



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

PROJETO:

**EQUARS**

## **CONJUNTO DE EXPERIMENTOS IONOSFÉRICOS (IONEX) PARA MISSÃO DO SATÉLITE CIENTÍFICO EQUARS**

### **PROPOSTA CIENTÍFICA: REQUISITOS E CONCEPÇÃO DO INSTRUMENTO IONEX**

<b>DOCUMENTO:</b> EQUARS-0000-ANL-003-A	<b>ESTADO:</b> APROVADO	
<p><b>DESCRIÇÃO:</b> Este documento tem por objetivo descrever em detalhe o instrumento IONEX, 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.</p> <p>* Os Requisitos de Validação não foram fornecidos.</p>		
<b>DATA:</b> 03.09.2019	<b>EDT:</b> VERSÃO 1.0	<b>PÁGINAS:</b> 43

EQUARS	<p style="text-align: center;">EQUARS-0000-ANL-003-A</p> <p style="text-align: center;">Proposta Científica: Requisitos e Concepção do Instrumento IONEX</p>	
--------	--	---

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

REVISORES			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Francisco Carlos de Meneses Jr.	Colaborador Externo	19/09/19	
Polinaya Muralikrishna	Colaborador Externo	05/09/19	

APROVADO POR			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Delano Gobbi	DIDAE/CGCEA	30.08.19	

REVISÕES				
REV.	DATA	MUDANÇAS/ N. PÁG.	AUTOR	APROVADO POR
A	30-08-2019	Versão inicial	I. H. Tan	D. Gobbi



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1	ESCOPO DO DOCUMENTO .....	7
1.2	DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA.....	7
1.2.1	<i>Documentos Aplicáveis (DA)</i> .....	7
1.2.2	<i>Documentos de Referência (DR)</i> .....	7
1.3	ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES .....	7
1.3.1	<i>Lista de Acrônimos</i> .....	7
1.3.2	<i>Lista de Definições</i> .....	7
<b>2</b>	<b>A MISSÃO EQUARS</b> .....	<b>8</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	8
2.2	OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS .....	8
2.3	CARACTERÍSTICAS DA MISSÃO EQUARS .....	9
<b>3</b>	<b>O CONTEXTO DO INSTRUMENTO IONEX NA MISSÃO EQUARS</b> .....	<b>12</b>
3.1	CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO IONEX PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS .....	12
3.2	RELAÇÃO DO INSTRUMENTO IONEX COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA .....	13
<b>4</b>	<b>REQUISITOS CIENTÍFICOS</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>REQUISITOS DE PROCESSAMENTO</b> .....	<b>17</b>
5.1	PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA DE LANGMUIR PARA MEDIDA DE OSCILAÇÕES NA DENSIDADE - LPD (DENSITY LANGMUIR PROBE) .....	17
5.2	PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA DE LANGMUIR COM VARREDURA DE TENSÃO (LPT – TEMPERATURE LANGMUIR PROBE) .....	18
5.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA HFC.....	18
5.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA ETP .....	19
<b>6</b>	<b>REQUISITOS DE INSTRUMENTO</b> .....	<b>20</b>
6.1	SONDA DE LANGMUIR (LP).....	20
6.1.1	<i>Princípio de Funcionamento</i> .....	20
6.2	SONDA CAPACITIVA DE ALTA FREQUÊNCIA (HFC) .....	28
6.3	SONDA DE TEMPERATURA DE ELÉTRONS .....	33
<b>7</b>	<b>REQUISITOS DE VALIDAÇÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Curva característica I-V de uma Sonda de Langmuir (adaptada de Sinha, 2013) .....	21
Figura 2	- Esquema mecânico e eletrônico do Módulo A da sonda de Langmuir LPD. ....	24
Figura 3	- Módulo B da Sonda de Langmuir LPD .....	26
Figura 4	- Módulo M5 do experimento IONEX contendo os submódulos LPMB, HFMB e ICDH. ....	26
Figura 5	- Esquema do circuito eletrônico da Sonda de Langmuir LPT .....	27
Figura 6	- Varredura em tensão aplicada à Sonda de Langmuir LPT .....	28
Figura 7	- Perfis de densidade (subida e descida) medidos pela sonda HFC lançada em 1984. O ponto marcado em 112 km mostra a densidade medida por ionograma em Fortaleza. ....	30
Figura 8	- Perfis de densidade medidos pela HFC no lançamento de 1985 (Subida e descida). A trajetória do foguete também é mostrada à direita. ....	31
Figura 9	- Esquemas mecânico e eletrônico do Módulo A do experimento HFC .....	32
Figura 10	- Módulo B do experimento HFC (HFMB) .....	33
Figura 11	- Deslocamento da curva característica I-V quando sinais RF com amplitudes 400mV e 800mV são adicionados à voltagem de varredura de uma sonda de Langmuir. (Fonte: Oyama, 2013) .....	34
Figura 12	- Razão entre os deslocamentos no potencial flutuante em função da temperatura eletrônica $T_e$ , calculada para diferentes amplitudes do sinal de alta frequência (Fonte: Oyama, 2013). ....	36
Figura 13	- Princípio básico de funcionamento da ETP: sinal senoidal de amplitudes $2a$ , $a$ e zero é aplicado sequencialmente à sonda. A corrente coletada é filtrada e sua componente DC fornece o deslocamento no potencial flutuante (Fonte: Oyama, 2013). ....	37
Figura 14	- Esquemas mecânico e eletrônico da Sonda de Temperatura de Elétrons ETP. ....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Controle de Polarização e Processamento a bordo .....	25
----------	---	----



EM BRANCO



## 1 INTRODUÇÃO

O instrumento IONEX é composto por um conjunto de três sondas eletrostáticas: uma sonda Langmuir (LP-Langmuir Probe), uma sonda capacitiva de alta frequência (HFC – High Frequency Capacitive Probe) e uma sonda de temperatura de elétrons (ETP – Electron Temperature Probe). A sonda de Langmuir será operada para medir a densidade eletrônica e suas flutuações além de também permitir estimar a temperatura dos elétrons e sua distribuição de energia. A sonda capacitiva será operada para medir com precisão a densidade eletrônica ao longo da trajetória do satélite e seus resultados serão comparados e usados para normalização das medidas realizadas pela sonda LP. A sonda ETP fornecerá a temperatura dos elétrons.

Essas grandezas (densidade e temperatura do plasma ambiente), além de suas flutuações (variabilidade), serão importantes para o estudo da distribuição espacial e temporal de irregularidades da ionosfera equatorial conhecidas como bolhas de plasma e na caracterização de suas escalas e mecanismos de instabilidade associados.

### 1.1 ESCOPO DO DOCUMENTO

O presente documento, Requisitos Científicos para o Instrumento IONEX, descreve as atribuições do instrumento IONEX para 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 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 sul americano. 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 do Clima Espacial regional, estabelecendo uma simbiose com os objetivos do programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) do INPE.

### 2.2 OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS

Possivelmente, certos modos de ondas atmosféricas, excitadas em altitudes da baixa atmosfera, e que alcançam a base da camada-F da ionosfera equatorial, atuam como gatilho de mecanismos geradores de irregularidades na densidade do plasma, podendo evoluir, de acordo com as condições da velocidade de deriva vertical deste plasma, para depleções de densidade de larga escala, denominadas de bolhas ionosféricas, um processo eletrodinâmico característico da região ionosférica equatorial. Por intermédio da informação sobre as 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 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, exhibe variações longitudinais significativas, geralmente diagnosticadas como intensificações de ionização na camada-E ionosférica. Neste sentido, estudos científicos (*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 desempenhar um papel importante neste aumento da ionização. Além disso, 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 bem como 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 pela missão EQUARS são:

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



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

(c) determinar o percentual de ionização devido à precipitação de partículas na região da SAMA e a sua influência nos processos eletrodinâmicos presentes na ionosfera equatorial.

### 2.3 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 científica composta de 5 (cinco) instrumentos: analisador eletrostático; sensor de partículas de altas energias; conjunto de sondas ionosféricas; fotômetro de airglow e receptor de radio-ocultação GNSS.

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 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 a densidade de fluxo espectral dos elétrons entre 1 a 27 keV. O 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 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 da camada-F, proporcionando o mapeamento das fontes de energia exteriores (solar), responsáveis por contribuírem à geração de perturbações no plasma ionosférico da região equatorial. A quantidade física que o detector mede é a densidade de fluxo diferencial direcional das partículas. O APEX é constituído de 2 (dois) módulos físicos — um dos módulos é denominado de telescópio, 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.

Os mecanismos de instabilidades que originam as bolhas de plasma ionosféricas e os parâmetros ionosféricos a elas associados serão objeto de estudo do conjunto de sondas eletrostáticas (IONEX).

O instrumento IONEX é constituído por duas sondas de Langmuir, uma sonda Capacitiva de Alta Frequência e uma sonda de Temperatura Eletrônica. Basicamente, o conjunto das sondas é concebido para realizar medidas *in situ* de parâmetros intrínsecos (temperatura dos elétrons e densidade numérica de plasma) do plasma ambiente da camada-F, i.e., temperatura dos elétrons e densidade numérica do plasma, com o objetivo de caracterizar a natureza das irregularidades ionosféricas, determinando a ocorrência e a distribuição destes eventos em função do tempo local e das condições ambientais ionosféricas. O 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 da mesosfera superior) 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. Também, está configurado para realizar medidas da variabilidade do airglow para caracterização do espectro das ondas atmosféricas em altitude representativa do limite inferior da camada-E (região da mesosfera superior). GLOW consiste de um único módulo físico, que acondiciona o subsistema óptico e a eletrônica dedicada. Por sua vez, o subsistema óptico é constituído de quatro canais radiométricos para detecção das emissões de airglow noturno (*nightglow*) dos constituintes fotoquímicos presentes na alta atmosfera terrestre, sintonizados em quatro faixas de comprimentos de onda distintos. A análise da radiância integrada em  $4\pi$ , ou mais propriamente, a taxa de emissão de fótons 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. 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 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 radio-ocultação GNSS.

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 vapor de água troposférico. A técnica de radio-ocultação GNSS 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. O 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° 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, 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 IONEX NA MISSÃO EQUARS

#### 3.1 CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO IONEX PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS

Na região de baixas latitudes onde o campo geomagnético é majoritariamente horizontal, instabilidades de plasma são geradas por forças gravitacionais, campos elétricos e sistemas de correntes. Dentre os fenômenos observados estão o “Spread F” equatorial e as instabilidades da corrente de eletrojato. Bolhas de plasma são estruturas alinhadas ao campo geomagnético com densidades de plasma ordens de grandeza menores do que a densidade ambiental, estendendo-se por milhares de quilômetros entre pontos conjugados ao norte e ao sul do equador magnético. Elas ocorrem na região equatorial entre ~ 300km, onde são geradas, atingindo ~ 1500km de altitude ou mais no seu processo de ascensão vertical. Bolhas de plasma são observadas predominantemente após o pôr do sol até a meia-noite. A formação de bolhas de plasma é bastante comum sobre o território brasileiro, possivelmente devido aos efeitos da anomalia magnética. O plasma ionosférico equatorial é altamente instável a processos não lineares como o mecanismo de instabilidade de Rayleigh-Taylor, responsável pela geração de bolhas de plasma na base da camada F (Abdu 2016).

