

UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2001



***"Aplicação de um Feixe de
Lítio Otimizado de 2 – 5keV no
Diagnóstico de Plasma de
Baixa Temperatura"***

WALDEIR AMARAL VILELA

138

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

Waldeir Amaral Vilela

APLICAÇÃO DE UM FEIXE DE LÍTIO OTIMIZADO DE 2 - 5 keV NO DIAGNÓSTICO DE PLASMA DE BAIXA TEMPERATURA

Dissertação apresentada ao programa de
pós-graduação da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de
Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre
em Física (Área de concentração: Física de
Plasma).

Orientadora : Prof^a Dr^a. Emília A. Aramaki

Co-orientador : Prof. Dr. Mário Ueda

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ

BIBLIOTECA

451

Guaratinguetá
2001

451

24/8/01
Doação autor
R\$20,00

APLICAÇÃO DE UM FEIXE DE LÍTIO
OTIMIZADO DE 2 - 5 keV NO
DIAGNÓSTICO DE PLASMA DE BAIXA
TEMPERATURA

Ficha catalográfica preparada na Seção de Aquisição e Tratamento da Informação da
Biblioteca FEG/UNESP

Vilela, Waldeir Amaral

V690a Aplicação de Um Feixe de Lítio Otimizado de 2-5keV no
Diagnóstico de Plasma de Baixa Temperatura/Waldeir Amaral
Vilela. Guaratinguetá, 2001.
142f.: il.; 30cm

Bibliografia: f. 139-142

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2001

Orientador: Profa. Dra. Emília Akemi Aramaki

1. Plasma de Baixa Temperatura I. Título

CDU 533.9...15

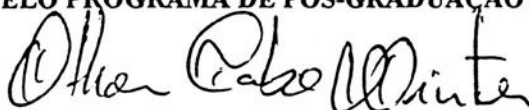
**“APLICAÇÃO DE UM FEIXE DE LÍCIO OTIMIZADO DE 2 – 5keV NO
DIAGNÓSTICO DE PLASMA DE BAIXA TEMPERATURA”**

WALDEIR AMARAL VILELA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM FÍSICA”**

ESPECIALIDADE: FÍSICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

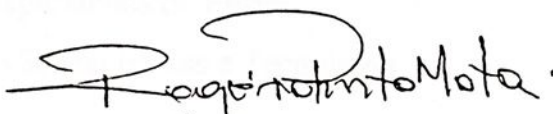


Prof. Dr. Othon Cabo Winter
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. EMÍLIA AKEMI ARAMAKI
Orientadora / Unesp-Feg



Prof. Dr. ROGÉRIO PINTO MOTA
Unesp-Feg



Prof. Dr. HOMERO SANTIAGO MACIEL
ITA

Março de 2001

Dados Curriculares

Waldeir Amaral Vilela

Nascimento: 02.02.62 - Aiuruoca- MG

Filiação: Itamar Mendes Vilela
Dalva Maria Amaral Vilela

1985/1990 Curso de Graduação
Curso de Engenharia Elétrica / Eletrônica
Duração do curso: 6 anos
Fundação Valeparaibana de Ensino
Faculdade de Ciência Exatas e Tecnologia

Agradecimentos

A prof^a. Dr^a. Emilia A. Aramaki, por ter aceito a orientação desta tese e o empenho e dedicação para o sucesso deste trabalho.

Ao prof. Dr. Mário Ueda pela oportunidade da realização deste trabalho e a orientação precisa em todos momentos. Pela amizade, confiança depositada e por minha formação profissional.

Ao Chefe do LAP/INPE Dr. Edson Del Bosco, pelo apoio recebido e pelo uso das instalações do laboratório.

Aos professores e amigos do Departamento de Física da FEG, pela acolhida e contribuição na realização deste trabalho.

Ao Ms. Eng. Júlio Guimarães pelo apoio e incentivo que sempre me dispensou.

Ao Dr. A. F. Beloto, pela colaboração na confecção das fontes com β -eucryptita vítreo.

Ao Dr. L. A. Berni e Dr. G. F. Gomes, pela amizade e inúmeras sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Maurício Baldan, que com suas palavras de incentivo muito contribuíram para que eu prosseguisse na carreira científica.

