

ANALISADOR ELETROSTÁTICO (ELISA) PARA MISSÃO DO SATÉLITE CIENTÍFICO EQUARS

PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA

DOCUMENTO: EQUARS-0000-ANL-004-A		ESTADO: APROVADO	
DESCRIÇÃO: Este docur ponto de vista da sua co termos de sua acomoda como deve ser sua opera * Os Requisitos de Valida	mento tem por objetivo descreve encepção científica e técnica, bem c ação aos objetivos primários da mi ação orbital para o alcance do suce ação não foram fornecidos.	r em detalhe o ir como dos requisito ssão do satélite ci sso da missão.	nstrumento ELISA, do os do instrumento, em entífico EQUARS e de
DATA: 30.08.2019	EDT: VERSÃO 1.0		PÁGINAS: 44

EQUARS-0000-ANL-004-A



Proposta Científica: Requisitos e Concepção do Instrumento ELISA

AUTORES			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Ing Hwie Tan	LABAP/COCTE	30/8/19	Juffine
		i.	

REVISORES			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Mangalathayil Ali Abdu	Colaborador Externo	19/9/19	14

APROVADO POR			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Delano Gobbi	DIDAE/CGCEA	30.03.19	Opto put
		8	

REVISÕES				
REV.	DATA	MUDANÇAS/ N. PÁG.	AUTOR	APROVADO POR
Â	30-08-2019	Versão inicial	I. H. Tan	D. Gobbi
/	1-			
			-	
ş.a	(.)			÷ ¢



SUMÁRIO

1	INTR	ODUÇÃO	8
	1.2	DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA	
	1.2.1	Documentos Aplicáveis (DA)	
	1.2.2	Documentos de Referência (DR)	
	1.3	ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES	9
	1.3.1	Lista de Acrônimos	
	1.3.2	Lista de Definições	
2	A MI	SSÃO EQUARS	
	2.1	INTRODUÇÃO	
	2.2	OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS	
3	о со	NTEXTO DO INSTRUMENTO ELISA NA MISSÃO EQUARS	
	3.1	CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO ELISA PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO	0 EOUARS 12
	3.2	ELETRODINAMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
	3.3	BOLHAS DE PLASMA E "SPREAD F" EQUATORIAL	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
	3.4	ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA E	EQUATORIAL ERRO! INDICADOR
	NÃO DEF	NIDO.	
	3.5	EFEITOS DO AUMENTO DA CONDUTIVIDADE NA SAMA EM PERÍODOS NÃO PERTURBAD	OS ERRO! INDICADOR NÃO
	DEFINIDO		
	3.6	EFEITOS DO AUMENTO DA CONDUTIVIDADE NA SAMA DURANTE TEMPESTADES MAGI	NÉTICAS ERRO! INDICADOR NÃO
	DEFINIDO) .	
	3.7	O MODELO SUPIM-INPE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
	3.7 3.8	o Modelo SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no	Erro! Indicador não definido. Modelo SUPIM-INPE
	3.7 3.8	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido.	Erro! Indicador não definido. Modelo SUPIM-INPE
	3.7 3.8 3.9	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA	Erro! Indicador não definido. Modelo SUPIM-INPE
4	3.7 3.8 3.9 REQU	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS	Erro! Indicador não definido. Modelo SUPIM-INPE
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 18
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ÁCURÁCIA ÓRBITA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 18 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA POSICIONAMENTO DOS ANALISADORES NA PLATAFORMA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 18 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA POSICIONAMENTO DOS ANALISADORES NA PLATAFORMA EFEITO DO MAGNETOTORQUE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19
4	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA POSICIONAMENTO DOS ANALISADORES NA PLATAFORMA EFEITO DO MAGNETOTORQUE EQUISITOS DE PROCESSAMENTO.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 28
4 5 6	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 REQU	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS JISITOS CIENTÍFICOS ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA POSICIONAMENTO DOS ANALISADORES NA PLATAFORMA EFEITO DO MAGNETOTORQUE EQUISITOS DE PROCESSAMENTO JISITOS DE INSTRUMENTO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 28 20
4 5 6	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 REQU 6.1	O MODELO SUPIM-INPE Inclusão da precipitação de elétrons no Erro! Indicador não definido. RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA JISITOS CIENTÍFICOS RESOLUÇÃO ACURÁCIA ÓRBITA FREQUÊNCIA DE REVISITA POSICIONAMENTO DOS ANALISADORES NA PLATAFORMA EFEITO DO MAGNETOTORQUE EQUISITOS DE PROCESSAMENTO JISITOS DE INSTRUMENTO DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO ELISA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 28 20 30
4 5 6	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 REQU 6.1 6.2	O MODELO SUPIM-INPE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 28 20 30 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4 5 6	3.7 3.8 	O MODELO SUPIM-INPE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19
4 5 6	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 REQU 6.1 6.2 6.1 6.2 6.1 6.2	O MODELO SUPIM-INPE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE
4 5 6	3.7 3.8 3.9 REQU 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 REQU 6.1 6.2 6.1 6.2 6.1 6.2 6.1 6.2	 O MODELO SUPIM-INPE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. Modelo SUPIM-INPE 19 20 ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. 28 20 20 20 20 22 COM OUTROS



7	REQUISITOS DE VALIDAÇÃO	40
8	REFERÊNCIAS	41
ANE	(O A	43
ANE	ЮВ	43
ANE	«O C	43



LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esquema das entradas utilizadas no Modelo SUPIM17
Figura 2	- Função $\Lambda(\text{s/R})$ que representa a dissipação de energia do elétron na atmosfera até a
	altura z normalizada à profundidade máxima de penetração R. (Fonte: Rees, 1989) 18
Figura 3	- Esquema da órbita do satélite interceptando as linhas geomagnéticas que levam à
	Anomalia na altitude da camada E 21
Figura 4	- Intensidade do campo geomagnético total mostrando a localização da SAMA para o
	ano de 2015
Figura 5	- Configuração do campo geomagnético em longitude 300°. A órbita do satélite está
	esquematizada em altitude 650km com 15° de inclinação 23
Figura 6	- Mapa do fluxo de elétrons com energia >0,322MeV determinado pelo modelo AE9 24
Figura 7	- Mapa da declinação do campo geomagnético. Intervalo entre contornos é de 2 graus,
	contornos vermelhos para leste, azuis para oeste, verde para norte
Figura 8	- Esquema de funcionamento do analisador eletrostático
Figura 9	- Configuração do espaço de simulação utilizado para o programa SIMION
Figura 10	- Número de contagens C($\theta, \phi)$ em função dos ângulos azimutal ϕ e de elevação θ para
	elétrons incidentes com energia nominal com placas energizadas a +200V 34
Figura 11	- Distribuição de contagens em função do ângulo azimutal, integrado em ângulo de
	elevação C($\phi)$ para energias em torno da energia nominal, para +200V aplicados às
	placas
Figura 12	- Fator geométrico dependente da energia g(E) para voltagens de placa de +200V e
	-2500V
Figura 13	- Ganho relativo do detector channeltron em função da energia incidente



LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Fator geométrico simulado	para diversas voltagens de	placa

EQUARS	PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA	("
EQUARS	PROPOSTA CIENTIFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA	Ň	"





1 INTRODUÇÃO

Elétrons na faixa de energias entre 1keV e 30keV têm grande probabilidade de produzir ionizações na camada E da ionosfera (entre 90 km e 120 km de altitude), sendo uma importante fonte de ionização durante a noite, conforme evidências mostradas por medidas feitas com digisondas, na formação de camadas E esporádicas (Abdu et al, 1977). O experimento ELISA desta proposta tem objetivo de realizar medida de fluxo de elétrons energéticos que se precipitam ou não na região da Anomalia Magnética de Atlântico Sul . A camada E da ionosfera, também conhecida como a região do dínamo atmosférico, se caracteriza por ser a camada onde se concentra a condutividade elétrica da ionosfera. Seu comportamento é semelhante a um dínamo, ou gerador de corrente, quando ventos neutros da região movimentam suas cargas elétricas através do campo magnético terrestre gerando campos elétricos. Devido à geometria do campo geomagnético equatorial, esses campos elétricos gerados na camada E são mapeados à região F onde podem produzir derivas ExB que elevam a borda inferior da camada F, favorecendo a instabilidade de Rayleigh-Taylor e a formação de bolhas de plasma. Estas bolhas são regiões de baixa densidade eletrônica que ascendem e evoluem para um espectro de irregularidades com escalas espaciais menores, conhecido como "Spread F" equatorial (Abdu, 2016) causando cintilações dos sinais de comunicação trans-ionosférica via satélites.

O aumento da condutividade na região E devido à precipitação de elétrons energéticos se intensifica na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) devido ao campo magnético fraco desta região, sendo o mínimo global, o qual favorece as condições ionosféricas equatoriais no sentido de favorecer os fenômenos eletrodinâmicos que resultam na formação das bolhas. Esta hipótese é indiretamente corroborada pelas observações de aumento de densidade eletrônica feitas em solo por digisondas, mas ainda não confirmada pela medida in situ de tais elétrons (Abdu *et al*, 2005).