As condições físicas responsáveis pela grande variabilidade na frequência e na intensidade de ocorrência de bolhas de plasma ainda são objetos de estudos, uma vez que são extremamente significativos para a previsibilidade da ocorrência destes fenômenos. Medidas in situ de temperatura e densidade de plasma fornecerão importantes contribuições para o estudo detalhado dos processos eletrodinâmicos.

A principal contribuição do instrumento IONEX para os objetivos científicos da missão EQUARS é a medida da densidade eletrônica local e suas flutuações, além da temperatura eletrônica local, ao longo da trajetória do satélite. Com isso será possível detectar as depleções em densidade quando o satélite interceptar uma bolha de plasma. A estrutura da bolha bem como as microestruturas internas poderão ser estudadas, possivelmente através de análise espectral dos dados de flutuação de densidade. A sonda capacitiva de alta frequência (HFC) fornecerá os valores da densidade de elétrons com grande precisão, servindo como referência para outros sensores de diagnóstico do plasma ionosférico. A sonda de Langmuir para medida de densidade (LPD) medirá as variações rápidas (até 800Hz) na densidade do plasma numa escala relativa com grande resolução espacial, necessária para o estudo das irregularidades. Para o estudo da natureza das bolhas é essencial uma medida contínua e simultânea da densidade e da temperatura dos elétrons, pois estas duas medidas são interdependentes. A temperatura eletrônica será medida pela sonda ETP e pela sonda de Langmuir LPT.

As instabilidades de plasma responsáveis pela geração das irregularidades na densidade do plasma observados durante o dia e a noite serão estudadas. Várias teorias lineares e não lineares têm sido invocadas para explicar o largo espectro de irregularidades na densidade observadas durante a noite da região F, que pode se tornar instável sob a influência de distúrbios produzidos por ondas de gravidade, ventos neutros e campos elétricos, através do mecanismo da instabilidade de Rayleigh-Taylor (Muralikrishna 2007a e 2007b).



Além dos objetivos científicos específicos os parâmetros ionosféricos da região equatorial como a densidade e temperatura de elétrons serão medidos para fornecer uma ampla base de dados, complementado o conjunto de medidas realizadas pela rede brasileira de instrumentos baseados em solo (EMBRACE) de modo a melhorar os modelos ionosféricos existentes, bem como a capacidade preditiva dos efeitos ionosféricos nos sistemas de aplicação espacial.

As várias técnicas de medida por sondas eletrostáticas no espaço possuem problemas intrínsecos conhecidos que serão explorados pelo experimento IONEX comparando-se as medidas de densidade e temperatura feitas por mais de uma técnica.

### **3.2 RELAÇÃO DO INSTRUMENTO IONEX COM OUTRAS MISSÕES DE AERONOMIA**

Existe uma sinergia do experimento IONEX com a Missão SPORT (Scintillation Prediction Observations Research Task) que é uma missão conjunta da NASA com o INPE com o objetivo de estudar bolhas de plasma e cintilações ionosféricas. Nesta missão dois nanosatélites de 6U orbitarão a 350-400 km de altitude com inclinação de 52°. Uma sonda de Langmuir e uma sonda de Impedância estão previstas em cada nanosatélite desta missão.

A missão EQUARS terá órbita mais alta (ao redor de 650km) e inclinação menor (previsão de 15°) de maneira que os dados poderão ser comparados e complementarão informações para um entendimento mais completo dos fenômenos relacionados às irregularidades ionosféricas.



## 4 REQUISITOS CIENTÍFICOS

### 4.1 Posicionamento na estrutura

O experimento IONEX é composto de cinco módulos físicos:

Módulo M1 - HFMA – Módulo A da Sonda Capacitiva de Alta Frequência

Módulo M2 - LPDMA – módulo A da Sonda de Langmuir para medida de oscilações na densidade

Módulo M3 - LPT - módulo da Sonda de Langmuir para medida de Temperatura

Módulo M4 – ETP – Módulo da sonda de Temperatura de elétrons

Módulo M5 – contém os 3 submódulos: HFMB, LPDMB, e ICDH

Os quatro primeiros módulos contêm os sensores das quatro sondas que serão expostos ao plasma espacial. O quinto módulo é um módulo que contém circuitos eletrônicos associados.

Todas as quatro sondas do instrumento IONEX (LPD, LPT, HFC e ETP) devem ser montadas na face com direção de visada no vetor velocidade orbital, com visada livre. O módulo M5 pode ser montado no interior. Isto se deve ao fato da densidade de plasma ser menor no rastro do satélite, que deve ser evitado. Em especial, a sonda ETP tem geometria plana, tornando esse o apontamento ideal.

O posicionamento ideal para sondas eletrostáticas como as do IONEX deve levar em conta a bainha de plasma que se forma ao redor do satélite, que deve ser evitada. A espessura desta bainha é caracterizada pelo comprimento de Debye  $\lambda_D$  que, para densidades e temperaturas eletrônicas esperadas no plasma a 650km de altitude é:

$$\lambda_D (cm) = 7,43 \times 10^2 \sqrt{\frac{T (eV)}{n (cm^{-3})}}$$

Para  $T_e = (3000 - 1000) K = (0,26 - 0,086) eV$  (1 eV = 11.604,5 K) e  $n = (10^4 - 10^5) cm^{-3}$

O comprimento de Debye estará na faixa:  $\lambda_D = (0,7 - 3,7) cm$

As sondas esféricas LPD, LPT e HFC têm um pescoço de aproximadamente 2 cm, e o módulo que as sustenta é fixado de maneira que está 59 mm para fora do satélite. Uma distância maior entre a esfera e o satélite seria ideal, porém esta configuração foi escolhida por ser mais segura em relação à vibração. A sonda ETP terá seus dois eletrodos semiesféricos montados em um disco, que por sua vez é mantido a 3 cm do módulo que o sustenta através de 5 espaçadores. Desta maneira, os eletrodos da ETP deverão ser alojados a uma distância de 3 cm externo à plataforma do satélite.

### 4.2 Órbita



O principal objeto de estudo do experimento IONEX são as bolhas de plasma que são geradas na base da camada F ionosférica a aproximadamente 300 km de altitude. Estas estruturas são centradas no equador geomagnético e podem ser mapeadas ao longo das linhas de campo geomagnético em direção a latitudes mais elevadas nos dois hemisférios, onde a latitude máxima alcançada relaciona-se com a altura limite a qual podem ascender sobre o equador. A altitude estimada para o EQUARS de 650 km é apropriada para este estudo.

A latitude do equador geomagnético varia de aproximadamente 15° para o sul (na região da anomalia) e para o norte, de modo que a inclinação da órbita de 15° é apropriada para o experimento.

Foi sugerido pelo Dr. Abdu (comunicação pessoal) uma órbita com inclinação maior de 20° a 25° para abranger a região da anomalia equatorial.

### 4.3 Efeito do magnetotorque

O campo magnético de aproximadamente 512 Gauss gerado pelo magnetotorque para o controle de atitude do satélite afeta o funcionamento das sondas pois há um confinamento do plasma ambiente por esse campo gerado, que é muito maior do que o campo magnético espacial, ao redor de 0,2 Gauss.

Para elétrons com temperatura de 2000K (0,17 eV) o raio de giro ao redor da linha de campo gerado pelo magnetotorque será:

$$r_e(cm) = 2,38 \frac{T_e^{\frac{1}{2}}(eV)}{B(Gauss)} \sim 0,002cm = 20\mu m$$

Com isso será necessário operar o instrumento com magnetotorque desligado.

A possibilidade de uso de propulsor também está descartado, pois o material ejetado pelo mesmo afetará o plasma ambiente ao redor do satélite.

### 4.4 Resolução e Acurácia

**LPD** – A uma taxa de amostragem de 16/s, uma medida de densidade é feita em 62,5ms. Com uma velocidade orbital de 7,5km/s, a resolução espacial é de ~ **470m**

As oscilações medidas com amostragem de 1600/s, tem frequência máxima de **800Hz**

A corrente coletada varia de 1nA a 20mA, o que corresponde a densidades eletrônicas na faixa de **(10<sup>3</sup> – 5x10<sup>6</sup>)cm<sup>-3</sup>**.

A acurácia varia quase logaritmicamente com a faixa de medida. Em densidades baixas é de aproximadamente **10%** (~10<sup>2</sup> cm<sup>-3</sup>), enquanto em densidades maiores pode-se obter **2%** de acurácia.

**LPT** - Com uma varredura feita a cada 1,5s a medida de temperatura e densidade é feita com resolução espacial de **11,25km**.



- HFC** - A taxa de amostragem de 16/s – resolução espacial da medida de densidade ~ **470m**  
A acurácia na medida da frequência do oscilador é de aproximadamente 17Hz o que resulta numa acurácia de aproximadamente **10<sup>2</sup> cm<sup>-3</sup>**.
- ETP** - Uma medida de temperatura é feita a cada 0,8s – resolução espacial de **6km**  
A faixa de temperatura mensurável é de **10K a 2000K**, e o potencial flutuante pode ser medido entre **0 e 2V**. A acurácia é de **10K** na temperatura eletrônica e **50mV** no potencial flutuante (TBC).



## 5 REQUISITOS DE PROCESSAMENTO

### 5.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA DE LANGMUIR PARA MEDIDA DE OSCILAÇÕES NA DENSIDADE - LPD (DENSITY LANGMUIR PROBE)

A sonda de Langmuir utilizada para a medida de oscilações fornecerá como dados brutos as seguintes grandezas **(L0)**:

**LPD1** – Monitor de Ganho e Polarização da tensão aplicada a uma taxa de 16/s

**LPD2** – Componente DC da corrente coletada (em voltagem) a uma taxa de 16/s

**LPD3** – Componente AC da corrente coletada (em voltagem) a uma taxa de 1600/s

**LPD4** – Sinal integral da corrente coletada (em voltagem) a uma taxa de 16/s

A tensão aplicada na sonda poderá ser de -1 V, 0 V, +1 V ou +2 V. Esta tensão de operação será escolhida conforme a conveniência e definida por telecomando. Este telecomando também contém o comando para o processamento (ou não) dos dados LPD3 (componente AC) por FFT pelo computador de bordo.

Após o recebimento dos dados brutos, os sinais com baixa taxa de aquisição LPD2 e LPD4 são processados inicialmente com a aplicação dos ganhos (monitorados por LPD1) para a conversão da voltagem medida em corrente, e o georeferenciamento com informação da data e hora em que os dados foram medidos. **(L1-A)**

Estes sinais de corrente são convertidos em densidade eletrônica **(L2)** utilizando a expressão da corrente de saturação de elétrons (6.1.1):

$$I_{e0} = n_e e \left( \frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} A$$

onde a temperatura eletrônica é obtida pela medida feita pela sonda ETP ou pela sonda de Langmuir para medida de Temperatura (LPT). Esta densidade será comparada com a densidade medida pela sonda HFC. Estas variações mais lentas permitem detectar as bolhas de plasma e caracterizar sua estrutura.