Aos técnicos em mecânica: Júlio C. Peixoto; Alberto B. Silva; e Marco Antônio, pela ajuda e sugestões na árdua tarefa de confeccionar as peças mecânicas.

Agradecimento especial ao amigo Alessandro Oliveira pelo apoio e amizade.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

Sumário

Lista de Figuras	10
Resumo	14
Introdução	15
Capítulo 1 - Introdução	18

1.1 - Introdução e organização do trabalho	20
--	----

Capítulo 2 - Erros por descarte de dados e o princípio da ignorância por falta de dados	25
--	----

2.1 - Descarte de dados - Alguns	26
----------------------------------	----

2.2 - Modelo de medida de frequência de dados por falta de dados	28
---	----

Capítulo 3 - Erros de amostragem de dados - 1	“Os erros causados por dados inadequados são muito menores do que aqueles que se devem à total ausência de dados”
---	--

3.1 - Erros de amostragem de dados	29
------------------------------------	----

3.2 - Erros de amostragem de dados	30
------------------------------------	----

Capítulo 4 - Erros de amostragem de dados - 2	31
---	----

4.1 - Erros de amostragem de dados	32
------------------------------------	----

4.2 - Erros de amostragem de dados	33
------------------------------------	----

Charles Babbage

1792-1871

Matemático Inglês

Sumário

Lista de Figuras	10
Resumo.....	14
Abstract.....	16
Capítulo 1 - Introdução.....	18
1.1 - Motivação e organização do trabalho.....	23
Capítulo 2 - Plasma por descarga glow e o princípio de diagnóstico por feixe de lítio.....	26
2.1- Descarga elétrica - Plasma.....	26
2.2 - Método da medida de densidade do plasma por feixe de lítio.....	29
Capítulo 3 - Obtenção de ions de lítio - Li^+	33
3.1 Fontes com β -eucryptita pastoso.....	35
3.2 Fontes com β -eucryptita vítrea	36
Capítulo 4 - Equipamentos utilizados e arranjo experimental.....	39
4.1 - Arranjo experimental para diagnóstico de plasma com feixe de lítio neutro.....	40

4.2 - Sistema de vácuo.....	42
4.3 - Descrição da fonte emissora de Li^+	45
4.4 - Canhão de ions.....	50
4.5 - Neutralizador	54
4.6 - Instrumentação utilizada.....	56
4.6.1 - Voltímetros e amperímetros.....	56
4.6.2 - Medidores de pressão.....	58
4.6.3 - Sensores de temperatura.....	58
4.6.4 - Eletrômetro.....	60
2.6.5 - Espectrômetro.....	60
4.7 - Sistema IHP.....	63
Capítulo 5 - Otimização do feixe iônico.....	65
5.1 - Efeito da tensão de aceleração sobre o feixe.....	68
5.2 - Efeito da tensão de polarização da lente-1 sobre o feixe.....	69
5.3 - Efeito da tensão de polarização da lente-2 sobre o feixe.....	70
5.4 - Influência da temperatura do cadinho na intensidade da corrente do feixe.....	72
5.5 - Medidas do diâmetro do feixe.....	75
5.6 - Determinação das condições ótimas de operação da SFLNR para fonte com β -eucryptita pastosa.....	78
5.7 - Determinação das condições ótimas de operação da SFLNR para fonte com β -eucryptita vítrea	84
Capítulo 6 - Neutralização	89
6.1 - Processo de neutralização	90
6.2 - Operação do neutralizador.....	93
6.3 - Medida da eficiência de neutralização.....	94