O instrumento ELISA é um conjunto de dois analisadores eletrostáticos de energia, de geometria cilíndrica, projetados para medir o espectro de energias de elétrons na faixa de (1 a 27) keV. Os dois analisadores têm campos de visada perpendiculares entre si (aproximadamente paralelo e perpendicular ao campo geomagnético), fornecendo parcialmente a distribuição espacial de energias. A detecção in situ de elétrons nessa faixa de energia poderá confirmar (ou não) a influência deste fenômeno na ocorrência das bolhas de plasma, especialmente na região da SAMA.



1.1 ESCOPO DO DOCUMENTO

O presente documento, Requisitos Científicos para o Instrumento ELISA, descreve as atribuições do instrumento ELISA em atender aos objetivos da missão de satélite EQUARS.

1.2 DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA

1.2.1 Documentos Aplicáveis (DA)

EQUARS-0000-MS-001-C - Declaração do Escopo da Missão EQUARS

1.2.2 Documentos de Referência (DR)

Ver Seção 8 (Referências Bibliográficas)

1.3 ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES

1.3.1 Lista de Acrônimos

- **TBC** To Be Confirmed.
- **TBD** To Be Defined.

1.3.2 Lista de Definições



2 A MISSÃO EQUARS

2.1 INTRODUÇÃO

A missão do microssatélite científico EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*) visa 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 do plasma ionosférico, especialmente no setor da América do Sul. Tais perturbações originam irregularidades ionosféricas que podem afetar a precisão e a disponibilidade dos sistemas de comunicação modernos e de navegação global por satélite (GNSS), imprescindíveis em uma vasta gama de aplicações.

No contexto das alterações das condições do ambiente da alta atmosfera terrestre, o conjunto dos instrumentos científicos embarcados 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.

2.2 OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS

A atmosfera equatorial tem influencia significativa sobre o balanço energético do planeta. Intensos sistemas convectivos e distúrbios climáticos da baixa atmosfera transportam energia e momentum na forma de ondas ascendentes, alterando o regime de circulação global dos ventos da média e da alta atmosfera. Na ionosfera, parte deste espectro pode gerar campos elétricos (mecanismo do dínamo) que, subsequentemente, redistribui o plasma, alterando os gradientes de TEC (Conteúdo Eletrônico Total), manifestando-se, muitas vezes, como irregularidades do plasma ionosférica da camada F, e que podem ser responsáveis por degradar os sinais de comunicação e navegação por satélites.

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 bolhas ionosféricas, por 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. Medindo-se 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.



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

- Encontrar evidências diretas 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);
- Identificar as fontes de excitação, a propagação e as características paramétricas dos modos de ondas atmosféricas;
- Determinar a influência da precipitação de partículas na região da SAMA nos processos da eletrodinâmica ionosférica equatorial.

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 científica de 5 (cinco) instrumentos:

- As ondas atmosféricas na base da camada-E ionosférica (região da mesosfera superior) e os eventos de bolhas ionosféricas, do ponto de vista óptico, são verificados pelo fotômetro de airglow (GLOW).
- Os processos de acoplamento entre a baixa e a alta atmosfera, do ponto de vista da atmosfera neutra (troposfera e estratosfera), bem como do plasma ionosférico, são verificados pelo receptor GROM que emprega a técnica de radio-ocultação GNSS.
- As características espaciais e temporais das depleções em densidade eletrônica (bolhas de plasma ionosféricas) são verificadas pelo conjunto de sondas eletrostáticas IONEX.
- A intensificação da ionização na camada E ionosférica devido à precipitação de elétrons, especialmente na região da SAMA será investigada pela medida in situ do espectro de energias dos elétrons feita pelo analisador eletrostático ELISA.
- Os efeitos do acoplamento magnetosfera-ionosfera são verificados pelo sensor de partículas de altas energias APEX e pelo analisador eletrostático de energias ELISA.

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 por satélite na geração dos produtos de ciência e de aplicação. Além disso, considera-se viabilizar a 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) e ICON (Ionospheric Connection Explorer).



3 O CONTEXTO DO INSTRUMENTO ELISA NA MISSÃO EQUARS

3.1 CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO ELISA PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS

A principal contribuição do instrumento ELISA para os objetivos científicos da missão EQUARS é fornecer os dados necessários para o cálculo do aumento da condutividade ionosférica equatorial na sua camada E (tipicamente entre 90km a 120km de altitude) devido à precipitação de elétrons, e com isso contribuir na investigação dos processos eletrodinâmicos que levam ao aparecimento e desenvolvimento de bolhas de plasma.

O instrumento ELISA (*Electrostatic Energy Analyser* – Analisador Eletrostático de Energias), irá medir o espectro de energias de elétrons de 1keV a 27keV. Estes elétrons, detectados na altitude do satélite e guiados pelo campo geomagnético, podem (dependendo de seu ângulo de arremesso) precipitar até a camada E da ionosfera, onde têm a energia na faixa ideal para produzir ionização, aumentando a condutividade elétrica da camada, e consequentemente intensificando os fenômenos eletrodinâmicos.

A configuração do campo geomagnético na região equatorial conecta em condições únicas os fenômenos que ocorrem na camada E com a base da camada F, onde a ocorrência da instabilidade de Rayleigh-Taylor pode gerar as bolhas de plasma, envolvendo vários fenômenos eletrodinâmicos e hidrodinâmicos que podem ser simulados utilizando o modelo ionosférico SUPIM-INPE junto com os modelos de geração das instabilidades. As derivas da ionosfera equatorial podem ser calculadas e a evolução das bolhas de plasma pode ser estimadas e confrontadas com as medidas efetivamente feitas por outros instrumentos a bordo do satélite (IONEX e GLOW) e em solo (EMBRACE).

Vale salientar que não encontramos registros na literatura de medidas do espectro energético dos elétrons nessa faixa na região equatorial, pois a maioria dos analisadores eletrostáticos são projetados para o estudo da precipitação de elétrons nas regiões aurorais onde os fluxos são várias ordens de grandeza maiores. As evidências de ionização extra na região equatorial que existem agora são devidas às medidas indiretas feitas em solo (digisondas).

3.2 ELETRODINAMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL

A eletrodinâmica da ionosfera na região equatorial é fortemente controlada por campos elétricos provenientes, internamente, da ação de dínamo dos ventos e ondas atmosféricas, e externamente, da interação do vento solar com a magnetosfera (Abdu 2016).

Campos elétricos de dínamo têm origem em uma fina camada (comparada às escalas magnetosféricas) de aproximadamente 85km a 200km de altitude chamada de região de dínamo, onde as colisões entre cargas elétricas e as partículas neutras da atmosfera são tais (elétrons são não colisionais enquanto os ions são colisionais) que podem resultar em movimento perpendicular ao campo geomagnético B, resultando em campo elétrico E = VxB.



Por outro lado, campos elétricos podem se originar na interação vento solar – magnetosfera. A passagem do vento solar pela magnetosfera pode gerar um campo elétrico de convecção que penetra na ionosfera em altas latitudes pela reconexão magnética ("Prompt Penetration Electric Fields ou PPEF). A ionosfera em baixas latitudes é blindada pela plasmasfera. Entretanto, como esta blindagem leva um certo tempo para acontecer, esse campo elétrico de convecção pode penetrar na região equatorial no inicio de tempestades magnéticas, quando ele é sub-blindado ("under-shielded") e mais tarde, durante a fase de recuperação, o campo elétrico induzido pelo processo de blindagem supera o campo de penetração resultando em um campo na direção oposta ("over-shielded"). As tempestades magnéticas podem também gerar campos elétricos de dínamo perturbado ("Disturbance Dynamo Electric Fields ou DDEF) que resultam de distúrbios termosféricos causados por aquecimento devido à aurora, que alcançam as regiões equatoriais 4 a 5 horas após a PPEF.

3.3 BOLHAS DE PLASMA E "SPREAD F" EQUATORIAL

Dentre os diversos processos eletrodinâmicos na ionosfera equatorial, a missão EQUARS é particularmente interessada no estudo de desenvolvimento do "spread F" equatorial e das bolhas de plasma, que são regiões de baixa densidade de plasma alinhada ao campo geomagnético, que se formam na borda inferior da camada F da ionosfera e derivam verticalmente para cima. Elas são causadas por uma combinação de força gravitacional, campos elétricos e ventos neutros induzindo a instabilidade de Raleigh-Taylor. As condições favoráveis para a ocorrência dessa instabilidade ocorrem no terminador solar (pôr do sol), quando uma intensificação do vento zonal combinado com o gradiente longitudinal (dia/noite) de condutividade e o acoplamento entre as camadas E e F através das linhas de campo geomagnético, produzem uma intensificação do campo elétrico na direção leste (aumento pré reversão de campo elétrico zonal ou "pre-reversal enhancement zonal electric field" - PRE), causando uma deriva vertical EXB para cima da camada F. A subida da camada F é acompanhada pelo aumento do gradiente da densidade da borda inferior desta camada, favorecendo o aparecimento da instabilidade e a formação das bolhas de plasma ascendentes que evoluem para um espectro amplo de irregularidades com escalas espaciais menores, que constituem o "spread F" equatorial.