As oscilações mais rápidas da densidade (proveniente da componente AC da corrente LPD3) serão analisadas em seu espectro em frequências através do algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), calculada pelo computador de bordo (OBC) ou em solo, para possível identificação das instabilidades e/ou ondas presentes no plasma ionosférico **(L4)**. A aplicação ou não da FFT a bordo será decidida por telecomando, dependendo da disponibilidade de uma estação de telemetria em solo. Se o satélite estiver dentro da visibilidade de uma estação de telemetria em solo, os dados brutos da LPD3 serão transmitidos integralmente (**modo R – Raw Data**). Caso contrário, para não sobrecarregar a memória do OBC, os sinais da LPD3 serão analisados pelo computador de bordo (**modo S – Spectra**), que realizará a FFT para 32 séries temporais de 256 pontos, gerando um espectro em frequências médio (média dos 32 espectros) de 128 pontos, que será transmitido no lugar dos dados brutos.



Vale salientar que com a transmissão integral do sinal LPD3 a taxa de dados do IONEX será de 14 208 bits/s , enquanto que no caso deste sinal ser processado a bordo com transmissão apenas do seu espectro FFT médio, a taxa do IONEX se reduzirá a 1608 bit/s.

## 5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA DE LANGMUIR COM VARREDURA DE TENSÃO (LPT – TEMPERATURE LANGMUIR PROBE)

A sonda de Langmuir operada com varredura de tensão entre -1 V e +2 V deverá fornecer através da curva característica  $I-V$ , a temperatura eletrônica, a distribuição de energias dos elétrons e a densidade eletrônica.

Os dados brutos fornecidos, cada um com uma taxa de amostragem de 16/s são **(L0)**:

LPT1 – Monitor da Varredura

LPT2 – Sinal da sonda de Langmuir Integral (ganhos 1 e 40 ajustados automaticamente)

LPT3 – Sinal da sonda de Langmuir compactada (amplificador logarítmico)

Em um primeiro processamento os sinais serão georeferenciados com a data e hora em que foram medidos.

Em seguida, os ganhos monitorados pela LPT1 serão aplicados ao sinal LPT2 para a construção da curva característica  $I-V$ . Similarmente os ganhos logarítmicos (calibrados em terra) sobre o sinal LPT3 serão aplicados para a obtenção da mesma curva  $I-V$  com maior amplificação. **(L1-A)**

Para o cálculo da temperatura eletrônica (em K) **(L2)**, a região de retardo da curva  $I-V$  será analisada e a temperatura calculada pela equação 6.1.3:

$$T_e = 11605 \frac{V_2 - V_1}{\ln(I_2) - \ln(I_1)}$$

Caso se verifique que a distribuição em energias não é Maxwelliana, ela poderá ser estudada analisando a região de retardo da curva  $I-V$  conforme descrito na seção 6.1.3. **(L4)**

A temperatura medida pela LPT será comparada com a temperatura medida pela sonda ETP.

## 5.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA HFC

A sonda HFC produzirá como dados brutos o número de pulsos contados durante um intervalo de tempo de aproximadamente 60ms (para uma taxa de amostragem de 16/s) **(L0)**.

Dividindo-se o número de pulsos pelo intervalo de tempo tem-se a frequência gerada pelo oscilador. Esta frequência  $f$  é medida com a sonda imersa no plasma ionosférico e periodicamente os elétrons são repelidos por uma voltagem de -100 V aplicada à sonda para que a frequência em vácuo  $f_0$  seja também medida. Esses dados devem também ser georreferenciados com a data e hora em

que foram medidos (**L1-A**). O número de pulsos e o modo de operação (com ou sem a aplicação de -100 V na sonda) estão contidos em uma palavra de 24 bits (20 bits para o número de pulsos e 4 bits para o modo de operação).

Estes dados de frequência serão convertidos em densidade eletrônica (**L2**) através da equação 6.2.1:

$$N = \frac{2f^2 \Delta f (C_S + C_0)}{81f_0 S C_0}$$

em que as grandezas  $C_S$  e  $S$  foram calibradas previamente e  $\Delta f = (f - f_0)$ .

Assim como a LPD, a HFC permite identificar quando uma bolha de plasma está sendo interceptada pelo satélite.

#### 5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS DA SONDA ETP

A sonda ETP fornece como dados brutos (**L0**):

ETP1 - os potenciais flutuantes deslocados  $V_{f2}$  e  $V_{f1}$  devido à aplicação do sinal senoidal a um dos eletrodos semicirculares com amplitudes  $2a = 1$  V (durante 0,4s) e  $a = 0,5$  V (durante 0,2 s), respectivamente, e o potencial flutuante não deslocado  $V_{f0}$ , quando o sinal senoidal não é aplicado durante 0,2s.

ETP2 - o potencial flutuante de referência  $V_{f0}$  do outro eletrodo semicircular.

No primeiro processamento estes dados são georeferenciados com data e horário em que foram medidos. (**L1**)

Para o cálculo da temperatura eletrônica (**L2**) utiliza-se a equação 6.3.11:

$$R = \frac{\Delta V_{f1}}{\Delta V_{f2}} = \frac{\ln [I_0(ea/kT_e)]}{\ln [I_0(2ea/kT_e)]}$$

Onde  $\Delta V_{f1} = V_{f1} - V_{f0}$  e  $\Delta V_{f2} = V_{f2} - V_{f0}$

A razão  $R$  em função de  $T_e$  para os valores de  $a$  e  $2a$  aplicados, podem ser plotados (como mostra a figura 6.3.2) fornecendo assim a temperatura eletrônica. Além de sua importância intrínseca, a temperatura eletrônica pode ser utilizada para estimar a densidade eletrônica.

## 6 REQUISITOS DE INSTRUMENTO

### 6.1 SONDA DE LANGMUIR (LP)

#### 6.1.1 Princípio de Funcionamento

Quando uma sonda metálica é imersa em plasma, uma corrente é coletada em função da voltagem a ela aplicada, e é possível determinar a densidade e a temperatura eletrônica a partir da curva característica I-V (corrente x tensão). A teoria de sondas de Langmuir (Langmuir, 1923 e 1924) é bastante complexa, mas pode ser simplificada quando algumas hipóteses são assumidas e diversos parâmetros podem ser determinados a partir das diferentes regiões da curva característica I-V esquematizada na figura 6.1.1.

Quando uma sonda é imersa em plasma **isoladamente**, diferentemente do que seria esperado, o potencial que ela adquire não é o mesmo potencial que o do plasma. Como a velocidade térmica dos elétrons ( $\sim 200\text{kms}^{-1}$  na ionosfera) é muito maior do que a dos íons ( $\sim 1-2\text{kms}^{-1}$ ), o fluxo de elétrons é maior e a sonda se carregará negativamente em relação ao plasma, atraindo íons e repelindo elétrons. Os íons atraídos ao sensor da sonda formam uma bainha positiva (“*sheath*”, camada não neutra ao redor da sonda) com espessura típica denominada comprimento de Debye  $\lambda_D = (kT_e/4\pi n_e e^2)^{1/2}$ . A bainha se forma de modo que a **corrente total seja zero**. Este potencial negativo em relação ao potencial do plasma que a sonda adquire se denomina **potencial flutuante**.

Quando o potencial aplicado à sonda é igual ao **potencial do plasma**, a espessura da bainha é zero, elétrons e íons se movem livremente, suas correntes sendo determinadas pelo movimento aleatório em direção à sonda. Para uma densidade e velocidade térmica eletrônica  $n_e$  e  $v_e$ , respectivamente, o fluxo de elétrons em direção a uma sonda esférica é dada pela teoria cinética dos gases como sendo  $j_0 = n_e v_e / 4$ . **Se a distribuição for Maxwelliana** a velocidade térmica é  $v_e = (8kT_e/\pi m_e)^{1/2}$ . Neste caso, para um sensor com área A, a corrente coletada no potencial de plasma será (Abe 2013 e Sinha 2013):

$$I_{e0} = n_e e \left( \frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} A \quad (6.1.1)$$

Para potenciais  $V_r$  aplicados à sonda, **negativos em relação ao potencial de plasma**, entra-se num **regime de retardo dos elétrons**. A corrente coletada terá duas componentes: uma corrente de íons e outra de elétrons que têm energia suficiente para superar a barreira do potencial aplicado. A corrente eletrônica neste regime de retardo decresce exponencialmente (para distribuição Maxwelliana) e é dado por:

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{-eV_r}{kT_e}\right) \quad (6.1.2)$$

Experimentalmente a corrente eletrônica é calculada subtraindo-se a corrente de íons da corrente coletada pela sonda, estimando a corrente iônica por extrapolação a partir da corrente de saturação dos íons como mostrado na Figura 1.

Na região de retardo dos elétrons a temperatura eletrônica pode ser medida pelo gradiente da curva I-V que é proporcional a  $1/T_e$  em um gráfico de  $\log(I_e)$ . Assim, para dois pontos da curva com tensão aplicada e corrente  $(V_1, I_1)$  e  $(V_2, I_2)$  a temperatura poderá ser determinada pela expressão:

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{V_2 - V_1}{\ln(I_2) - \ln(I_1)} \quad \text{ou em K} \quad T_e = 11605 \frac{V_2 - V_1}{\ln(I_2) - \ln(I_1)} \quad (6.1.3)$$

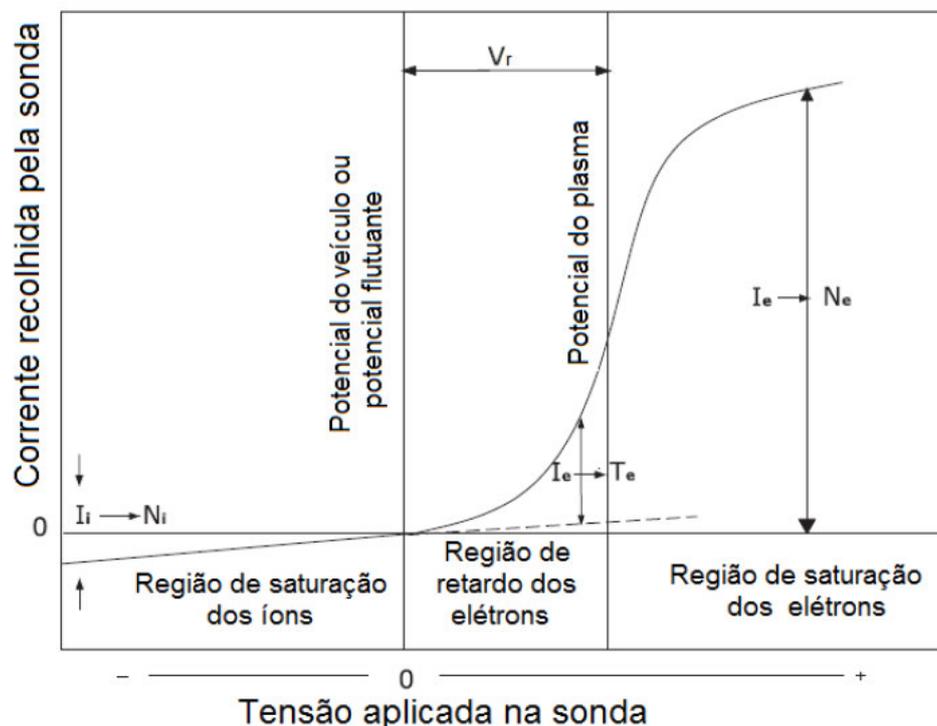


Figura 1 - Curva característica I-V de uma Sonda de Langmuir (adaptada de Sinha,2013)

Quando o potencial aplicado à sonda é positivo em relação ao potencial de plasma ( $V_p$ ), somente elétrons são coletados porque os íons são facilmente repelidos por esses potenciais. O potencial de plasma é um ponto de inflexão entre a região de retardo e a região de aceleração e saturação de elétrons. Estas duas regiões têm variações quase lineares em um gráfico de  $\log(I_e)$ .