Capítulo 7 - Injeção do feixe de lítio em gás neutro..... 111

**7.1 - Teste de injeção do feixe de lítio no gás
em uma câmara protótipo 111**

7.2 - Acoplamento da SFLNR ao sistema IIIP..... 122

**Capítulo 8 - Aplicação do feixe de lítio no plasma
do sistema IIIP 127**

8.1 - Aplicação do feixe no plasma..... 129

**8.2 - Resultados obtidos utilizando a SFLNR para medir
a densidade do plasma de argônio no sistema IIIP..... 134**

Capítulo 9 - Conclusões e Comentários..... 136

Referências..... 139



Lista de figuras

- FIGURA 1 - Características de tensão e corrente das descargas elétricas DC
- FIGURA 2 - Principais regiões de uma descarga glow
- FIGURA 3 - Gráfico comparativo das correntes de íons extraídas entre as fontes com β -eucryptita vítrea e pastosa
- FIGURA 4 - Tempo de vida útil entre fontes com β -eucryptita vítrea e pastosa para 1150° C
- FIGURA 5 - Desenho esquemático da fonte de feixe de elétrons
- FIGURA 6 - Diagrama em bloco do sistema de diagnóstico aplicado no experimento IIIP
- FIGURA 7 - Foto das câmara da SFLNR
- FIGURA 8 - Circuito do sistema de vácuo da SFLNR
- FIGURA 9 - Circuito elétrico do controle do sistema de vácuo na SFLNR
- FIGURA 10 - Desenho esquemático do cadinho
- FIGURA 11 - Foto do cadinho sobre um suporte
- FIGURA 12 - Circuito elétrico da fonte de alimentação do cadinho
- FIGURA 13 - Curva característica do filamento do cadinho
- FIGURA 14 - Rampa de aquecimento do cadinho
- FIGURA 15 - Gráfico da potência x temperatura do cadinho
- FIGURA 16 - Geometria do canhão Pierce
- FIGURA 17 - Desenho esquemático do conjunto canhão de íons
- FIGURA 18 - Foto do conjunto canhão de íons de lítio
- FIGURA 19 - Neutralizador de íons utilizado na SFLNR
- FIGURA 20 - Curva de calibração do termopar 1
- FIGURA 21 - Curva de calibração do termopar 2

- FIGURA 22 - Esquema do experimento de Implantação Iônica por imersão em Pasma (IHIP), do LAP/INPE, que utiliza descarga glow.
- FIGURA 23 - Foto do experimento IHIP do LAP/INPE onde podemos observar a câmara de vácuo onde se produz a descarga glow.
- FIGURA 24 - Esquema geral do experimento para caracterização do feixe iônico
- FIGURA 25 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 1 em função da voltagem de aceleração dos íons (V_{acel}).
- FIGURA 26 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 1 em função da voltagem de polarização da lente-1 (V_1).
- FIGURA 27 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 2 em função da voltagem de polarização da lente-2 (V_2).
- FIGURA 28 - Curvas das correntes de íons coletadas em função da tensão de aceleração V_{acel} para diversas temperaturas
- FIGURA 29 - Desenho esquemático da técnica de medida do diâmetro do feixe
- FIGURA 30 - Gráfico da corrente de feixe versus o deslocamento do detetor 3
- FIGURA 31 - Gráfico da corrente do feixe versus o deslocamento do detetor 3 para uma temperatura da fonte de íons de 1170°C
- FIGURA 32 - Gráfico da variação da intensidade de corrente do feixe versus tensão de polarização da lente-1 (V_1).
- FIGURA 33 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 700V e V_2 de 2,3 kV
- FIGURA 34 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 1,7 kV e V_2 de 2,3 kV
- FIGURA 35 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 2,2 kV e V_2 de 2,3 kV
- FIGURA 36 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe onde podemos observar uma distribuição Lorentziana mais bem comportada.
- FIGURA 37 - Gráfico do diâmetro do feixe