3.4 ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA EQUATORIAL

Os efeitos da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) sobre o desenvolvimento das bolhas de plasma se devem basicamente a dois fatos: 1) a declinação do campo geomagnético que determina a duração de por do sol nos pontos conjugados, ou seja, o gradiente longitudinal da condutividade que controla a deriva vertical de PRE, que é uma característica regular durante períodos não perturbados, e 2) a intensificação da ionização devido à precipitação de partículas e consequentemente a intensificação da condutividade na região da SAMA que acontece em períodos não perturbados e se intensifica ainda mais durante tempestades magnéticas.



A declinação magnética afeta a variação mensal da ocorrência de "spread F" porque a PRE depende do gradiente de condutividade longitudinal integrada na linha de campo, que ocorre durante o terminador solar, que tem uma contribuição maior das camadas E conjugadas e, portanto, é maior quando o terminador solar se move paralelamente ao meridiano magnético. A grande declinação do campo geomagnético na região brasileira (~21° para oeste) resulta em um máximo de ocorrência em dezembro, ao passo que na região peruana, onde a declinação é muito pequena, o máximo acontece durante os equinócios.

Os efeitos do aumento de condutividade devido à precipitação de elétrons na SAMA são discutidos a seguir.

3.5 EFEITOS DO AUMENTO DA CONDUTIVIDADE NA SAMA EM PERÍODOS NÃO PERTURBADOS

O efeito da intensificação da condutividade na região da SAMA devido à precipitação de partículas energéticas durante períodos não perturbados é adicionar um gradiente **extra** para oeste ao gradiente da condutividade integrada normalmente existente no terminador solar (também direcionado para oeste). Este efeito pode ser visto comparando as variações sazonais do PRE/deriva vertical em Jicamarca (Peru) e São Luis. A amplitude da PRE no Brasil é sistematicamente maior do que no Peru mesmo durante o seu máximo sazonal em março e setembro. A ionização intensificada da camada E durante períodos não perturbados foi verificada por dados de ionosonda em Cachoeira Paulista, localizado dentro da SAMA (Abdu, Batista 1977), onde a razão noite/dia de ocorrência de camadas E esporádicas é bastante intensificada, e a ocorrência frequente de altas frequências de bloqueio (fbEs) são interpretadas como evidências de uma fonte regular de ionização noturna. Os dados obtidos com ionosonda indicam uma densidade de plasma noturna de 5×10⁻⁴ cm⁻³, o que corresponderia a uma precipitação de elétrons de 20 keV com fluxo de 8×10⁵ cm⁻².cm⁻¹.

3.6 EFEITOS DO AUMENTO DA CONDUTIVIDADE NA SAMA DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS

O panorama não perturbado descrito acima pode ser drasticamente modificado durante tempestades magnéticas. Dependendo de sua polaridade, os campos elétricos perturbados podem induzir bolhas de plasma ou suprimir seu desenvolvimento, pela simples alteração da altitude da camada F através da deriva vertical induzida. A precipitação de partículas na SAMA durante tempestades magnéticas é outra fonte significativa de modificação.

Campos de penetração (PPEF) sub-blindados com polaridade para leste têm amplitude maior no setor noturno quase em fase com a PRE, aumentando a deriva vertical e o crescimento da instabilidade. Existe, entretanto, um limite superior, acima do qual a deriva vertical começa a suprimir a instabilidade (Abdu 2008). Uma deriva vertical anormalmente grande causada por PPEF foi observada no Brasil durante a super tempestade de 30 de outubro de 2003, e não resultou no desenvolvimento de bolhas. A deriva vertical foi causada por campos elétricos de polarização induzidas por um grande aumento no gradiente de condutividade ionosférica causada,



provavelmente, pela precipitação de elétrons na região da SAMA. Não se sabe ao certo qual o limite na deriva vertical para a supressão no surgimento de bolhas de plasma.

As derivas zonal e vertical do plasma equatorial são induzidas respectivamente por campos elétricos vertical e zonal. Bolhas de plasma derivam para leste em condições não perturbadas junto com o plasma ambiente. Um campo elétrico de penetração (PPEF) sub-blindado com polaridade para leste causando perturbação na deriva vertical pode produzir uma perturbação na deriva zonal do plasma/bolha para oeste. Esta anticorrelação entre perturbações nas derivas vertical e zonal causadas por PPEF foi observada em várias ocasiões e foi explicada por Abdu (1998) da seguinte maneira: o campo elétrico de penetração com polaridade para leste que causa a deriva vertical da camada F também induz um campo elétrico Hall na camada E que mapeia através das linhas geomagnéticas para a camada F como uma perturbação vertical causando deriva para oeste. Para este mecanismo operar à noite a condutividade na camada E tem de aumentar, provavelmente por causa do aumento de ionização causada pela precipitação de elétrons.

O comportamento da deriva zonal da camada F equatorial foi recentemente estudada usando o modelo Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model – INPE (SUPIM-INPE), que é uma versão modificada do modelo SUPIM, com a inclusão de uma fonte extra de ionização devido à precipitação de partículas (Santos 2016a). A velocidade da deriva zonal do plasma *Vy* foi calculada usando o campo elétrico vertical representado pela equação a seguir sugerida por (Eccles (1998) :

$$V_{y} = U_{y}^{P} - \frac{\Sigma_{H}}{\Sigma_{P}} \left(V_{z} - U_{z}^{H} \right)$$
(3.1)

onde

 Σ_{H} e Σ_{P} são as condutividades Hall e Pedersen integradas na linha de campo geomagnético

 U_y^P é a velocidade do vento zonal integrada na linha de campo geomagnético e ponderada pela condutividade Pedersen

 U_z^H é a velocidade do vento meridional integrada na linha de campo geomagnético e ponderada pela condutividade Hall

Vz é a delocidade de deriva vertical do plasma

Um campo elétrico de penetração (PPEF) sub-blindado que induz deriva vertical pode produzir uma perturbação na deriva zonal para oeste dependendo da razão entre as condutividades $\Sigma_{\rm H} / \Sigma_{\rm P}$ e o termo U_z^H . Dois casos foram estudados:

Na tempestade magnética de 24 de junho de 2008, durante o mínimo solar no setor peruano, as derivas observada e calculada apenas concordaram quando o termo de vento U_y^P que depende da condutividade de Pedersen integrada era modificada e a razão Σ_H / Σ_P era aumentada devido à uma precipitação de elétrons com fluxos entre 9.4×10^3 cm⁻²s⁻¹ e 2.4×10^3 cm⁻²s⁻¹ na faixa de energias de 2 a 32 keV. Esta é uma evidência clara de que o campo elétrico Hall induzido pelo campo de penetração na camada E com condutividade intensificada pela precipitação de partículas é uma importante fonte de variabilidade na deriva zonal perturbada. A precipitação de elétrons foi



evidenciada pelo aparecimento de camadas E esporádicas observadas em ionogramas em vários lugares.

Num segundo caso usando a mesma metodologia, durante a tempestade de 23-24 de setembro de 2003 sobre a região brasileira, a deriva zonal observada das bolhas de plasma, só puderam ser explicadas pelo modelo se um aumento significativo na condutividade Hall fosse produzida pelo aumento da ionização na camada E devido a um fluxo de elétrons entre 1.1×10^6 cm⁻²s⁻¹ e 2.9×10^5 cm⁻²s⁻¹ na faixa de energias entre 2 e 32 keV. Este fluxo tão intenso se deve provavelmente pelo fato da precipitação ter ocorrido na região da SAMA (Santos 2016b).

Os espectros de energia utilizados no modelo SUPIM-INPE para o cálculo da deriva zonal foram escolhidos com base em medidas feitas pelo satélite Discovery 29 em sua passagem pela SAMA com energias na faixa de 90keV a 1200keV. Portanto foi necessário fazer uma extrapolação para energias entre 2 e 32 keV que são ideais para ionização na camada E, onde a condutividade Hall prevalece. As medidas previstas do instrumento ELISA são, portanto, inéditas e importantes para confirmar (ou não) a precipitação dos elétrons e determinar seu real espectro de energias.

3.7 O MODELO SUPIM-INPE

O modelo SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) para a plasmasfera e ionosfera (Bailey et al, 1997) resolve as equações temporais de continuidade, momento e balanço de energia ao longo do campo geomagnético de dipolo excêntrico obtendo densidades, fluxos alinhados ao campo e temperaturas de íons (O+, H+, He+, N2+, O2+, e NO+) e elétrons. O modelo inclui vários processos físico químicos como produção de íons devido à radiação solar, produções e perdas dos íons devido às reações químicas entre os constituintes ionizados e neutros, difusões ambipolar e térmica, colisões íon-íon e íon-partícula neutra, ventos termosféricos, deriva eletromagnética (E×B), condução térmica, aquecimento fotoelétrico, aquecimento friccional e um grande número de processos de aquecimento locais e mecanismos de esfriamento. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático com as entradas do SUPIM.