Para potenciais mais positivos do que o potencial de plasma ou potenciais muito mais negativos do que o potencial flutuante, a curva I-V entra nas **regiões de saturação**, onde a corrente de uma das espécies predomina (elétrons ou íons). Nestas regiões a corrente é fortemente influenciada pela geometria da sonda, a espessura da bainha e a velocidade da sonda em relação ao plasma ambiente.



Para uma sonda plana, em potências  $V > V_p$ , a corrente eletrônica máxima é limitada pela corrente aleatória dos elétrons que cruzam a bainha a partir do plasma ambiente que é quasineutro. Portanto **a corrente de saturação de elétrons é igual à corrente devida ao movimento aleatório  $I_{e0}$ .**

Para sondas curvas (cilíndricas ou esféricas), a espessura da bainha determinará a magnitude da corrente coletada. Se a espessura da bainha é pequena comparada ao raio da sonda (*Thin Sheath*), ela se comporta como uma sonda plana e toda a corrente que entra na bainha é coletada. Quando a espessura da bainha é comparável ao raio da sonda (*Thick Sheath*), nem todas as partículas que cruzam a bainha são coletadas e a coleta depende do parâmetro de impacto que determina a órbita das partículas. A teoria que descreve a corrente para bainhas espessas é também chamada de teoria OML (*Orbital Motion Limited*). Como a espessura da bainha aumenta com a tensão aplicada, em sondas curvas há um aumento da área efetiva de coleta. Uma expressão aproximada para a corrente de saturação é (Chen 1965):

$$I_{js} = I_{j0} \left[ 1 + \frac{q_j(V - V_p)}{kT_j} \right]^\beta \quad (6.1.4)$$

onde  $\beta = 0, \frac{1}{2}$  ou  $1$  para sondas plana, cilíndrica e esférica respectivamente. Nota-se que a corrente aumenta linearmente com  $V$  para a sonda esférica.

### 6.1.2 Medida da Densidade do plasma

As regiões de saturação podem em princípio ser usadas para se medir a **densidade do plasma** (assumindo quaisneutralidade). Entretanto diversas **complicações** dificultam esta medida absoluta. A equação 6.1.4 é apenas válida para plasmas não colisionais, não magnetizados e sem levar em consideração a deriva da sonda em relação ao plasma devido ao movimento do satélite.

Com a presença de um **campo magnético**, as velocidades perpendicular e paralela ao campo são diferentes afetando a coleta da corrente conforme a orientação da superfície da sonda. Alguns estudos concluíram que há um limite superior para a corrente de saturação na presença do campo magnético, mas os cálculos supõem condições idealizadas nem sempre verdadeiras (Rubinstein, 1982).

O **movimento do satélite em relação ao plasma** afeta a corrente de saturação dos íons que têm velocidades em geral menores do que as do satélite. Com isso a velocidade do satélite é dominante no cálculo do fluxo de íons em direção à sonda. Além disso, uma região mais rarefeita se forma no lado da sonda oposto ao sentido da velocidade do satélite. Os elétrons, apesar de terem velocidades muito maiores do que a do satélite também são afetados, pois o lado rarefeito é preenchido por difusão ambipolar, muito mais lenta do que o movimento térmico dos elétrons (Hoegy 1973).

A presença de **colisões** torna a teoria de sondas muito complexa, e os cálculos devem ser feitos numericamente. Simulações mostraram que a aproximação de plasma não colisional é aceitável, com erros da ordem de 5%, para as condições ionosféricas em órbita baixa.

Devido a estas limitações uma das duas sondas de Langmuir (LPD) do experimento IONEX será utilizada para se determinar **as oscilações relativas na densidade eletrônica e não seu valor absoluto**. O valor absoluto da densidade será fornecido pela sonda capacitiva de alta frequência HFC.

### 6.1.3 Medida da Temperatura

A temperatura eletrônica numa sonda de Langmuir é determinada pela varredura em tensão na região de retardo dos elétrons. Esta determinação usando a equação 6.1.3 é válida se a distribuição de velocidades for **Maxwelliana**. É possível avaliar a validade desta hipótese verificando se a corrente eletrônica cresce exponencialmente na região de retardo.

M.J. Druyvesteyn (Druyvesteyn 1940) mostrou que há uma conexão entre a função de distribuição eletrônica  $F(E)$  e a segunda derivada da curva I-V. Para qualquer sonda de Langmuir com coletor convexo a função de distribuição eletrônica pode ser obtida por:

$$F(E) = \frac{2m_e}{Ae^2} \left( \frac{2eE}{m_e} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e}{dV^2} \quad (6.1.5)$$

onde  $F(E)$  é o número de elétrons com energia (em eV) entre  $(eE)$  e  $(eE + edE)$ ,  $E = (V_p - V)$  e  $A$  é a área da superfície coletora da sonda.

A partir da  $F(E)$  pode-se calcular a densidade, e a energia eletrônica média:

$$n_e = \int_0^{E_{max}} F(E) dE \quad (6.1.6)$$

$$\langle E \rangle = \frac{1}{n_e} \int_0^{E_{max}} EF(E) dE \quad (6.1.7)$$

A temperatura pode ser expressa a partir da energia média para qualquer distribuição segundo a relação:

$$T_{eff} = \frac{2}{3} \langle E \rangle = \frac{2}{3n_e} \int_0^{E_{max}} EF(E) dE \quad (6.1.8)$$

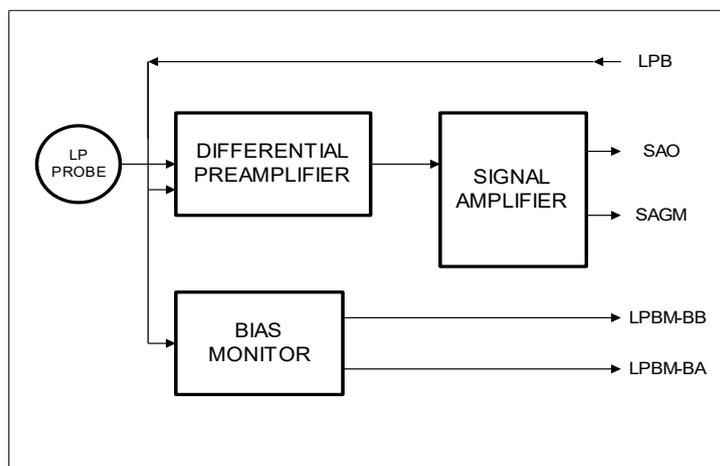
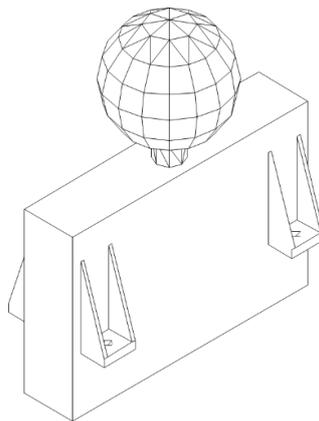
Esta teoria foi investigada numa sonda de Langmuir lançada em foguete pelo INPE em 1995 em Alcântara com apogeu de 557 km (Tese Francisco Meneses). As curvas I-V medidas são muito ruidosas para se conseguir uma segunda derivada. Elas foram ajustadas a diversas funções, e o melhor ajuste não se deu com uma Maxwelliana, mas com uma função Gaussiana. As temperaturas obtidas são em geral maiores do que as obtidas ajustando-se uma Maxwelliana à segunda derivada (Meneses 2011).

#### 6.1.4 Descrição da sonda de Langmuir para medida de oscilações na densidade LPD

O satélite EQUARS terá duas sondas de Langmuir. Uma delas operará com tensões fixas para a medida de oscilações na densidade do plasma (LPD), e outra será operada com varredura em tensão para a determinação da temperatura e/ou distribuição de energias através da curva I-V.

A sonda de Langmuir LPD é composta de dois módulos.

O **módulo A** esquematizado na Figura 2 contém o sensor esférico com diâmetro de 60 mm, feito em alumínio e recoberto com uma fina camada de ouro. O sensor é fixo, por um pescoço de aproximadamente 20mm, em uma caixa que abriga o circuito **pré-amplificador**. Um potencial de -1V, 0V, +1V, ou +2V é aplicado à sonda (pré-programado ou selecionado por telecomando), e a corrente coletada da ordem de nano amperes a micro amperes, é convertido em um sinal de tensão por um pré-amplificador com ganhos 1 ou 40 dependendo da corrente coletada (controle automático de ganho por análise comparativa).



LP - A MODULE

Figura 2 - Esquema mecânico e eletrônico do Módulo A da sonda de Langmuir LPD.

A saída do pré-amplificador é enviada ao **módulo B** (esquematizado na Figura 3), onde é dividido em três canais: um canal DC para medida das variações mais lentas, um canal AC para medida das oscilações na densidade do plasma, e um canal integral no qual nenhum filtro é aplicado. Os sinais DC e AC são amplificados, usando amplificadores de ganhos múltiplos (1, 5, 25 ou 125 conforme a necessidade) com controle automático.

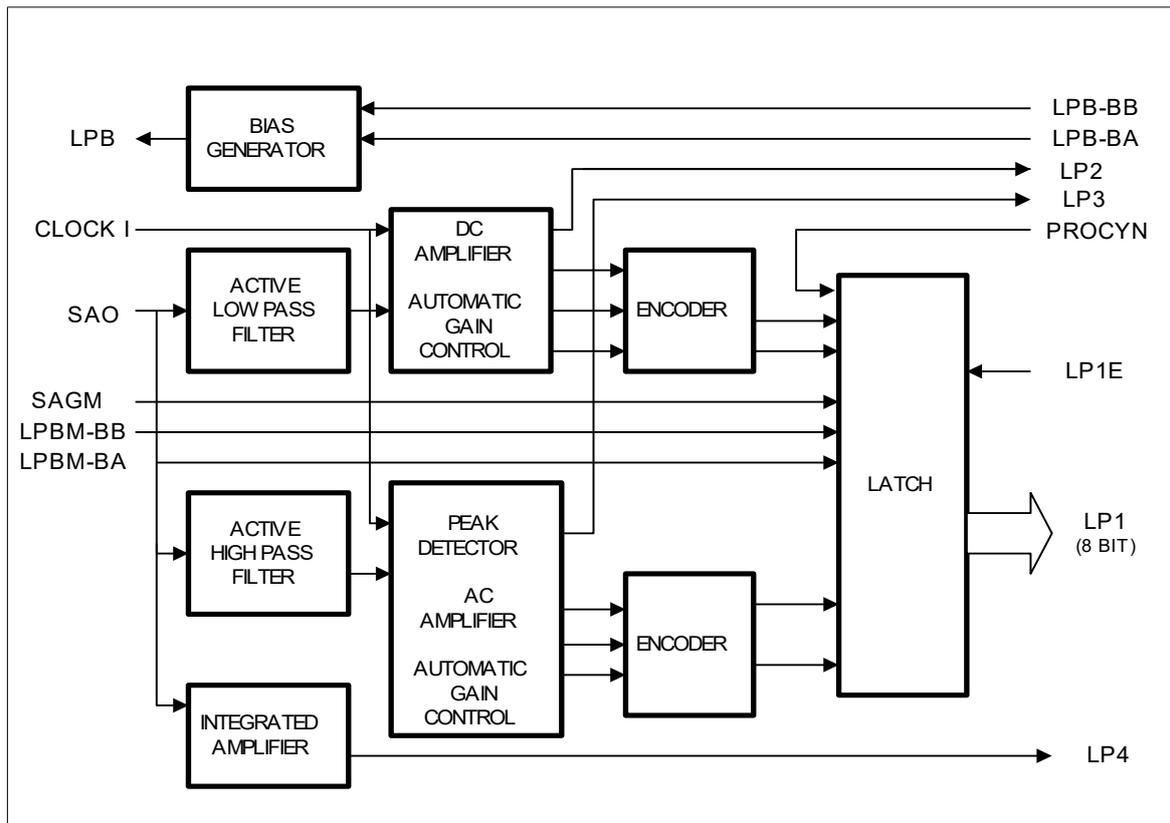
Todos os canais terão uma taxa de amostragem de 16/s, com exceção do canal AC que será amostrado a 1600/s para a medida das oscilações. Devido à alta taxa, este canal poderá ser processado pelo computador de bordo caso haja necessidade. No modo **R (Raw-data)** o sinal é integralmente transmitido pela telemetria. No modo **S (Spectra)**, um espectro em frequências médio será calculado e enviado no lugar do sinal integral. Para uma sequência de 256 pontos (256 bytes de dados) o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) fornece um espectro em frequências com 128 pontos. Será feita uma média de 32 espectros, ou seja, para cada 8192 pontos (32x256) um espectro médio com 128 pontos será gerado. Isto significa uma compressão de  $8192/128 = 64$ . Então, dos 12.800 bits/s gerados pelo canal AC apenas 200 bits/s serão enviados.