- FIGURA 38 - Medidas do diâmetro do feixe fora da região de otimização
- FIGURA 39 - Curvas das correntes de íons coletadas em função da tensão de aceleração V_{acel} para fonte vítrea
- FIGURA 40 - Gráfico da variação da intensidade de corrente do feixe versus tensão de polarização da lente-1 para fonte vítrea
- FIGURA 41 - Gráfico da intensidade de corrente do feixe versus tensão V_2 para fonte vítrea
- FIGURA 42 - Gráfico do diâmetro do feixe para corrente coletada no detector 2 de $6,6 \mu\text{A}$
- FIGURA 43 - Gráfico do diâmetro do feixe para corrente coletada no detector 2 de $17 \mu\text{A}$
- FIGURA 44 - Gráfico do diâmetro do feixe para corrente coletada no detector 2 de $27 \mu\text{A}$
- FIGURA 45 - Célula neutralizadora com o reservatório de sódio.
- FIGURA 46 - Esquema de um sistema para medida da eficiência de neutralização do feixe de lítio
- FIGURA 47 - Curva da pressão na câmara devido ao vapor de sódio versus temperatura neutralizadora
- FIGURA 48 - Gráfico da eficiência de neutralização para uma carga nova de sódio
- FIGURA 49 - Curva da eficiência de neutralização para uma carga gasta de sódio
- FIGURA 50 - Variação da pressão do vapor de sódio ao longo do tempo
- FIGURA 51 - Vida útil da carga de sódio no neutralizador
- FIGURA 52 - Esquema da aplicação do feixe de lítio no gás
- FIGURA 53 - Principais comprimentos de ondas do feixe de Li^0 detectadas.
- FIGURA 54 - Varredura do sinal de luz em torno do comprimento de $6708 \text{ \AA}$
- FIGURA 55 - Linhas detectadas no gás argônio
- FIGURA 56 - Variação da intensidade de luz em função da pressão do gás

FIGURA 57 - Comparação da emissão de luz devido ao feixe neutralizado pelo gás e pelo sódio.

FIGURA 58 - Variação da emissão de luz do feixe em função da temperatura de neutralização

FIGURA 59 - Variação da intensidade de luz em função do desgaste da massa de sódio

FIGURA 60 - Montagem do acoplamento da SFLNR ao sistema IIP

FIGURA 61 - Montagem para medida da emissão de luz no sistema IIP

FIGURA 62 - Medidas da intensidade de emissão do feixe em duas posições diferentes.

FIGURA 63 - Curva de potência de filamento versus potencial de ruptura para nitrogênio na pressão 8×10^{-4} mbar

FIGURA 64 - Desenho esquemático do diagnóstico do plasma IIP

FIGURA 65 - Curva da emissão do feixe Li^0 aplicado no gás argônio

FIGURA 66 - Emissão do feixe de lítio no gás e no plasma de argônio

Vilela, W. A. Aplicação de um feixe de lítio otimizado de 2-5 keV no diagnóstico de plasma de baixa temperatura- Guaratingueta, 2001. 142p. (dissertação de mestrado em física aplicada) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Resumo

A espectroscopia por emissão com base em um feixe de lítio neutralizado, monoenergético, tem-se destacado atualmente como uma técnica de diagnóstico de plasma de alta importância e versatilidade em relação a outros métodos tradicionais como sondas de Langmuir, pois não interfere diretamente no plasma como a técnica das sondas, que além de causar perturbações no plasma, pode injetar impurezas ao mesmo.

Este método não invasivo de sondagem de plasma, consiste em injetar um feixe de partículas neutras de lítio (Li^0) e medir a emissão da linha 6708Å, decorrente do bombardeamento dos átomos Li^0 do feixe pelos elétrons do plasma e pelos átomos no gás alvo que é usado para a própria calibração do feixe.

Nesta dissertação de mestrado apresentamos a caracterização e otimização de um feixe de lítio (iônico e neutralizado) de 2 a 5 keV, e os resultados de sua aplicação no diagnóstico de um plasma de baixa temperatura. Apresentamos medidas da densidade deste plasma usado no estudo de implantação iônica tridimensional que é gerado por descarga *glow* contínuo.

A principal dificuldade de aplicação da técnica de feixe de partículas neutras de lítio neste tipo de experimento é a relação sinal/ruído quando se detecta a linha de emissão do feixe no plasma devido à sua baixa densidade. Por isso a otimização do feixe aplicado foi fundamental para se obter uma medida confiável do sinal de emissão do feixe no plasma.

A eficiência da neutralização do feixe, o prolongamento do tempo de vida da fonte de lítio ou da carga do neutralizador, a densidade maximizada de corrente do feixe no ponto de medida, ou ainda a otimização do sistema óptico puderam viabilizar a aplicação do diagnóstico aqui apresentado.

