \Delta z \sum_{j=0}^{n-1} \varepsilon_{\text{OI630}}(z_j), \quad z_j = z_0 + j \Delta z, \ \Delta z \text{ em km.} \quad (1.12)$$



⁽¹⁾ Guberman, 1988 Planet. Space Sci. 36, 47

 ⁽²⁾ Sobral, J. H. A., *et al* 1993 *J. Geophys. Res.*, **98**, 7791.
 ⁽³⁾ Semeter, J., *et al* 2005, *J. Geophys. Res.*, 110, A11310,
 ⁽⁴⁾ Kelly, J. D., and V. B. Wickwar 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 7617.

⁽⁵⁾ Abreu, V. J. et al 1983 J. Geophys. Res. 88, 4140.



ANEXO C – MODELAGEM DA BANDA ATMOSFÉRICA DE O₂

A fotoquímica de excitação das bandas atmosféricas do O_2 no airglow terrestre tem sido discutido desde o trabalho pioneiro de Meinel⁽¹⁾ (1950). Porém, a discussão permanecia aberta até que a campanha de foguetes ETON (*Energy Transfer in the Oxygen Nightglow*), com a publicação de McDade *et al.*⁽²⁾ (1986), demonstrou que os processos de transferência de energia, envolvendo uma reação intermediária, são mais eficientes para a produção de $O_2(b^1\Sigma)$. Então, uma reação trimolecular que produz uma molécula de $O_2(*)$ em um estado eletronicamente excitado, dito estado precursor, possui energia suficiente para excitar $O_2(b^1\Sigma)$, através de uma reação bimolecular de transferência de energia,

$$(\alpha k_1) \qquad O+O+M \rightarrow O_2 + M; (\gamma k_*^{(O_2)}) \qquad O_2^* + O_2 \rightarrow O_2(b^1 \Sigma_g^+) + O_2;$$
(2.1)

As outras reações que complementam o esquema cinético de perda de $O_2(b^1\Sigma)$ e $O_2(*)$ são:

$$(k_{*}^{(Q)}) \qquad O_{2}^{*} + Q \to O_{2} + Q$$

$$(k_{3}^{(Q)}) \qquad O(b^{1}\Sigma_{g}^{*}) + Q \to Q + O_{2};$$

$$(A_{2}) \qquad O_{2}(b^{1}\Sigma_{g}^{*}) \to O_{2}(X^{3}\Sigma_{g}^{-}) + h\nu \text{ (total)}$$

$$(A_{2}^{(0-0)}) \qquad O_{2}(b^{1}\Sigma_{g}^{*}) \to O_{2}(X^{3}\Sigma_{g}^{-}) + h\nu (0-0) \qquad (2.2)$$

$$(A_{*}) \qquad O_{2}^{*} \to O_{2} + h\nu$$

$$Q = O, O_{2}, N_{2}$$

$$n(M) \sim n(O_{2}) + n(N_{2})$$

Assumindo a condição de equilíbrio químico estacionário e representando por n() a densidade numérica das espécies, a taxa volumétrica de emissão de $O_2(b^1\Sigma, 0-0)$ pode ser expressa na forma:

$$\varepsilon_{\text{Atm}} = \frac{A_2^{(0-0)} \alpha \, k_1 \, n^2(\text{O}) \, n(\text{M}) \, \gamma \, k_*^{(\text{O}_2)} n(\text{O}_2)}{(A_2 + \sum_i k_3^{(\text{Q}_i)} n(\text{Q}_i)) \times (A_* + \sum_i k_*^{(\text{Q}_i)} n(\text{Q}_i))}.$$
 (2.3)

Uma expressão aproximada da equação (2.3) foi obtida por McDade *et al.*⁽²⁾ (1986), que usa coeficientes empíricos derivados da análise dos dados da campanha ETON para os coeficientes cinéticos do estado precursor,

$$\mathcal{E}_{Atm}; \frac{A_2^{(0-0)}\alpha k_1 n^2(O) n(M) \gamma k_*^{(O_2)} n(O_2)}{(A_2 + \sum_i k_3^{(Q_i)} n(Q_i)) \times (C + C^{(O_2)} n(O_2) + C^{(O)} n(O))},$$

$$C = (\alpha \gamma)^{-1} A_* / k_*^{(O_2)}$$
sendo,
$$C^{(O)} = (\alpha \gamma)^{-1} k_*^{(O)} / k_*^{(O_2)}$$

$$C^{(O_2)} = (\alpha \gamma)^{-1} (1 + (1 + \psi) k_*^{(N_2)} / k_*^{(O_2)})$$

$$\psi = n(M) / n(O_2); 5 \pm 0.2$$
(2.4)



Para executar a modelagem da taxa volumétrica da emissão, \mathcal{E}_{Atm} , os seguintes coeficientes cinéticos, eficiências quânticas e parâmetros empíricos, conforme sugere o trabalho de Murtagh et al.⁽³⁾ (1990), podem ser empregados na equação (2.4):

$$k_{1} = 4.7 \times 10^{-33} (300 / T)^{2} \text{ [molec. cm}^{6} \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$k_{3}^{(O_{2})} = 4.0 \times 10^{-17} \text{ [molec. cm}^{3} \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$k_{3}^{(N_{2})} = 2.2 \times 10^{-15} \text{ [molec. cm}^{3} \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$k_{3}^{(O)} \approx 0.(\dagger) - 8.0 \times 10^{-14} (\diamond) \text{ [molec. cm}^{3} \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$A_{2} = 0.083 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$A_{2}^{(0-0)} = 0.079 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$C \approx 0. \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$$C^{(O_{2})} = 6.6(\diamond) - 7.5(\dagger) \text{ [adim]}$$

$$C^{(O)} = 19.0(\diamond) - 33.0(\dagger) \text{ [adim]}$$

Para a densidade numérica das espécies químicas, O, O₂ e N₂, incluindo a temperatura, o modelo atmosférico de referência NRLMSISE-00 pode ser usado.

Por conseguinte, a radiância da emissão da Banda Atmosférica do O2 observada pelo instrumento GLOW pode ser simulada a partir da modelagem da taxa volumétrica de emissão, \mathcal{E}_{Atm} , usando uma aproximação ao processo de integração numérica:

$$B_{\text{Atm}} = \frac{1}{10^6} \int_{z_0}^{z_n} \varepsilon_{\text{Atm}}(z) dz \cong 10\Delta z \sum_{j=0}^{n-1} \varepsilon_{\text{Atm}}(z_j), \quad z_j = z_0 + j\Delta z, \ \Delta z \text{ em km.} \quad (2.5)$$

⁽¹⁾ Meinel, A. B. 1950 Astrophys. J. 111, 555

 ⁽²⁾ McDade, I. C. *et al.* 1986 *Planet. Space Sci.*, **34**, 789.
 ⁽³⁾ Murtagh, D. P., *et al* 1990, *Planet. Space Sci.*, **38**, 45.



LISTA DE ITENS <i>TO BE DEFINED</i>				
ID	DESCRIÇÃO	STATUS	PREVISÃO DE CONCLUSÃO	
TBD	Modelo de radiância do <i>continuum</i> de fundo (pag. 51)	pesquisa	-	
LISTA DE ITENS TO BE CONFIRMED				
ID	DESCRIÇÃO	STATUS	PREVISÃO DE CONCLUSÃO	