O potencial aplicado ao sensor, o ganho do pré-amplificador, os ganhos dos amplificadores DC e AC e o controle da análise FFT no canal AC é monitorado por uma palavra de 8 bits. (LP1). A polarização do sensor é controlada pelas palavras digitais LPB-BA e LPB-BB conforme a Tabela 1, bem como o monitor do processamento a bordo (PROCYN) do sinal AC por FFT.

Tabela 1 - Controle de Polarização e Processamento a bordo

LPB-BA	LPB-BB	Polarização	PROCYN	Processado a bordo
0	0	-1V	0	Não
0	1	0V		
1	0	+1V	1	Sim
1	1	+2V		

O módulo B da sonda LPD (LPMB) é um sub-módulo do módulo M5 do experimento IONEX, que contém também os módulos FHMB (módulo B da sonda capacitiva de alta frequência HFC) e o circuito de interface (ICDH). O módulo M5 é esquematizado na Figura 4.



LP - B MODULE

Figura 3 - Módulo B da Sonda de Langmuir LPD

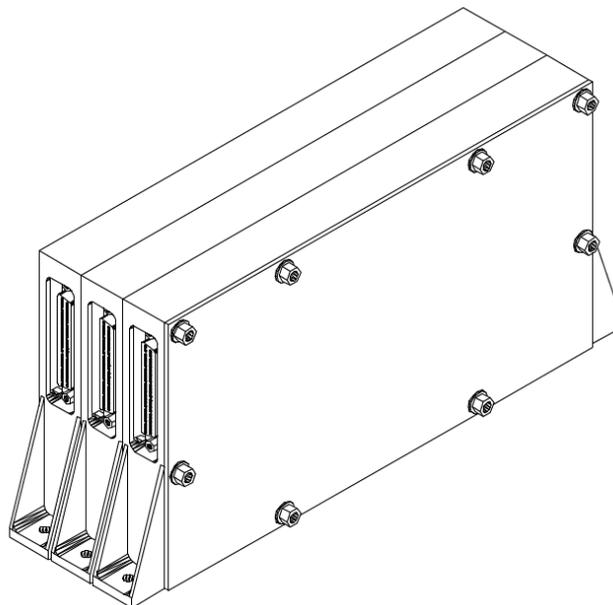


Figura 4 - Módulo M5 do experimento IONEX contendo os submódulos LPMB, HFMB e ICDH.

### 6.1.5 Descrição da sonda de Langmuir para medida de Temperatura eletrônica LPT

A sonda de Langmuir para medida de Temperatura eletrônica LPT é mecanicamente idêntica à sonda LPD. Seu circuito eletrônico (esquemático na Figura 5), no entanto é mais simples e com isso ela não possui um módulo B.

A Figura 5 mostra o esquema eletrônico. Uma varredura triangular de -1 V a + 2,5 V é aplicada à sonda em um período de 3s como mostra a Figura 6. A corrente coletada é convertida em voltagem por um pré-amplificador (com ganhos 1 e 40 com controle automático por análise comparativa). Este sinal é então amplificado novamente por um amplificador logarítmico.

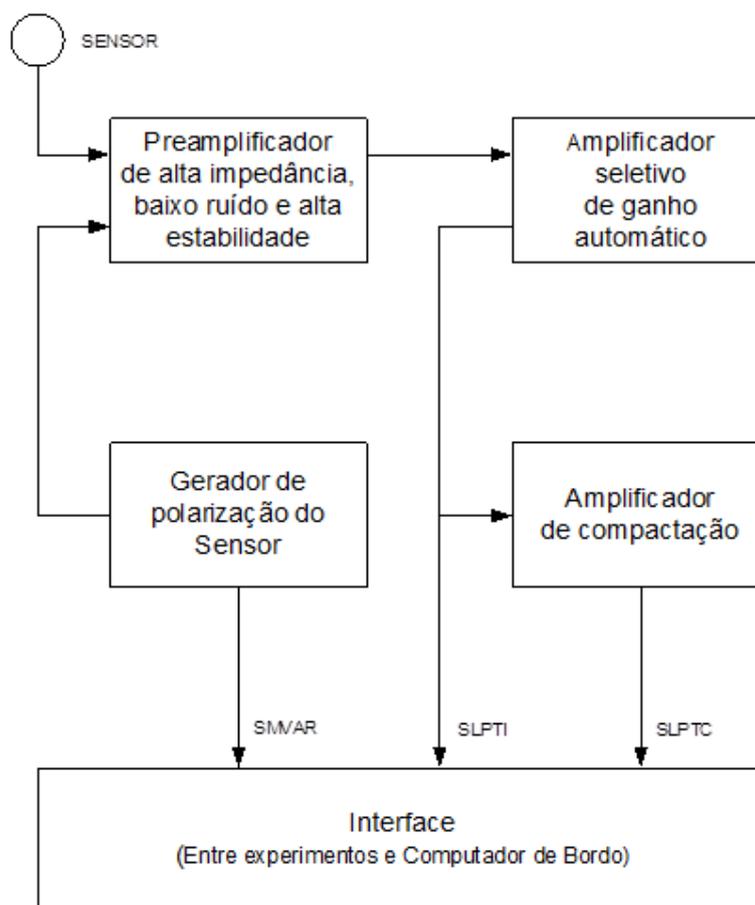


Figura 5 - Esquema do circuito eletrônico da Sonda de Langmuir LPT

Os sinais gerados pela LPT são:

SMVAR → Sinal monitor de varredura de polarização

SLPTI → Sinal Integral com ganho automático de 1 ou 40.

SLPTC → Sinal Compacto seguindo uma Função Logarítmica

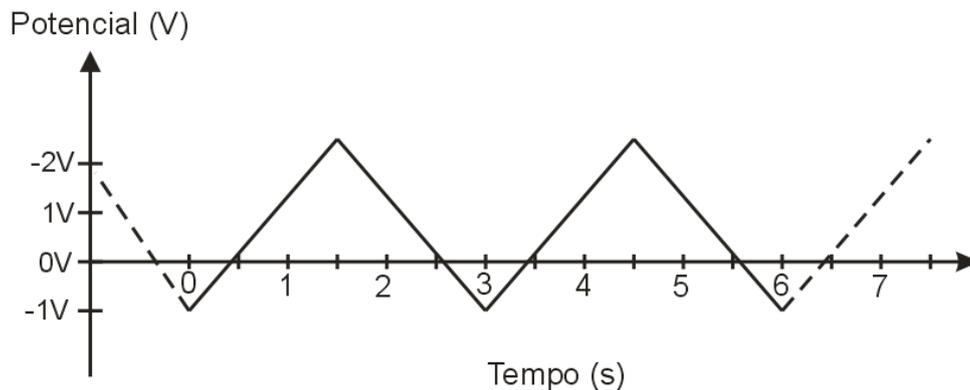


Figura 6 - Varredura em tensão aplicada à Sonda de Langmuir LPT

## 6.2 SONDA CAPACITIVA DE ALTA FREQUÊNCIA (HFC)

### 6.2.1 Princípio de Funcionamento

A sonda capacitiva de alta frequência obtém a densidade eletrônica do plasma a partir do desvio da sua impedância em relação ao seu valor em vácuo. Em frequências bem acima da frequência de plasma e das frequências ciclotrônicas, a impedância de uma sonda imersa em plasma é principalmente capacitiva.

A capacitância de uma esfera de raio  $R$  imerso em plasma é:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\int_{\infty}^R \frac{dr}{\epsilon r^2}} \quad (6.2.1)$$

onde  $\epsilon$  é a constante dielétrica do plasma. Em vácuo essa capacitância se reduz a  $C_0 = 4\pi\epsilon_0 R$

A variação relativa na capacitância causada pela presença do plasma pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} \cong -R \int_{\infty}^R \frac{(1 - \epsilon) dr}{r^2} \quad (6.2.2)$$

Se não houvesse bainha iônica  $\epsilon$  seria constante, e a variação fracional da capacitância seria  $(1 - \epsilon)$ , diretamente proporcional à concentração eletrônica. Entretanto, com a bainha iônica,  $\epsilon$  depende de  $r$  e deve permanecer no integrando. O tratamento teórico desta equação é muito complexo. Por isso experimentos foram feitos por Heikkila et.al (Heikkila 1968) para avaliar empiricamente o efeito da bainha na sonda capacitiva de alta frequência. Os resultados mostraram que o efeito da bainha é a redução da sensibilidade por um fator que depende fracamente dos parâmetros do plasma, e na prática é possível tratar  $\epsilon$  como uma constante com um fator de correção  $S$ , denominado fator de bainha que é da ordem de 0,5:

$$\frac{\Delta C}{C_0} \cong S (1 - \epsilon) \quad (6.2.3)$$

Pela teoria de Appleton-Hartree a constante dielétrica do plasma é simplificada quando se ignoram o movimento térmico, o campo geomagnético e as colisões. Nesse caso ela é dada por

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 \quad (6.2.4)$$

onde  $f_N = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\varepsilon_0 m}}$  é a frequência de plasma dos elétrons

f = frequência de operação                      N = densidade de elétrons

e, m = carga e massa do elétron               $\varepsilon_0$  = permitividade no vácuo

Em frequências de operação altas a constante dielétrica é um pouco abaixo de 1 e pode ser escrita como

$$\varepsilon = 1 - \frac{81N}{f^2} \quad \text{já que no sistema MKS} \quad \left(\frac{e^2}{4\pi^2 \varepsilon_0 m}\right) = 80,5 \quad (6.2.5)$$

A variação na capacitância pode então ser escrita como

$$\frac{\Delta C}{C_0} \cong S (1 - \varepsilon) = \frac{81SN}{f^2} \quad (6.2.6)$$

Como a frequência de operação é alta, a variação em capacitância é pequena e a técnica experimental tem de ser bastante sensível. A técnica de medida de variação de frequência oferece esta sensibilidade além de uma grande faixa de operação e simplicidade eletrônica.