Palavras-chaves: Feixe de lítio, diagnóstico de plasma, medida de densidade de plasma, espectroscopia por emissão de feixe

Vilela, W. A. Application of on optimized 2-5 keV lithium beam to the low temperature plasma diagnostics - Guaratingueta, 2001. 142p. (master degree dissertation in applied physics) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Abstract

The beam emission spectroscopy based on a monoenergetic neutral lithium beam, has been considered recently as a highly important and versatile plasma diagnostics compared to other traditional methods as Langmuir probes, since it does not interfere with the plasma itself, as material probes which can cause perturbations and inject impurities to the plasma under measurement.

This non-invasive method of plasma probing consists of injecting a beam of neutral lithium particles (Li^0) and measure the 6708 Å line emission, resulting from the excitation of Li^0 beam atoms by collisions with electrons from the plasma and with target gas atoms, the last one used for beam calibration.

In this master degree dissertation, we present the characterization and optimization of the lithium beam (ionic and neutralized) of 2 to 5 keV, and results of its application to a low temperature plasma. We present the measurement of the density of this glow DC discharge plasma used for tridimensional ion implantation.

The main difficulty for applying this technique of neutral lithium beam in such an experiment is the low signal/noise ratio for detecting the beam emission due to the low density of the plasma.

Therefore, the use of totally optimized beam was fundamental, to reach a truthful measurement of beam emission in the plasma.

The high efficiency of the beam neutralization, the increase of the lithium source or neutralizer source lifetimes, the maximization of the beam current density at the measurement point, as well as the optimization of the optical system, made it possible the viabilization of the diagnostics by neutral lithium beam presented here.

Key-words: Lithium beam, plasma diagnostics, plasma density measurement, beam emission spectroscopy.

Capítulo 1

Introdução

Apresentamos neste trabalho de tese, resultados obtidos com uma das técnicas mais modernas de diagnóstico de plasma que foi desenvolvida com sucesso no Laboratório Associado de Plasma (LAP), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O plasma pode ser caracterizado através de seus parâmetros como densidade, temperatura eletrônica e iônica, espécies de íons, etc. Muitos destes parâmetros podem ser medidos através de sondas simples, dependendo das condições do plasma em observação, outros porém exigem a utilização de técnicas mais sofisticadas como a espectroscopia, espalhamento Thomson, etc.

Dado a grande variedade de tipos de plasmas existentes tanto na natureza quanto no laboratório, são diversas as técnicas desenvolvidas para os seus diagnósticos e outras ainda estão sendo desenvolvidas em várias partes do mundo atualmente. Cada técnica pode apresentar vantagens e desvantagens dependendo de que tipo de plasma ela é aplicada. Vamos mostrar nesta dissertação o desenvolvimento de uma das técnicas de diagnóstico que vem sendo utilizada com grande sucesso nos países de primeiro mundo, que é o diagnóstico de plasma por feixe de partículas neutras.

Esta técnica de diagnóstico, mesmo sendo difícil de ser aplicada, apresenta diversas vantagens em relação a outras convencionais, como por exemplo sondas de Langmuir utilizadas para medir densidade de plasma. A principal vantagem desta técnica, é o fato de ser um método não invasivo de

sondagem, conseqüentemente sua perturbação no plasma é desprezível. Além disso, a sonda de feixe de partículas neutras não contamina o plasma com impurezas; tem uma alta resolução tanto espacial quanto temporal; e oferece maior segurança por estar eletricamente isolado do plasma para certas aplicações específicas.

A utilização de feixe de partículas neutras para diagnóstico de plasma vem sendo desenvolvido desde a década de 60, quando pela primeira vez foi utilizado para medir a densidade linear de plasmas. As primeiras tentativas de diagnósticos de plasmas usando feixes de partículas neutras foram realizadas por Eubank em 1965 e por Afrosimov em 1966, quando a densidade linear do plasma foi determinada por este método ^[18]. Desde então esta técnica de sondagem ativa de plasma, que é efetuada sem perturbar o plasma, tem sofrido diversificação e melhoramentos quanto a tipos de feixes e detetores usados para poder diagnosticar as várias espécies de plasmas utilizadas no estudo da fusão nuclear. A popularidade deste método cresceu muito nos anos recentes devido à possibilidade de se medir parâmetros diferentes do plasma, tais como: (1) densidade eletrônica local ^[18]; (2) densidade de íons local ^[17]; (3) temperatura local de íons ^[16]; (4) energia de deriva ^[16]; (5) velocidade rotacional dos íons no plasma ^[15]; (6) campo magnético dentro do plasma ^[19]; que permite até determinação de valores locais de transformada rotacional ^[29]. O conhecimento destes parâmetros é fundamental para o estudo do plasma com o objetivo de desenvolver tecnologia em fusão nuclear ^[18].