As concentrações dos constituintes neutros e a temperatura do gás neutro são fornecidas pelo modelo de atmosfera neutra MSIS90 (Hedin, 1987). A fotoionização pela radiação solar tem fluxos solares calculados pelo modelo EUVAC (Richards 1994). As frequências de colisão e as reações químicas envolvidas com as respectivas taxas são fornecidas por por Bailey e Sellek (1990).

Este modelo foi modificado no INPE para uma extensão de cálculos para a região E ionosférica com a altitude mínima passando de 120km para 90km. A possibilidade de efetuar o calculo das derivas zonais da região F equatorial (Santos, 2005) ampliou consideravelmente as aplicações para o sistema termosfera-ionosfera equatorial e de baixas latitudes.





Figura 1 - Esquema das entradas utilizadas no Modelo SUPIM

3.8 INCLUSÃO DA PRECIPITAÇÃO DE ELÉTRONS NO MODELO SUPIM-INPE

O modelo SUPIM–INPE foi novamente modificado para a inclusão da ionização produzida pela precipitação de partículas energéticas (Abdu et al 2013, Valentim 2015). A ionização produzida pela interação de elétrons com a atmosfera se reflete no aumento das condutividades Pedersen (paralela ao campo elétrico e perpendicular ao campo magnético) e Hall (perpendicular aos campos elétrico e magnético) definidas respectivamente como:

$$\sigma_P = \frac{q}{B} \sum_{i=1}^{7} N_i \frac{v_i * \omega_i}{v_i^2 + \omega_i^2}$$
(3.2)

$$\sigma_{H} = \frac{q}{B} \sum_{i=1}^{7} N_{i} \left(1 - \frac{\omega_{i}^{2}}{\nu_{i}^{2} + \omega_{i}^{2}} \right)$$
(3.3)

onde N_i é a densidade numérica, ω_i é a frequência ciclotrônica e ν_i é a frequência de colisões com neutros da i-ésima partícula (elétrons e íons).

A taxa de ionização por unidade de volume devido a elétrons precipitantes com energia E_p é dada por (Rees, 1989):

$$q(z) = F E_p \Lambda\left(\frac{s}{R}\right) \frac{\rho(z)}{\Delta \varepsilon_{ion} R(E_p)}$$
(3.4)

onde

EQUARS-0000-ANL-004-A



z é a altura

ho(z) é a densidade de massa obtida do modelo NRLMSISE-2000

F é o fluxo de elétrons precipitantes (cm⁻²s⁻¹)

E_p(eV) é a energia dos elétrons mono energéticos

 $\Delta \epsilon_{ion}$ é a energia média perdida por par de íons formado (37 eV para N2 e 33 eV para O2, adota-se média de 35eV)

A função $\Lambda(s/R)$ representa a dissipação de energia do elétron na atmosfera até a altura z normalizada em relação à profundidade máxima de penetração (até o ponto em que o elétron pare). A energia dissipada pelo elétron na atmosfera não é uniforme ao longo da trajetória, tem um valor máximo a uma distância da fonte que depende da energia. Porém, a função de dissipação de energia normalizada $\Lambda(s/R)$ é independente da energia. Os parâmetros s e R são profundidades de espalhamento atmosférico (em gm.cm⁻²) e são definidos como:

$$s = \int_{z}^{\infty} \rho(z) dz \tag{3.5}$$

$$R(E) = 4,3x10^{-7} + 5,3x10^{-6} E^{1.67} E em keV$$
(3.6)

A profundidade máxima R(E) foi determinada experimentalmente para elétrons aurorais de maior relevância (com energias entre 200eV e 50keV) resultando na relação acima.

Para um feixe de elétrons com distribuição angular isotrópica (ângulos de arremesso entre 0 e 80°) a função Λ (s/R) é mostrada na Figura 2.







A taxa de ionização total é calculada integrando-se q(z) em energia com o fluxo F dos elétrons obtido do espectro de energias dos elétrons precipitantes N(E).

Como já mencionado, os espectros de energias N(E) utilizados até o presente foram extrapolados de dados satelitais existentes apenas para energias mais altas.

3.9 RELAÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA

Analisadores eletrostáticos de energia similares ao instrumento ELISA têm sido utilizados frequentemente por inúmeras missões para estudar a precipitação de elétrons e íons em altas latitudes, pois essas precipitações são a causa das auroras boreal e austral. Entretanto, os fluxos nas regiões aurorais são de 4 a 6 ordens de grandeza maiores do que na região equatorial. Consequentemente os analisadores a bordo destes satélites medem praticamente zero contagens quando passam pela ionosfera em baixas latitudes. Não há na literatura menções de medidas feitas nessas regiões na faixa de energia de interesse para a aeronomia. Até o presente os espectros utilizados em modelagens são extrapolados de dados obtidos em energias mais altas utilizando detectores diferentes dos analisadores eletrostáticos.

O instrumento ELISA foi otimizado para esse fim, aumentando-se seu Fator Geométrico por aproximadamente uma ordem de grandeza (ver seção 6.2.2 e 6.2.3), o que deve ser suficiente para a detecção dos fluxos estimados pelas medidas indiretas feitas em solo com digisondas e radar de espalhamento incoerente que medem a densidade eletrônica e as derivas ionosféricas.

Embora exista sinergia entre as missões EQUARS e as missões com lançamento previsto para breve como a Missão SPORT e a missão ICON nenhuma delas terá um instrumento análogo ao ELISA, de maneira que as medidas a serem feitas serão inéditas.



4 **REQUISITOS CIENTÍFICOS**

O instrumento ELISA fornecerá o espectro de energias dos elétrons de 1kev a 27 kev a cada varredura (nas tensões aplicadas às placas cilíndricas) que terá duração de 3,2s (mais provável) ou 0,8s. A partir destes espectros de energia é possível calcular a densidade eletrônica devida à ionização produzida na camada E ionosférica (utilizando a equação 3.4) e as condutividades Hall e Pedersen (definidas nas equações 3.2 e 3.3). Isto permitirá calcular várias características da evolução das bolhas ionosféricas, como as derivas zonais, além de confirmar a causa da intensificação na densidade eletrônica e outros fenômenos associados observados em solo pelos equipamentos do EMBRACE.

4.1 Resolução

Considerando uma velocidade orbital de 7,5km/s, a resolução espacial será de 24km para varreduras de 3,2s e de 8km para varreduras com duração de 0,8s, o que é uma boa resolução considerando a grande área coberta pela anomalia magnética.

4.2 Acurácia

Como descrito no item 6.2.3 os fluxos de elétrons na faixa de energia coberto pelo ELISA são várias ordens de grandeza menores do que os fluxos aurorais, onde muitos analisadores eletrostáticos similares são utilizados. A maximização do Fator Geométrico do ELISA levou em conta fatores limitantes como a massa e volume do experimento, já que fluxos menores requisitariam áreas coletoras maiores, e a potência do experimento, pois para espaçamento entre placas maiores se requer maior voltagem aplicada entre elas (já quase no limite). O Fator Geométrico dos analisadores foi aumentado em uma ordem de grandeza aproximadamente quando comparados com analisadores similares usados nas regiões aurorais. Com isso, caso as previsões de fluxo baseados em cálculos e dados medidos em solo estejam corretas, o número de contagens será ao redor de 100, o que deve ser suficientemente acima do nível de ruído.

4.3 Órbita (alvo, cobertura e frequência)

Os elétrons coletados pelo analisador na altitude de órbita do satélite podem penetrar a ionosfera até a camada E, dependendo de sua energia e ângulo de arremesso em torno do campo geomagnético que os guia. A figura 4.1 mostra esquematicamente como a órbita do satélite (assumindo hipoteticamente com altitude de 650km e 15° de inclinação) intercepta elétrons que poderiam precipitar até a camada E da ionosfera na longitude da anomalia magnética.





Figura 3 - Esquema da órbita do satélite interceptando as linhas geomagnéticas que levam à Anomalia na altitude da camada E.

Na realidade a Figura 3 é apenas esquemática, usando uma aproximação dipolar do campo geomagnético, e tem a localização da SAMA em data pretérita.

De acordo com o modelo US/UK World Magnetic Model – 2015 (Chulliat, 2015) o centro da anomalia, ou ponto de B mínimo está situado em latitude ~ 26°S e longitude ~ 57° W (ou 303°) como mostra o mapa da Figura 4.

Uma configuração mais elaborada do campo geomagnético foi calculada utilizando a última edição do modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) de 2015. Este modelo (assim como o *US/UK World Magnetic Model*) utiliza uma expansão em harmônicos esféricos com evolução temporal (variação secular) baseado em modelo linear, atualizado a cada 5 anos. A Figura 5 mostra a configuração do campo geomagnético na longitude do centro da anomalia ao redor de 300°.

EQUARS





Figura 4 - Intensidade do campo geomagnético total mostrando a localização da SAMA para o ano de 2015.

Pode-se notar que a inclinação de órbita de 15° interceptaria marginalmente a linha de campo que a 650km de altitude guiaria um elétron até a latitude do centro da anomalia de 26° na altitude da camada E (100km). Uma cobertura mais abrangente da região da SAMA seria feita com uma órbita de 25° de inclinação (a 650km de altitude) o que interceptaria linhas até 30° de latitude em 100km.