Nesta técnica a capacitância da sonda é utilizada no circuito de um oscilador. Um aumento na frequência do oscilador é diretamente proporcional à concentração eletrônica. Na prática outras capacitâncias estão presentes, mas todas elas podem ser representadas como uma capacitância espúria  $C_s$  em paralelo com a sonda. Com uma indutância L a frequência de operação é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi [L(C_s + C_0 + \Delta C)]^{1/2}} \quad (6.2.7)$$

A variação em frequência em relação ao valor em vácuo  $f_0$  pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \cong \frac{SK(1 - \varepsilon)}{2} = \frac{81SKN}{2f^2} \quad \text{onde} \quad K = \frac{C_0}{(C_0 + C_s)} \quad (6.2.8)$$

A densidade é então dada por:

$$N = \frac{2f^2 \Delta f (C_s + C_0)}{81f_0 S C_0} \quad (6.2.1)$$

A frequência em vácuo  $f_0$  pode ser medida aplicando-se uma voltagem negativa suficientemente alta para repelir os elétrons, quando então a frequência volta ao seu valor em vácuo.

O coeficiente K é um fator que mede a qualidade do instrumento pois sem capacitâncias espúrias é igual a 1. Este fator é avaliado em uma calibração em laboratório, utilizando esferas de tamanhos diferentes.

A sonda capacitiva de alta frequência foi lançada pela primeira vez pelo INPE em foguete (Sonda III) a partir de Natal (Barreira do Inferno) em 26 de julho de 1984 às 15:05 h hora local com apogeu de 566 km (Abdu 1988) e em dezembro de 1985 em às 20:30 h hora local com apogeu de 530 km (Abdu 1991).

A Figura 7 mostra o perfil de densidade medido pelo lançamento de 1984. A densidade medida pela sonda tem boa concordância com a densidade medida através de ionograma localizado em Fortaleza (~ 300 km a oeste). A descontinuidade foi devida à frequência do oscilador (em modo dual de 5 MHz e 10 MHz) estar em ressonância com a frequência de plasma.

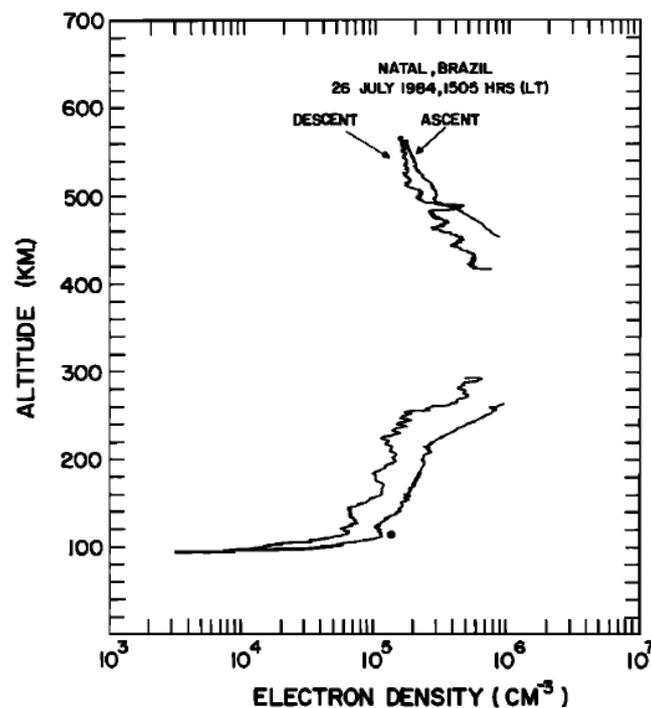


Figura 7 - Perfis de densidade (subida e descida) medidos pela sonda HFC lançada em 1984. O ponto marcado em 112 km mostra a densidade medida por ionograma em Fortaleza.

No lançamento de 1985 (vide Figura 8) a frequência utilizada foi corrigida (em modo dual de 6,17 MHz e 11,75 MHz, comparado à frequência de plasma no pico da camada F de 7,2 MHz). Neste lançamento noturno se detectaram bolhas de plasma (em ~ 370 km) confirmadas pela presença de spread F em Cachoeira Paulista e cintilações observadas em Natal.

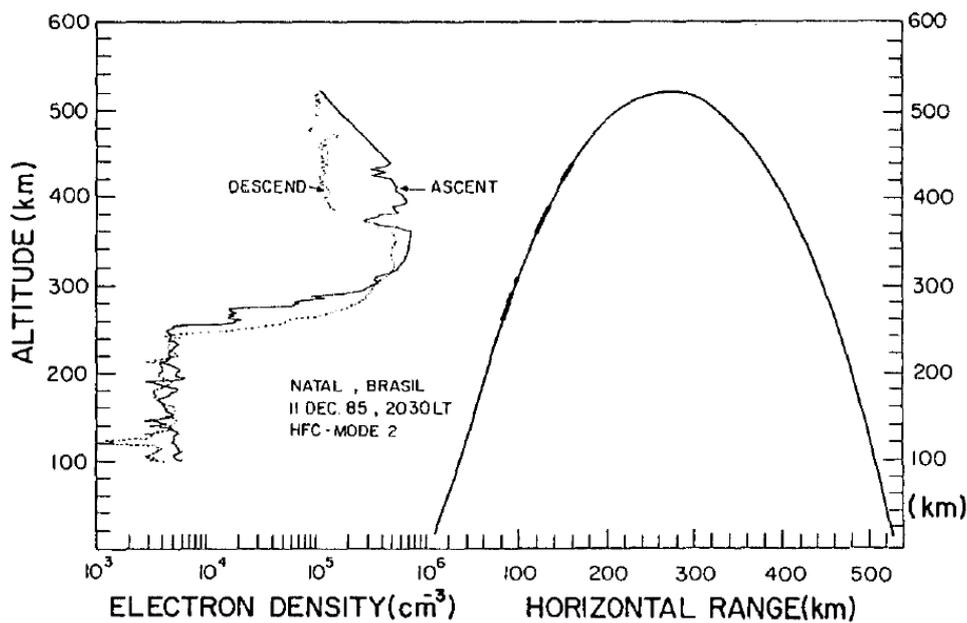


Figura 8 - Perfis de densidade medidos pela HFC no lançamento de 1985 (Subida e descida). A trajetória do foguete também é mostrada à direita.

### 6.2.2 Descrição da sonda HFC

Assim como a sonda de Langmuir LPD, a sonda capacitiva de alta frequência HFC (*High Frequency Capacitive Probe*) é composta por dois módulos.

O módulo A, esquematizado na Figura 9, abriga o sensor esférico imerso no plasma e o circuito oscilador. As dimensões mecânicas deste módulo são idênticas ao módulo A das sondas LPD e LPT. O sinal do oscilador é controlado para ser sempre menor do que 100 mV para não perturbar o plasma que envolve o sensor. A frequência projetada para a HFC é de 8 MHz. Um formatador de pulso transforma o sinal senoidal do oscilador em pulsos quadrados TTL de 5 V para contagem (FPS). Para obter a frequência do oscilador em vácuo ( $f_0$ ) pulsos de -100 V (PBS) são aplicados ao sensor durante 128 ms em intervalos regulares de alguns segundos.

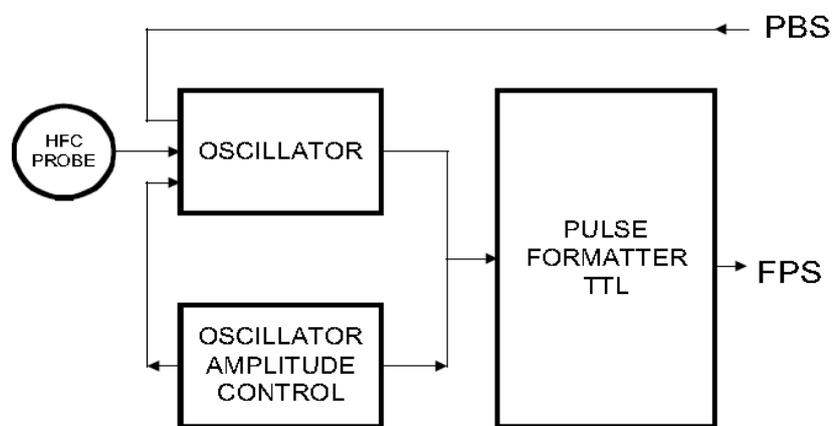
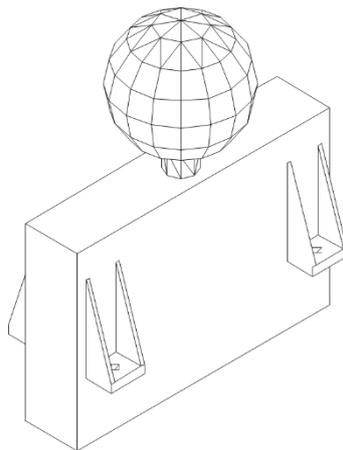


Figura 9 - Esquemas mecânico e eletrônico do Módulo A do experimento HFC

A saída do oscilador (FPS) é processada no módulo B (HFMB), esquematizada na figura 6.2.4. Um circuito contador conta o número de pulsos por um período de aproximadamente 60 ms (taxa de 16/s). O número contado terá até 20 bits, formatado como 3 bytes de 8 bits (o último byte terá apenas 4 bits significativos, sendo os outros 4 usados para o monitoramento HFC4) e será enviado ao circuito de interface (módulo ICDH) um byte por vez sequencialmente (HFC1, HFC2 e HFC3) pelos sinais de habilitação HFC1E, HFC3E e HFC3E. Um conversor DC/DC transforma 12 V em -100 V a ser aplicado na sonda durante 128 ms em intervalos regulares para medir a capacitância no vácuo (controlado pelo monitor de operação vindo da ICDH, HFC4).

O módulo B é um dos três submódulos do Módulo M5 do experimento IONEX esquematizado na Figura 10.