60°W = 300°

45°W = 315°



Durante a revisão de MDR, foi alertado pelo Dr. Walter Gonzalez (comunicação pessoal) que o máximo em precipitação para partículas com energias maiores do que 200keV acontece em latitudes maiores, ao sul do centro da anomalia — considerado aqui como o local do mínimo em intensidade de campo magnético. De fato, de acordo com (Voss 1980) e (Gledhill, 1976), os máximos em precipitação medido em altas energias (>200keV) ocorriam, na época destas publicações, em:

– Latitude ~ 35°S	 Longitude ~ 30°W;
enquanto o centro da	anomalia (B mínimo) se situava na época em (no Atlântico Sul):
– latitude < 30°S	– longitude ~45°W.

A Figura 6 mostra um mapa mais recente de precipitação de elétrons energéticos baseado no Modelo AE9 (Ginet, 2013). Pode se notar o máximo em precipitação ao sul e a leste do centro da anomalia magnética. Este mapa é similar ao medido pelo satélite DEMETER (órbita circular 98° de inclinação, 660km de altitude) com dados obtidos entre Jan2005-Dez2010.





Figura 6 - Mapa do fluxo de elétrons com energia >0,322MeV determinado pelo modelo AE9.

Os motivos para a discrepância são incertos, podendo ser devido a interações entre as partículas precipitantes e diversas formas de ondas.

Conforme consultas com a Dra. Inez Batista (comunicação pessoal) e Dr. M.A. Abdu (comunicação pessoal), para elétrons na faixa de energia a ser medida pelo ELISA/EQUARS (1 a 27 keV), durante períodos "quietos" espera-se o máximo no centro da anomalia (B mínimo), talvez até mais a oeste devido a deriva zonal ExB e também pelo fato dos elétrons terem uma deriva natural para leste na corrente de anel, isto é, à medida que se aproximam da anomalia , de oeste para leste, vão se perdendo na atmosfera e com isso o máximo ocorreria mais a oeste. Porém durante tempestades magnéticas campos elétricos da magnetosfera penetram na ionosfera equatorial e a deriva zonal pode mudar para leste, não se espera que vá para o sul. Há sim uma deriva vertical e talvez com isso os elétrons passem para linhas de campo mais altas, precipitando mais ao sul.

Enfim, não se sabe ao certo o que ocorrerá. Mas segundo Dr. Abdu (comunicação pessoal), a órbita ideal seria mais inclinada, entre 20-25°, para cobrir a anomalia equatorial (não a magnética). Além disso, devido às diversas interações com campos elétricos e ondas, a região de interesse é grande ao redor da anomalia. Observam-se efeitos pelo menos a 10° do seu centro, em todas as direções.



4.4 Frequência de revisita

A interceptação do satélite com as linhas do campo geomagnético que conduzem os elétrons à região da anomalia na altitude da camada E, pode ser simulada para se estimar a frequência com que esta configuração ocorrerá.

A inclinação da órbita afetará obviamente a frequência de revisita da região de interesse. Além da região de mínimo do campo geomagnético, vale salientar que a declinação do campo na região brasileira faz com que a frequência de ocorrência das bolhas seja maior em **dezembro**, devido ao alinhamento da linha de campo geomagnético com o terminador solar (ver item 3.4).

4.5 Posicionamento dos analisadores na plataforma

Dois analisadores idênticos detectarão os elétrons provenientes de duas direções perpendiculares, uma delas aproximadamente paralela ao campo geomagnético, de modo que a distribuição direcional de velocidades possa ser estimada, pois a precipitação dos elétrons até a camada E depende, além da energia, também do seu ângulo de arremesso (*pitch angle*). A direção paralela ao campo geomagnético é em primeira aproximação a direção norte, para onde aponta o módulo ESAN, que detectaria os elétrons dentro do cone de perdas.

Entretanto a declinação real é variável, e a direção de visada do analisador também varia durante a trajetória do satélite em função da inclinação de sua órbita.

Pode-se ver pela Figura 7 que a declinação do campo geomagnético próximo ao centro da anomalia é de aproximadamente 15°. Se a inclinação da órbita for de 15° o apontamento do módulo ESAN variará de -15° (oeste) a +15° (leste). Com isso o ângulo entre a direção de visada do módulo ESAN e o campo gemomagnético será entre 0° e 30°. O módulo ESAW, terá apontamento entre -105° e -75°, formando ângulo entre -90° e -60°.





Figura 7 - Mapa da declinação do campo geomagnético. Intervalo entre contornos é de 2 graus, contornos vermelhos para leste, azuis para oeste, verde para norte.

Outra consideração a ser feita é em relação ao ruído causado pela radiação UV emitida pelo sol, para a qual os detectores *channeltron* são sensíveis. O módulo ESAN aponta para o norte e, portanto nunca estará apontando diretamente para o sol, sendo então protegido desta contaminação. O módulo ESAW, perpendicular ao ESAN, pode a princípio apontar para qualquer direção perpendicular, pois seu objetivo é estimar se o fluxo de elétrons é omnidirecional (ou isotrópico, como é assumido nos cálculos computacionais) ou não. Inicialmente escolheu-se a direção oeste. Entretanto, nesta posição, o analisador estará apontando para o sol durante o terminador solar (pôr do sol), ficando mais propenso a ruídos causados pela contaminação da radiação UV. A melhor direção de apontamento do módulo ESAW deverá ser, portanto, a direção **leste.**

4.6 Efeito do Magnetotorque

O campo magnético produzido pelas bobinas de magnetotorque foi estimado em aproximadamente 512 Gauss.



O raio de giro de um elétron de 1000eV (a menor energia a ser medida pelo ELISA) em torno deste campo seria de¹:

$$r_e(cm) = \frac{T_e^{\frac{1}{2}}(eV)}{B(Gauss)} = 0,147cm.$$

Em comparação, o campo geomagnético na altitude de 650km na longitude do centro da anomalia é de aproximadamente 18.200 nT = 0,182Gauss, e o raio de giro deste mesmo elétron seria de 4,13m.

Comparado com as dimensões das placas cilíndricas que o elétron tem de atravessar para ser detectado (aproximadamente 11cm), a deflexão causada pelo campo geomagnético dentro do analisador é desprezível (\sim 1,5°).

Com o campo gerado pelo magnetotorque, um raio de giro de 1,5mm praticamente confina o elétron à linha de campo gerada. Se esta linha for perpendicular à entrada do analisador, o elétron seria impedido de entrar no analisador. Mesmo que a direção da linha permita a entrada, a trajetória do elétron estaria muito fortemente vinculada à linha do campo magnético produzido e não à sua trajetória original.

Satélites que lançaram Analisadores Eletrostáticos

Analisadores semelhantes ao ELISA foram embarcados no satélite DMSP (Block 5D/Flights 6-10). O satélite F6 foi lançado em 1982 com órbita circular polar a 840km de altitude.

Outro satélite que lançou analisador eletrostático (com geometria esférica tipo top-hat, mas com mesmo princípio de funcionamento que o ELISA) para estudar auroras é o FAST (Fast Auroral Snapshot). Foi lançado em 1996 em órbita elíptica de inclinação 83°, com apogeu e perigeu de 4175km e 350km respectivamente.

Outro satélite com analisador cilíndrico como o ELISA foi o Atmosphere Explorer–C (AE-C). Parece que tinha spin. O artigo que tenho se refere a dados tirados no modo "despun" em altitude de 300km (!) órbita circular, em 1976 (o satélite funcionou durante 6 anos).

Outros mais antigos: ESRO I A e B (lançados em 1969), orbita baixa, OGO 4 e 5 (1968), Injun5 (1968), IMP 5,6,7 e 8 (1973), Hawkeye (1974), ISEE 1 e 2 (1977), PDP (STS -3 Mission, 1982), PDP (SL-2 Mission, 1985)

Os outros satélites lançados com analisadores eletrostáticos provavelmente tinham propulsão pois não eram de baixa órbita: Cassini (foi para Saturno!), Venus Express, Planet-A (para encontrar o cometa Halley em 1986)

1

https://www.spaceweather.ac.cn/chinese/plasma_formulary/pdf/pdf_new/Fundamental_Plasma_Parameters.pdf):



5 **REQUISITOS DE PROCESSAMENTO**

Os dados brutos fornecidos pelo ELISA gerados em órbita (LO) serão:

- Para cada varredura de tensão nas placas cilíndricas (com tempo de 3,2s ou 0,8s a ser definido por telecomando) haverá uma série de 32 números correspondentes ao número de elétrons contados durante o intervalo de tempo (200ms para varredura em 3,2s ou 50ms para varredura em 0,8s) em que as placas cilíndricas estiveram energizadas em cada um dos 16 níveis de energia com potencial V_i (i =1 a 16 níveis de energia), para os dois analisadores (2X16). Estas medidas são repetidas indefinidamente, interrompidas periodicamente (a cada 200 ou 800 varreduras) para dados de *housekeeping* descritos no item 2.
- 2) Periodicamente uma varredura é feita para monitorar o funcionamento do amplificadordiscriminador e as voltagens fornecidas às placas a ao detector *channeltron*. Uma série de 32 números (para os dois analisadores = 2x16) é gerada correspondente ao número de elétrons contados em cada um dos 16 níveis de energia de uma varredura de calibração, onde o amplificador-discriminador, ao invés de receber os pulsos gerados pela *channeltron*, é alimentado por um trem de pulsos com frequência definida, ou seja, todos os 32 números devem ser iguais correspondendo a essa frequência, caso contrário, o amplificador não estaria funcionando propriamente. Além disso, outra série de 17 números é também gerada correspondente às 16 voltagens fornecidas às placas cilíndricas, e a voltagem aplicada às duas *channeltrons*.

Inicialmente os dados brutos serão transmitidos ao CRC e depois processados no EMBRACE aonde deverão ser georeferenciados (L1B):

- 1) Com a data e o horário em que foram medidos, e a posição do satélite nesse horário
- 2) Com a intensidade e direção do campo geomagnético nesse horário.

O processamento dos dados deve ser realizado em solo.

Os dados brutos (**L0**) obtidos pelo instrumento ELISA consistem em um conjunto números que representam quantos elétrons foram detectados para cada um dos 16 níveis de energia de cada varredura.

Dividindo cada número pelo intervalo de tempo de contagem (Δt em s), obtém-se a taxa de contagem C (em s⁻¹). O fluxo de elétrons precipitantes I(E_i) (**L1A**) com a energia definida pelo potencial V_i é dada dividindo-se a taxa de contagens pelo Fator Geométrico [G] conforme definido na seção 6 (equação 6.12):

$$I(cm^{-2} s^{-1} eV^{-1} sr^{-1}) = \frac{C(s^{-1})}{[G](cm^2.sr.eV)}$$
(5.1)



Este fluxo de elétrons precipitantes poderá ser usado para calcular a densidade eletrônica produzida pela ionização usando-se a equação 3.4 (A Eqn. 3.4 é usada para taxa de produção, e não para a densidade),

$$q(z) = F E_p \Lambda \left(\frac{s}{R}\right) \frac{\rho(z)}{\varDelta \varepsilon_{ion} R(E_p)},$$

Em que F é o fluxo em cm⁻²s⁻¹, e q(z) é a taxa de ionização em cm⁻³s⁻¹. (L2A)

e as condutividades Pedersen e Hall (L2B) podem ser calculadas pelas equações 3.2 e 3.3:

$$\sigma_P = \frac{q}{B} \sum_{i=1}^{7} N_i \frac{v_i * \omega_i}{v_i^2 + \omega_i^2} \qquad \sigma_H = \frac{q}{B} \sum_{i=1}^{7} N_i \left(1 - \frac{\omega_i^2}{v_i^2 + \omega_i^2} \right)$$

Essas grandezas serão alimentadas ao modelo ionosférico SUPIM para o cálculo das diversas propriedades inerentes ao fenômeno das bolhas de plasma **(L3)**.



6 REQUISITOS DE INSTRUMENTO

6.1 DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO ELISA

O instrumento ELISA consiste em dois analisadores eletrostáticos de energias concebidos com geometria cilíndrica, adequados para realizar medidas de fluxo de elétrons na faixa de energias de aproximadamente 1keV a 27 keV divididos em 16 níveis separados exponencialmente. Os dois analisadores são idênticos e terão visadas apontadas preferencialmente para o norte e leste (variável com a inclinação da órbita).

O princípio de operação do analisador eletrostático se baseia nas trajetórias quase circulares que os elétrons incidentes na sua janela de entrada farão ao serem submetidos a um campo elétrico radial produzido por placas cilíndricas concêntricas nas quais se aplica uma diferença de tensão. Os elétrons incidem numa das extremidades destas placas cilíndricas, de extensão angular de 60°, como mostrado na Figura 8, e somente serão coletadas na outra extremidade se satisfizerem determinadas relações entre sua energia e a tensão entre as placas. Os elétrons que conseguem emergir desta região cilíndrica entre placas são coletados por um detector do tipo *channeltron* (multiplicador de elétrons), que produz um pulso elétrico, que será amplificado e contado eletronicamente por um contador. O número de pulsos (ou seja, de elétrons) é contado durante um intervalo de tempo, ao fim do qual esse número é armazenado, a tensão entre as placas (que seleciona a energia que será coletada) é variada, e volta-se a contar os pulsos em outra energia durante o mesmo período de tempo, e assim sucessivamente, se obtém o espectro da intensidade do fluxo de elétrons em 16 níveis de energia. Obtido um espectro, a tensão entre placas retorna ao valor inicial, e o processo se repete indefinidamente.



Figura 8 - Esquema de funcionamento do analisador eletrostático.

O instrumento é composto de 3 módulos mecânicos: dois módulos idênticos (ESAN e ESAL que apontam para as duas direções mencionadas) abrigam as placas cilíndricas, e o detector com seu circuito associado. O terceiro módulo (ESAE) é o módulo de eletrônica composto de três submódulos contendo as fontes de baixa a e alta tensão (ESAE-HVS), o circuito contador de elétrons (ESAE-EC) e o circuito de interface (ESAE-ICDH).



6.2 O FATOR GEOMÉTRICO DO ANALISADOR

6.2.1 CONCEITOS BÁSICOS DO FATOR GEOMÉTRICO

Um elétron com energia E incidindo perpendicularmente no centro da abertura de entrada do analisador esquematizado na figura 6.1, percorrerá uma trajetória circular atingindo o centro da abertura de entrada do detector localizado na saída das placas cilíndricas, se a voltagem V aplicada entre as placas obedecer à seguinte relação:

$$E = \frac{qV}{2\ln\left(\frac{R_{\ell}}{R_{i}}\right)} \tag{6.1}$$

onde q é a carga do elétron e R_e e R_i são os raios externo e interno das placas cilíndricas.

Com exceção desta trajetória circular que ocorre apenas nessa condição única e ideal, elétrons com energias diferentes (mas próximas da ideal) e/ou com ângulos de incidência diferentes, mas próximas da perpendicular, podem atingir o detector em trajetórias que não podem ser descritas analiticamente. Portanto, a resposta de um analisador a um fluxo incidente tem de ser medida experimentalmente ou simulada numericamente.

O parâmetro que relaciona o fluxo medido com o fluxo incidente é chamado de Fator Geométrico, pois com exceção da eficiência do detector, depende apenas da geometria do analisador, refletindo seu campo de visada (o ângulo sólido de aceitação) e a largura relativa da banda de energia que será detectada em torno da energia nominal determinada pela equação 6.1.

A grandeza experimental medida pelo analisador é a taxa de contagens C em s⁻¹, que pode ser expressa como (Johnstone, 1972)

$$C = \int |\cos\theta \, dA \, d\Omega \, De \tag{6.2}$$

onde I é a intensidade direcional das partículas incidentes em unidades de cm⁻².s⁻¹.sr⁻¹.eV⁻¹, θ é o ângulo de incidência sobre o elemento de área dA, d Ω é o elemento de ângulo solido na direção θ , e E é a energia da partícula. A integração é feita apenas sobre as partículas que atingem o detector.

Uma integração de dA resulta em

$$C = \int |A(\theta,\phi) \cos\theta \, d\Omega \, dE \tag{6.3}$$

onde $A(\theta,\phi)$ é uma área coletora efetiva e a quantidade $A(\theta,\phi)\cos\theta$ é às vezes chamada de fator geométrico diferencial.

O fator geométrico dependente da energia é definido como

$$g(E) = \int A(\theta, \phi) \cos\theta \, d\Omega$$
 em unidades de cm².sr (6.4)

e o fator geométrico integrado em energia é definido como



$$[G] = \int g(E) dE \qquad \text{em unidades de cm}^2.\text{sr.eV} \qquad (6.5)$$

Se o fluxo incidente real não variar significativamente dentro da faixa de aceitação do analisador, ele pode ser aproximado pelo fluxo observado I_{obs} , dado por

$$I_{obs} = C/[G]$$
(6.6)

A determinação do Fator geométrico é feita submetendo o analisador (experimentalmente ou numericamente) a um feixe mono energético com energia E, intensidade uniforme (na abertura de entrada), I_b com ângulo de incidência na direção (θ', ϕ'). Esse feixe pode ser expresso como

$$I = I_b \,\delta(\theta - \theta') \delta(\phi - \phi') \delta(E - E') \qquad \text{onde } \delta \, \acute{e} \, a \, \text{função delta de Dirac} \qquad (6.7)$$

Substituindo na Eq. 6.3 se obtém

$$C(\theta,\phi,E) = I_{b} A(\theta,\phi) \cos\theta$$
(6.8)

A quantidade $A(\theta,\phi) \cos\theta$ é portanto a taxa de contagem por fluxo incidente unitário, quando o analisador é exposto a uma feixe uniforme na direção (θ,ϕ) .