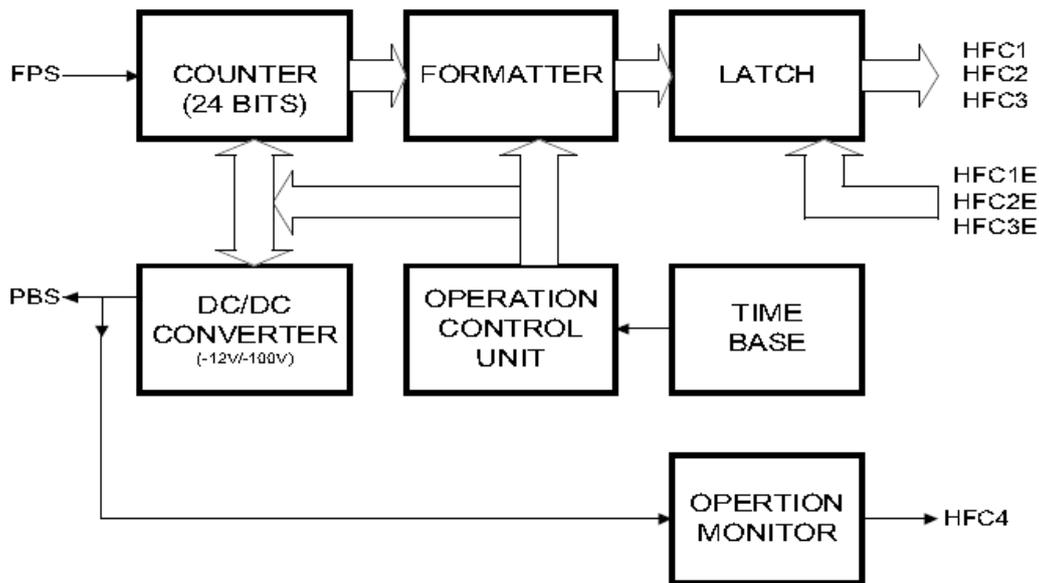


Figura 10 - Módulo B do experimento HFC (HFMB).

### 6.3 SONDA DE TEMPERATURA DE ELÉTRONS

#### 6.3.1 Princípio de funcionamento

A medida de temperatura eletrônica através de sondas de Langmuir sofre com o problema da contaminação da superfície gerando incerteza no valor das correntes medidas. A sonda de temperatura eletrônica, idealizada por Hirao e Miyazaki (1965) e aperfeiçoada por Hirao e Oyama (1970), fornece uma medida precisa de  $T_e$  mesmo com superfícies contaminadas.

A corrente  $I_p(V)$  coletada por uma sonda submetida a um potencial  $V$  em relação ao potencial do plasma é dada (para uma distribuição Maxwelliana de velocidades) por (Oyama 2013):

$$I_p(V) = I_{es} \exp\left(\frac{-eV}{kT_e}\right) - I_i \quad (6.3.1)$$

onde  $I_{es} = en_e S \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2}$  é a corrente de saturação dos elétrons

$n_e$  é a densidade eletrônica

$S$  é a área da superfície do eletrodo

$I_i$  é a corrente iônica

$k$  é a constante de Boltzmann

$e$  é a carga eletrônica

Quando a voltagem aplicada à sonda é igual ao potencial de plasma ( $V=0$ ) a corrente coletada será:

$$I_p(V) = I_{es} - I_i \quad (6.3.2)$$

Quando a corrente coletada é nula, a voltagem aplicada à sonda é chamada de potencial flutuante  $V_f$  que é dada por:

$$V_f = - \left( \frac{kT_e}{e} \right) \left[ \ln \left( \frac{I_i}{I_{es}} \right) \right] \quad (6.3.3)$$

Quando uma voltagem senoidal de alta frequência é superposta à voltagem DC de varredura da sonda, a curva característica I-V da sonda se desloca para potenciais mais negativos como mostra a Figura 11. Este fenômeno foi descoberto por Takayama (1960) e posteriormente estudado por muitos cientistas.

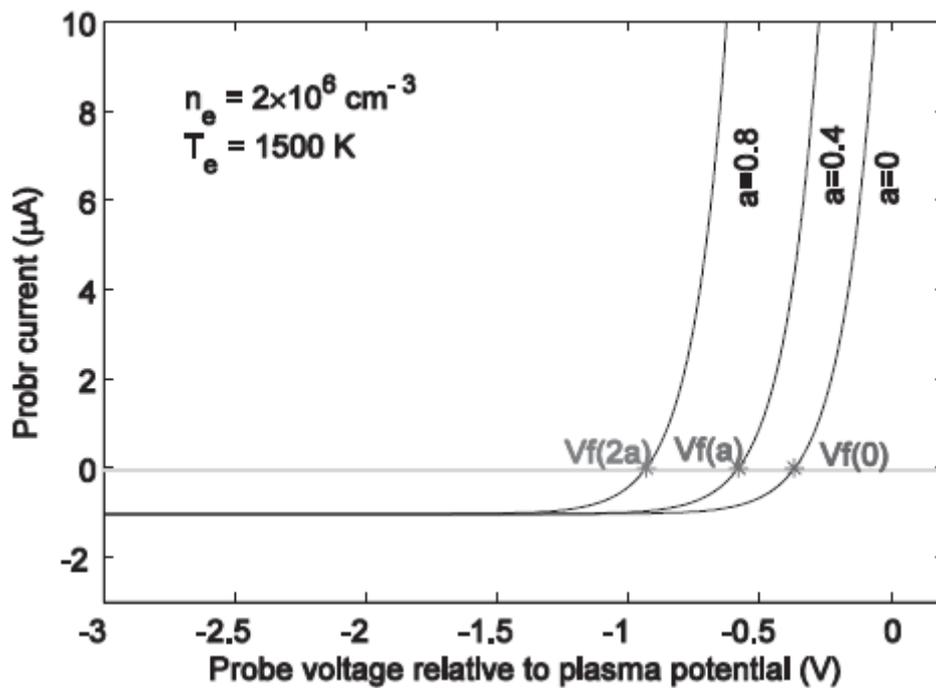


Figura 11 - Deslocamento da curva característica I-V quando sinais RF com amplitudes 400mV e 800mV são adicionados à voltagem de varredura de uma sonda de Langmuir. (Fonte: Oyama, 2013)

O deslocamento depende da amplitude do sinal de alta frequência  $a \cos(\omega t)$ . A corrente neste caso é expressa por:

$$\begin{aligned} I_p(V + a \sin \omega t) &= I_i + I_{es} \exp(-e(V + a \sin \omega t)/kT_e) \\ &= I_i + I_{es} \exp(-eV/kT_e) \exp(-e a \sin \omega t/kT_e) \end{aligned} \quad (6.3.4)$$

Note-se que os íons são muito massivos para responder à oscilação de alta frequência, e por isso a corrente iônica não é afetada.

Usando a expansão de Jacobi-Anger:

$$e^{izsen\theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) e^{in\theta} \quad (6.3.5)$$

e as funções de Bessel:  $J_0(iz) = I_0(z)$

$$J_{-n}(z) = (-1)^n J_n(z) \quad \text{onde}$$

$J_n(z)$  é a função de Bessel de primeira espécie de ordem  $n$

$I_0(z)$  é a função de Bessel Modificada de ordem zero tem-se

$$\exp\left(-\frac{easen\omega t}{kT_e}\right) = I_0\left(\frac{ea}{kT_e}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n\left(i\frac{ea}{kT_e}\right) (e^{i\omega t} + (-1)^n e^{-i\omega t}) \quad (6.3.6)$$

A corrente total tem uma componente DC e uma componente AC oscilante. Se filtrarmos a componente AC a corrente será dada por:

$$I_p = -I_i + I_{es} \exp(-eV/kT_e) I_0(ea/kT_e) \quad (6.3.7)$$

Portanto o potencial flutuante  $V_{fa}$  para o qual a corrente da sonda é zero (na componente DC) é dada por:

$$V_{fa} = -\left(\frac{kT_e}{e}\right) \ln \left[ \frac{I_i}{I_{es} I_0(ea/kT_e)} \right] \quad (6.3.8)$$

Em geral são aplicados sinais de alta frequência com duas amplitudes sucessivas,  $a$  e  $2a$ . Os deslocamentos no potencial flutuante para estas duas amplitudes são:

$$\Delta V_{f1} = V_{fa} - V_f = -\left(\frac{kT_e}{e}\right) \ln [I_0(ea/kT_e)] \quad (6.3.9)$$

$$\Delta V_{f2} = V_{f2a} - V_f = -\left(\frac{kT_e}{e}\right) \ln [I_0(2ea/kT_e)] \quad (6.3.10)$$

Os deslocamentos medidos no potencial flutuante para estas duas amplitudes podem ser amplificados pelo mesmo ganho e divididos, e a temperatura eletrônica pode ser calculada pela razão entre elas (eliminando a informação sobre o ganho do amplificador):

$$R = \frac{\Delta V_{f1}}{\Delta V_{f2}} = \frac{\ln [I_0(ea/kT_e)]}{\ln [I_0(2ea/kT_e)]} \quad (6.3.11)$$

A Figura 12 mostra um gráfico da razão  $R$  em função da temperatura eletrônica para diversos valores da amplitude  $a$ .

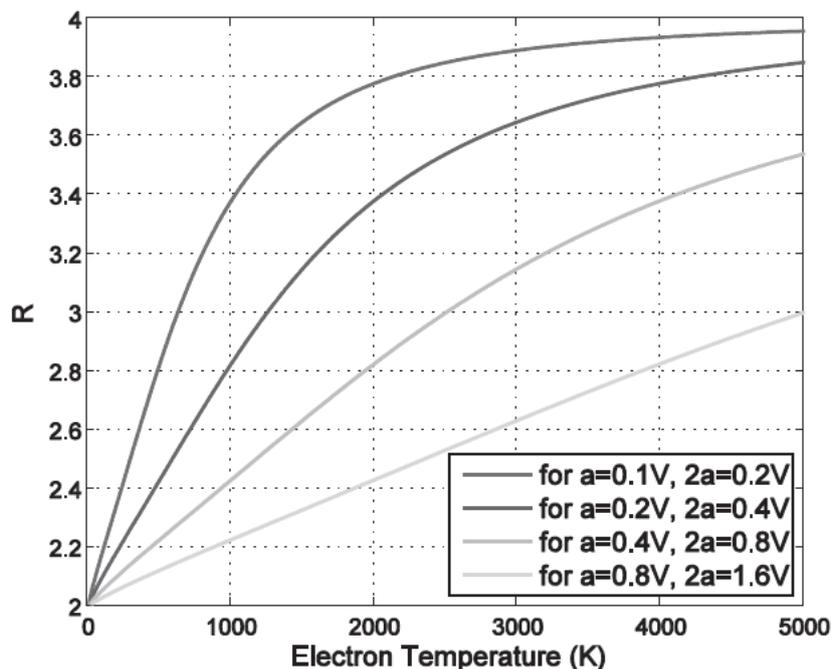


Figura 12 - Razão entre os deslocamentos no potencial flutuante em função da temperatura eletrônica  $T_e$ , calculada para diferentes amplitudes do sinal de alta frequência (Fonte: Oyama, 2013).

Experimentalmente o funcionamento da ETP está esquematizado na Figura 13. Dois sensores idênticos são imersos no plasma. Um oscilador produz um sinal senoidal com amplitudes  $2a$ ,  $a$  e  $0$  que são aplicados a um dos sensores em sequência, enquanto o outro é mantido no potencial flutuante do satélite. A corrente coletada pela sonda oscila com componentes DC e AC. A combinação de  $R$ ,  $C2$  e  $R2$  funciona como um filtro passa-baixo de modo que a componente DC após a filtragem fornecerá a variação do potencial flutuante.