Substituindo a equação (6.8) na equação (6.5), se obtém a expressão o do fator geométrico dependente da energia em função da taxa de contagens medida pelo analisador quando exposto a um feixe de elétrons conhecido:

$$g(E) = I_{b}^{-1} \int C(\theta, \phi, E) d\Omega$$
(6.9)

que na forma discreta é expressa como

$$g(E_k) = \int_{b}^{-1} \Sigma C(\theta_i, \phi_j, E_k) \Delta \Omega$$
(6.10)

O Fator Geométrico integrado em energia, dentro da faixa de cada nível energético determinado pela tensão aplicada V conforme a equação 6.1, é calculado integrando-se numericamente os valores de $g(E_k)$:

$$[G] = \sum g(E_k) \Delta E \tag{6.11}$$

O Fator Geométrico [G] define então a sensibilidade do analisador, ou seja, qual a taxa de contagens que será medida para um determinado fluxo incidente.

6.2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FATOR GEOMÉTRICO

Para o instrumento ELISA o Fator Geométrico foi calculado numericamente utilizando o pacote comercial SIMION 8.0 (Melo et. al, 2016). Este pacote modela campos elétricos e magnéticos gerados por eletrodos pré-determinados resolvendo a equação de Laplace, e calcula as forças que atuam sobre partículas carregadas e suas trajetórias dentro do espaço de simulação. As coordenadas



utilizadas, a configuração com as placas cilíndricas, o detector e a caixa de blindagem são mostrados na Figura 9.

Um programa de calibração determina as condições iniciais de cada elétron incidente (energia e ângulos de incidência). Após a simulação SIMION cria um arquivo de saída com as condições iniciais e finais de cada partícula em eventos selecionados. Esse arquivo é analisado selecionando-se apenas os elétrons cujas coordenadas finais sejam coincidentes com as coordenadas da abertura de entrada do detector e classificando-os de acordo com os ângulos iniciais de incidência.



Figura 9 - Configuração do espaço de simulação utilizado para o programa SIMION.

A Figura 10 mostra a distribuição do número de contagens $C(\theta,\phi)$ para elétrons incidentes com energia nominal em um caso em que uma tensão de +200V é aplicada na placa interna. Pode-se notar que a distribuição não é simétrica no ângulo azimutal ϕ da mesma maneira que a geometria do analisador. Para a energia nominal o campo de visada é de aproximadamente 3,2° no ângulo azimutal e 11° em elevação.





Figura 10 - Número de contagens C(θ , ϕ) em função dos ângulos azimutal ϕ e de elevação θ para elétrons incidentes com energia nominal com placas energizadas a +200V.



Figura 11 - Distribuição de contagens em função do ângulo azimutal, integrado em ângulo de elevação C(φ) para energias em torno da energia nominal, para +200V aplicados às placas.



Quando a energia é variada em torno da energia nominal a distribuição é afetada principalmente em ângulo azimutal, não havendo grande alteração em ângulo de elevação. A Figura 11 mostra a distribuição de contagens em ângulo azimutal $C(\phi)$, integrada em ângulo de elevação, para energias variadas em torno da nominal para o mesmo caso da figura anterior. Para energias menores que a nominal o pico da distribuição se desloca para ângulos ϕ negativos que correspondem a ângulos de incidência com componente radial para fora. Isto é esperado pois a componente radial para fora contrabalança o excesso de força centrípeta. O oposto ocorre para energias maiores que a nominal. Pode-se notar que o ângulo de aceitação azimutal total do analisador é de aproximadamente ± 10°.

Para o cálculo do fator geométrico dependente da energia g(E), a equação 6.10 é utilizada e expressa nas coordenadas utilizadas como:

$$g(E) = \frac{\Delta \theta \Delta \varphi}{Incident \ Flux} \Sigma \ \Sigma \ C(\theta_i, \varphi_j) \ cos \theta_i$$
(6.12)

onde θ e ϕ são os ângulos de incidência de elevação e azimutal respectivamente.

O cálculo de g(E) é iniciado com a energia nominal expressa pela equação 6.1, para o qual g(E) deve ter valor próximo ao máximo. O cálculo é então repetido para outras energias ao redor do valor nominal até que o valor do g(E) correspondente seja desprezível. O Fator geométrico integrado [G] é então calculado para a banda de energia em torno da energia nominal utilizando-se a equação 6.11. Esta integração é feita calculando-se a área sob uma curva interpolada de g(E). A Figura 12 mostra as curvas de g(E) para duas voltagens aplicadas na placa interna, de 200V e 2500V.

Os resultados da simulação são resumidos na Tabela 1.

Pode-se notar que as curvas de g(E) para as voltagens de placa de 200V e 2500V são bem semelhantes assim como os respectivos valores de [G]/E_{pico}. Isto mostra que o fator geométrico é essencialmente dependente da geometria do analisador. Entretanto, a eficiência do detector não é levada em conta nas simulações e na realidade ela é dependente da energia. Como o fornecedor dos detectores não fornece a curva de eficiência, esta tem de ser medida experimentalmente, pois varia para cada detector individualmente.





Figura 12 - Fator geométrico dependente da energia g(E) para voltagens de placa de +200V e -2500V.

Fahela 1	 Fator geométrico s 	imulado nara diversas	voltagens de niaca
		initiado para diversas	voltagens de placa.

V _{placa} (V)	E _{circular} (eV)	E _{pico} (eV)	∆E (eV)	$\Delta E/E_{pico}$	g(E) _{pico} (cm ² .sr)	[G] (cm².sr.eV)	[G]/E _{pico} (cm ² .sr)
+200	1913,84	1911,11	543,3	0,284	9,692 x10⁻³	5,532	2.895 x10⁻³
-200	1913,84	2076,7	549	0,264	9,217 x10 ⁻³	5,303	2.55 x10⁻³
+2500	23923	24333	7155,3	0,294	9,587 x10 ⁻³	71,7	2.947 x10 ⁻³

6.2.3 ESTIMATIVA DE FLUXOS, TAXA DE CONTAGENS E COMPARAÇÃO COM OUTROS ANALISADORES

Uma estimativa do fluxo a ser medido foi feita para verificar se o Fator Geométrico do analisador seria suficiente para se conseguir uma taxa de contagens mensurável.

Dados experimentais *in situ* na região da ionosfera de baixas latitudes não foram encontrados na literatura com exceção de uma estimativa feita pelo satélite Atmosphere Explorer – C (AE-C) (Gledhill et al 1981). Como este satélite tinha como missão investigar elétrons na região auroral, a maioria das passagens pela região equatorial não resultavam em nenhuma contagem. Foi feita então uma análise estatística sobre muitas passagens sobre a região da anomalia resultando num fluxo estimado de 2x10² cm⁻².s⁻¹.sr⁻¹.keV⁻¹ para elétrons com 20 keV, muito próximo do nível de ruído.



O fluxo estimado pela AE-C é muito inferior ao previsto por efeitos aeronomicos. Camadas E esporádicas medidas por ionosondas por Abdu e Batista (1977) poderiam ser explicadas se um fluxo de elétrons de 20 keV de 8x10⁵ cm⁻² sec⁻¹ precipitasse na região da anomalia. Mais recentemente, simulações numéricas feitas por Santos et al (2016) sobre a deriva zonal da camada F equatorial somente concordariam com dados de deriva zonal de bolhas de plasma observados por imageadores de airglow e digisondas se uma precipitação de elétrons com energias na faixa de 2keV a 32 keV fosse incluída na simulação. Para duas tempestades magnéticas estudadas, os fluxos nessa faixa de energia necessários para explicar as derivas medidas foi de 9.4x10³ cm⁻²s⁻¹ a 2.4x10³ cm⁻²s⁻¹ durante o período de mínimo solar (2008) e de 1.1x10⁶ cm⁻²s⁻¹ and 2.9x10⁵ cm⁻²s⁻¹ perto do máximo solar (2003).

Para uma estimativa da taxa de contagens, assumiremos primeiramente um fluxo de elétrons de 20 keV de 8×10^5 cm⁻²sec⁻¹ conforme previsões feitas pelos efeitos aeronomicos. O fator geométrico do analisador para energia de 20 keV pode ser estimado pelo resultado das simulações mostrado na tabela 1: [G]/E = 2.95x10⁻³, ou [G] \approx 59 cm².sr.eV, e como Δ E/E \approx 0.294, Δ E \approx 5880 eV para esta energia. Assumindo que o fluxo de 20 keV de 8×10^5 cm⁻²sec⁻¹ é omnidirecional, a densidade de fluxo seria I = $8\times10^5/(4\pi. \Delta E)$ = 10.83 cm⁻².s⁻¹.sr⁻¹.ev⁻¹. A taxa de contagens seria então C = [G] . I = 639.16 s⁻¹. Como o instrumento ELISA irá varrer 16 níveis de energia em 3,2s, o tempo de acumulação de contagens em cada nível será de 200ms, resultando em 128 contagens, o que seria bem acima do nível de ruído.

Se, por outro lado, o fluxo de elétrons for bem menor e semelhante ao medido pelo AE-C, de aproximadamente $2x10^2$ cm⁻².s⁻¹.sr⁻¹.keV⁻¹ em 20keV, a taxa de contagens para o ELISA será de: C = [G]. I = 59 cm².sr.eV× 0.2 cm⁻².s⁻¹.sr⁻¹.eV⁻¹ = 11.8 s⁻¹, ou 2.36 contagens em 200ms, o que já seria bem próximo do nível de ruído.