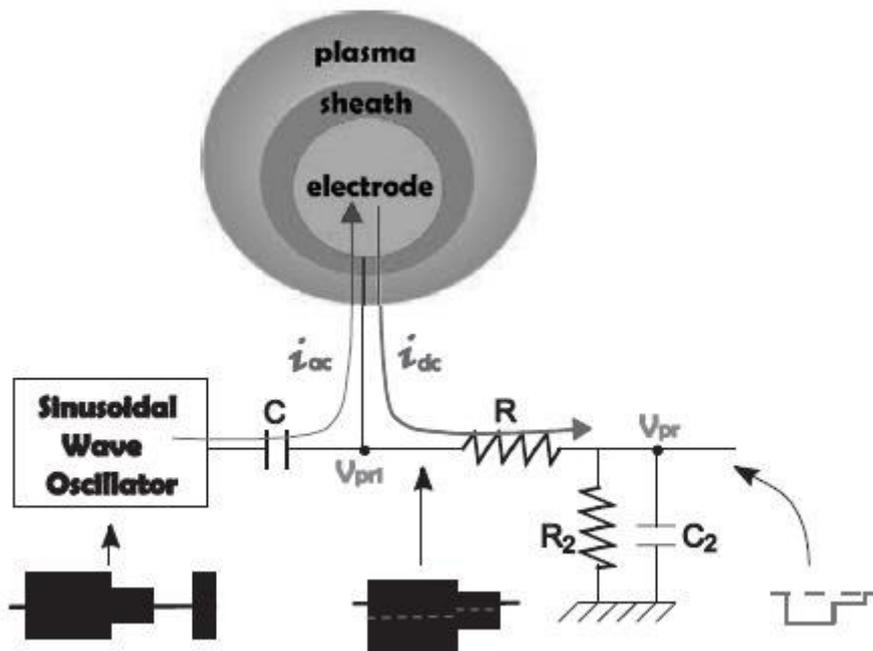


Figura 13 - Princípio básico de funcionamento da ETP: sinal senoidal de amplitudes  $2a$ ,  $a$  e zero é aplicado sequencialmente à sonda. A corrente coletada é filtrada e sua componente DC fornece o deslocamento no potencial flutuante (Fonte: Oyama, 2013).

### 6.3.2 Descrição da sonda ETP

A sonda ETP possui dois sensores na forma de semicírculo feitos a partir de um disco de circuito impresso de 100 mm de diâmetro no qual a parte metálica foi removida em um dos diâmetros.

Um sinal de RF de 30 kHz é gerado e aplicado a somente um dos sensores (o outro é mantido no potencial flutuante do satélite) com amplitudes 2 V (amplitude  $2a$ ) durante 400ms, amplitude 1 V (amplitude  $a$ ) durante os próximos 200 ms e 0 V nos 200 ms seguintes.

A corrente coletada pelo sensor ativado é convertida em sinal de voltagem por um amplificador diferencial e a componente AC é filtrada. A frequência de 30 kHz foi escolhida por ser menor do que a frequência de plasma dos elétrons (1-3 MHz) e maior do que a frequência de plasma dos íons (2-3 kHz para densidades  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ).

A Figura 14 mostra os esquemas mecânico e eletrônico da sonda ETP.

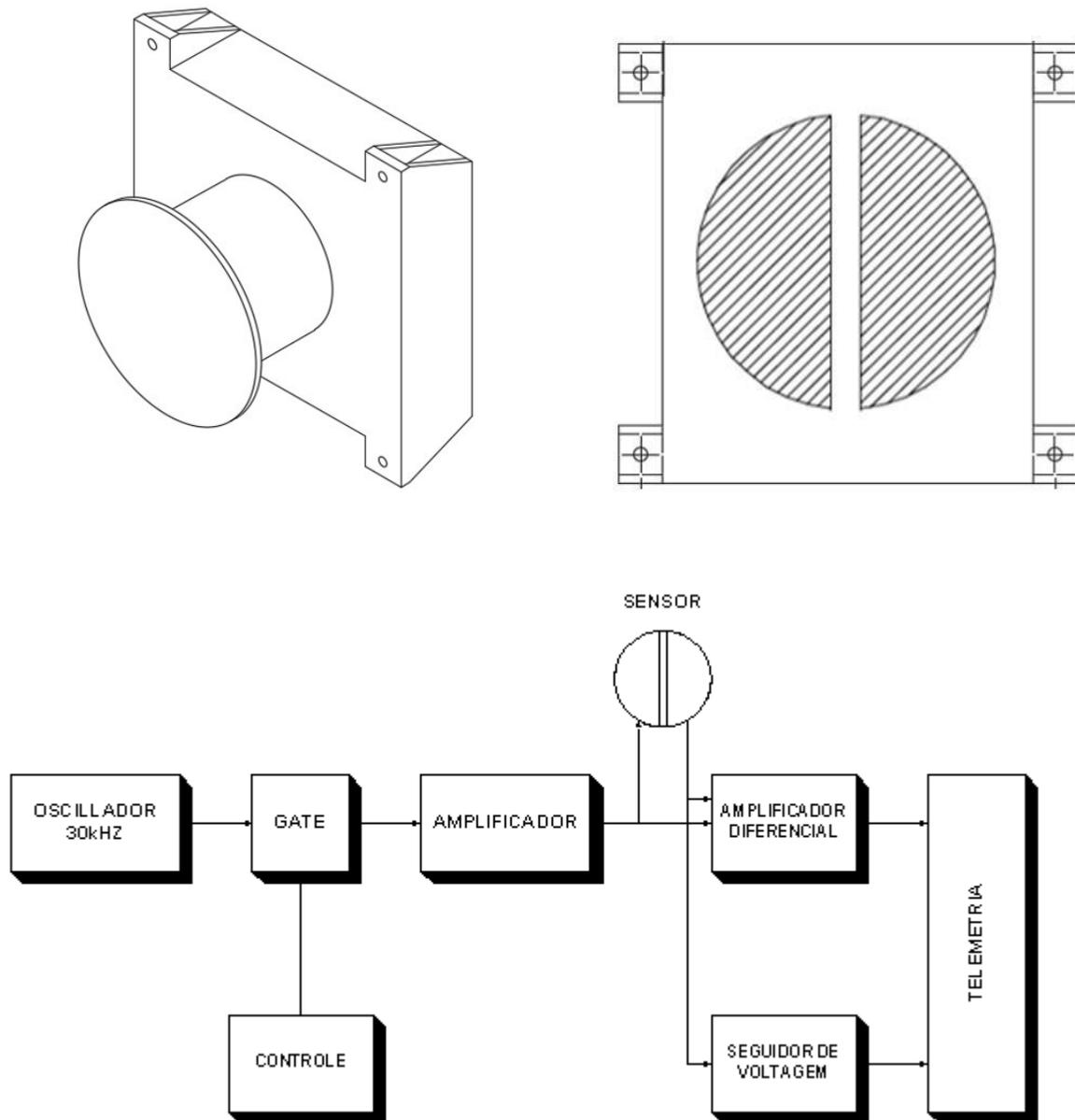


Figura 14 - Esquemas mecânico e eletrônico da Sonda de Temperatura de Elétrons ETP.

A sonda ETP foi embarcada nos satélites SACI-I e SACI-II (Takahashi 2000 e Muralikrishna 2000).



## 7 REQUISITOS DE VALIDAÇÃO



## 8 REFERÊNCIAS

Abdu M. A., Muralikrishna P., Batista I. S., "On the Rocket-Induced Wave Disturbances in the Daytime Equatorial Ionosphere", *J. Geophys. Res.* 93(A4), 2758-2760, 1988

Abdu M. A., Muralikrishna P., Batista I. S., Sobral J. H. A., "Rocket Observation of Equatorial Plasma Bubbles over Natal, Brazil, using a High Frequency Capacitance probe", *J. Geophys. Res.* 96(A5), 7689-7695, 1991

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

Abe, T., Oyama, K., "Langmuir Probe", *An Introduction to Space Instrumentation*, edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 1-13, 2013

Chen F. F., "Electric probes," in *Plasma Diagnostic Techniques*, R. Huddleston and S. Leonard, Eds. New York: Academic Press, 1965, pp. 113-200.

Druyvesteyn M. J., Penning F. M., "The mechanism of electrical discharges in gases of low pressure", *Reviews of Modern Physics* 12(2), p.87, 1940

Heikkila, W. J., N. Eaker, J. A. Fejer, K.R. Tipple, J. Hugill, D. E. Schneible, and W. Calvert, Comparison of several techniques for ionospheric electron concentration measurements, *J. Geophys. Res.*, 73, 3511, 1968

Hirao, K. and S. Miyazaki, "Rocket-borne ionospheric direct-sounding instruments", *J. Radio Res. Labs.*, 12, 357-380, 1965.

Hirao, K. and K.-I. Oyama, "An improved type of electron temperature probe", *J. Geomag. Geoelectr.*, 22, 393-402, 1970.

Hoegy W. R. and Wharton L. E., "Current to a moving cylindrical electrostatic probe," *J. of Applied Physics*, vol. 44, no. 12, p. 5365, 1973.

Langmuir, I. and H. Mott-Smith, Jr, *Studies of electric discharges in gas at low pressures*," *General Electric Review*, p. 616, 1924.

Langmuir, I., Positive ion currents from the positive column of Mercury arcs, *Science*, 58, 290-291, 1923.

Meneses F. C., "Um Estudo sobre a Temperatura Eletrônica e Perfis de Aeroluminescência na Ionosfera Equatorial a partir de medidas de Foguete", tese de doutorado INPE 2011



Muralikrishna P., Abdu M. A., Sobral J. H.A. and Oyama K-I, "Plasma Diagnostic Experiments on board of the Brazilian Scientific Microsatellite SACI-1", *Geofisica Internacional* 39, 127-133, 2000

Muralikrishna P. and Vieira L. P., "Equatorial F-Region Irregularities Generated by the Rayleigh-Taylor Instability Mechanism – Rocket Observations from Brazil", *Rev. Bras. de Geofisica* 25 (2), 135-149, 2007a

Muralikrishna P., Vieira L. P. and Abdu M. A., "Spectral Features of E and F Region Plasma Irregularities as observed by Rocket Borne Electron Density Probes from Brazil", *Rev. Bras. De Geofisica* 25(2), 115-128, 2007b

Oyama K.-I., Cheng C. Z., "Electron Temperature Probe", *An Introduction to Space Instrumentation*, edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 91-105, 2013

Rubinstein J. and Laframboise J. G., "Theory of a spherical probe in a collisionless magnetoplasma," *Physics of Fluids*, vol. 25, p. 1174, 1982.

Sinha, H. S. S., Rocket-borne Langmuir probe for plasma density irregularities, *An Introduction to Space Instrumentation*, edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 77-90, 2013

Takahashi H., Neri J. A., Abdu, Muralikrishna P., Jayanthi U.B., Trivedi N. B., Sobral J. H. A., Okano S., Shepherd G., Sargoytchev S., Oyama K-I and Russel C. T., "Global Scale Earth's Upper Atmosphere Monitoring by SACI-1 Micro-Satellite", *Av. Space Res.* 26, 929-937, 2000





<b>LISTA DE ITENS TO BE DEFINED</b>			
<b>ID</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>STATUS</b>	<b>PREVISÃO DE CONCLUSÃO</b>
TBD-1	Efeito do magnetotorque no funcionamento das sondas		
	Figura 5 – esquema elétrico LPT deve ser atualizado		
<b>LISTA DE ITENS TO BE CONFIRMED</b>			
<b>ID</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>STATUS</b>	<b>PREVISÃO DE CONCLUSÃO</b>
TBC-1	Figura 14 Esquema elétrico ETP deve ser atualizado		