Para comparar o Fator Geométrico do ELISA com outros analisadores, verificamos que a simulação numérica do Fator Geométrico do ELISA está em concordância com fórmulas semi empíricas deduzidas por Johnstone (1972):

$$\frac{[G]}{T_p} \approx 2.6 \left[\frac{(\rho_e - \rho_i)}{2} \right] \frac{BAY}{l} \approx 0,00337 \ cm^2. \, \text{sr}$$
(19)

$$B = \frac{\Delta E}{T_p} = \left[\frac{(\rho_e - \rho_i)}{2}\right] 2.36 \times 10^5 (\theta_p)^{-2.43} \approx 0.294$$
(20)

onde T_p é a energia da órbita circular, $\rho = r/r_{circular}$, A é a área do detector em cm², Y é a altura da abertura de entrada, *l* é a distância ao longo da superfície cilíndrica entre a entrada e o detector, e θ_p é a extensão angular em graus.

Aplicamos esta fórmula para os analisadores dos satélites AE–C e DMSP-F6 (Defense Meteorological Satellite Program) (Hardy et al, 1984). Ambos tem extensão angular de 60° como o ELISA mas foram projetados para uso na região auroral, e possuem [G] $/T_p$ de aproximadamente



 2.62×10^{-4} cm².sr e 2.83×10^{-4} cm².sr, bandas de energia de 0.28 e 0.14 respectivamente. O ELISA, portanto, tem fator geométrico uma ordem de grandeza maior.

Duas considerações devem ser feitas em relação à taxa esperada de contagens.

Primeiramente o fluxo a ser detectado na altitude do satélite (650km) deve ser maior do que o estimado pelos efeitos aeronomicos que ocorrem principalmente na camada E da ionosfera (em ~ 100km de altitude) pois somente os elétrons que tiverem ângulos de arremesso dentro do cone de perdas atingirão estas altitudes, devendo o restante ser refletido antes disso pelo campo geomagnético. A intensidade do campo geomagnético nas altitudes de 100km e 650km, na longitude da anomalia é de 22,200 nT e 18,200 nT respectivamente. O cone de perdas tem então aproximadamente 65°. Assumindo fluxos omnidirecionais, este cone de perdas significa que 58% das partículas serão refletidas antes de atingir a camada E, ou seja os fluxos estimados devem ser maiores na altitude do satélite por um fator 2 aproximadamente.

A segunda consideração a ser feita diz respeito à eficiência do detector. A simulação numérica assume que o detector tem eficiência de 100% para todas as energias incidentes. Na realidade os detectores do tipo "channeltron" tem eficiência variável com a energia, e esta eficiência varia para cada detector individualmente, não sendo fornecido pelo fabricante e, portanto tem de ser medido experimentalmente durante a calibração do analisador em um feixe de elétrons com intensidade conhecida. A Figura 13 mostra uma medida da eficiência relativa feita em um detector (Sjuts KBL510) utilizado na caracterização do feixe de calibração. Tipicamente a eficiência cresce rapidamente de energias mais baixas até atingir um pico ao redor de 1 keV e decresce lentamente com o aumento da energia do feixe.



Figura 13 - Ganho relativo do detector channeltron em função da energia incidente.



6.3 CRITÉRIOS DE QUALIDADE

- Desgaste da Channeltron



7 REQUISITOS DE VALIDAÇÃO

Calibração no feixe de elétrons



8 REFERÊNCIAS

Abdu M.A. and Batista I.S., "Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source", *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 39, pp. 723-731, 1977

Abdu M. A., Jayachandran P. T., MacDougall J., cecile J. F., and Sobral J. H. A., "Equatorial F Region Zonal Plasma Irregularity Drifts under Magnetospheric Disturbances", *GeoPhys. Res. Let.*, vol. 25(22), 4137-4140, 1998

Abdu M. A., Batista I. S., Carrasci A. J., Brum C. G. M., "South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere" *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 67, 1643–1657, 2005

Abdu M. A., de Paula E. R., Batista I. S., Reinisch B. W., Matsuoka M. T., Camargo P. O., Veliz O., Denardini C. M., Sobral J. H. A., Kherani E. A., and Siqueira P. M., "Abnormal evening vertical plasma drift and effects on ESF and EIA over Brazil-South Atlantic sector during the 30 October 2003 superstorm. J. Geophys. Res. 113:A07313. doi:10.1029/2007JA012844, 2008

Abdu M. A., Souza J. R., Batista I. S., Fejer B. G., and Sobral J. H. A., "Sporadic E Layer Development and Disruption at Low Latitudes by Prompt Penetration Electric Fields durng Magnetic Storms", *J. Geophys. Res. Space Physics* Vol. 118, 2639-2647, doi:10.1002/jgra.50271, 2013

Abdu M. A., "Electrodynamics of ionospheric weather over low latitudes", *Geosci. Lett.* 3:11 doi: 10.1186/s40562-016-0043-6, 2016

BAILEY, G. J.; SELLEK, R., "A mathematical model of the Earths plasmasphere and its application in a study of He+ at L=3", Ann. Geophys., v. 8, n. 3, p. 171-189, 1990.

BAILEY, G. J.; BALAN, N.; SU, Y. Z., "The Sheffield University Ionosphere Plasmasphere Model – A Review", J. Atmos. Sol. Terr. Phys. v. 59, n. 13,p.1541-1552, 1997.

Chulliat, A., S. Macmillan, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, B. Hamilton, A. Woods, V. Ridley, S. Maus and A. Thomson, 2015, *The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Report,* National Geophysical Data Center, NOAA. doi: 10.7289/V5TB14V7

Eccles J. V., "A simple model of low latitude electric fields", *J. Geophys. Res. Space Physics*, 103:26699-26708, 1998

Ginet G. P., O'Brien T. P., Huston S. L., Johnston W. R., Guild T. B., Friedel R., Lindstrom C. D., Roth C. J., Whelan P., Quinn R. A., Madeen D., Morley S. and Su Y., Space Sci. Rev. 179, 579-615, DOI 10.1007/s11214-013-9964-y, 2013

Gledhill, J.A., Rev. Geophys. And Space Phys. 14(2),173, 1976



Gledhill J. A. and Hoffman R. A., "Nighttime observation of 0.2- to 26 keV electrons in the South Atlantic anomaly made by Atmospheric Explorer C", *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 86, pp. 6739–6744, 1981.

Hardy D. A., Schmitt L. K., Gussenhoven M. S., Marshall F. J., Yeh H. C., Schumaker T. L., Huber A., Pantazis J., "Precipitating Electron and Ion Detectors (SSJ/4) for the Block 5D/Flights 6-10 DMSP Satellites: Calibration and Data Presentation ", AFGL – TR – 84-0317, 1984.

Hedin, A. E., "MSIS-86 thermospheric model", J. Geophys Res., v. 92, n. A5, p. 4649-4662, 1987

Johnstone A. D., "The Geometric Factor of a Cylindrical Plate Electrostatic Analyzer", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 43, no. 7, pp. 1030 - 1040, 1972.

Melo P. D. G., Tan I. H., Barroso J. J. and Dallaqua r. S., "Numerical simulation of the geometric factor of a cylindrical electrostatic analyzer to monitor electron precipitation in the South Atlantic Magnetic Anomaly", *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol. 44(6),1009-1017, doi:10.1109/TPS.2016.2558320, 2016

REES, M.H., "Physics and chemistry of the upper atmosphere", Cambridge University Press, 1989, p.289

Richards, P. G.; Fennelly, J. A.; Torr, D. G. EUVAC: "A solar EUV flux model for aeronomic calculations", J. Geophys. Res., v. 99, n. A5, p. 8981-8892,1994.

Santos P.M. T., "Estudo da Dinâmica do Sistema Termosfera-Ionosfera por Modelo Teórico e Observações Experimentais", tese de Doutorado INPE 2005

Santos AM et al "Disturbance zonal and vertical plasma drifts in the Peruvian sector during solar minimum phases", *J. Geophys. Res. Space Physics* 121, 2503-2521, doi:10.1002/2015JA022146, (2016)a

Santos AM et al "Stormtime equatorial plasma bubble zonal drift reversal due to disturbed Hall electric field over the Brazilian region" *J. Geophys. Res. Space Physics, vol.* 121, 5594-5612, doi:10.1002/2015JA022179, (2016)b

Valentim A. M. S., "Campos Elétricos e Derivas do Plasma na Ionosfera Equatorial do Setor Americano durante Tempestades Magnéticas", Tese de Doutorado , INPE, URL http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J6F9C5, 2015

Voss H.D. et al, J. Atm. Terr. Phys. 42, 227-239, 1980

EQUARS	PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO ELISA	"





LISTA DE ITENS <i>TO BE DEFINED</i>								
ID	DESCRIÇÃO	STATUS	PREVISÃO DE CONCLUSÃO					
TBD-1								
LISTA DE ITENS TO BE CONFIRMED								
ID	DESCRIÇÃO	STATUS	PREVISÃO DE CONCLUSÃO					
TBC-1	aa							