Técnicas de diagnósticos de plasma com vários tipos de feixes de partículas têm sido desenvolvidas para investigação de plasmas de alta temperatura. Diversas fontes de feixe de partículas neutras foram desenvolvidas apresentando vantagens e desvantagens conforme sua aplicação. A densidade eletrônica n_e , foi por exemplo medida por feixe de Li^0 de 4 keV, onde a intensidade da linha 6708Å do átomo de lítio excitada por colisões com elétrons do plasma foi medida com espectrômetro ótico. Já a

densidade de íons local, foi obtida medindo a atenuação do feixe de hidrogênio causada pela interação do feixe com íons do plasma ao longo do caminho de propagação do feixe neutro, através de um espectrômetro observando a linha 4861Å. Para determinação da temperatura iônica do plasma também foi utilizado o feixe de hidrogênio porém para isto utilizou-se o perfil de linha com alargamento Doppler, obtido pela emissão dos átomos de hidrogênio provenientes do plasma que resultaram da transferência de carga dos íons H^+ do plasma com os átomos neutros do feixe.

Em particular, a espectroscopia por emissão de feixe com base em um feixe de lítio neutralizado, monoenergético, tem-se destacado ultimamente como uma técnica de diagnóstico de alta importância e versatilidade em dispositivos de confinamento magnético de plasmas de alta temperatura, exibindo uma boa resolução espacial e temporal nas suas medidas de perfis de densidade de plasma de borda ^[18,27]. Recentemente, flutuações de densidade e concentrações de impurezas naquela região de borda no dispositivo tokamak ASDEX-U foram também determinadas por este método ^[4,14]. O sucesso destas medidas tem sido possível graças à alta intensidade e à excelente ótica dos feixes de lítio empregados naqueles experimentos e também ao desenvolvimento recente de códigos numéricos complexos utilizados na chamada reconstrução de densidade, envolvendo bases de dados atômicos bastantes elaborados.

Atualmente encontra-se em desenvolvimento no INPE um tokamak esférico de pequena razão de aspecto, e tal experimento encontra-se em operação preliminar desde o final do ano 2000. O Experimento Tokamak Esférico (ETE) deverá dispor de sistemas de diagnóstico cujos dados obtidos deverão ser de muita relevância para se entender o plasma ali produzido. O domínio da técnica de diagnóstico por feixe de partículas neutras tem grande importância para o estudo de plasmas de altas temperaturas e produzido em dispositivos de confinamento magnético, já que este tipo de diagnóstico permite a determinação de parâmetros fundamentais do plasma sem interferir

no mesmo. Por isso há uma clara necessidade do projeto ETE possuir este tipo de diagnóstico para estudar por exemplo, os efeitos (ou causas) dos perfis de densidade da borda no confinamento de plasma nesta máquina.

Neste trabalho, apresentamos um sistema de diagnóstico ótico/feixe de partículas que utiliza átomos de lítio neutro de baixa energia como sonda. Este método não invasivo de sondagem de plasmas, consiste em injetar um feixe de átomos neutros de lítio no plasma e medir a emissão da linha 6708 Å decorrente do bombardeamento dos átomos de Li^0 do feixe pelos elétrons do plasma. A intensidade desta emissão é proporcional à densidade eletrônica, sob certas condições físicas daquele plasma.

Contrastando-se com plasmas de altíssimas temperaturas como os obtidos em tokamaks ($> 10 \text{ keV}$), os plasmas frios ($< 10 \text{ eV}$) utilizados na importante área de tecnologia de plasma apresentam desafios bastantes diferentes no que concerne à medida de seus parâmetros. Tecnologia de plasma é uma das linhas de pesquisas em plasma que mais vem sendo desenvolvida nos últimos anos.

O uso deste método de diagnóstico em plasma de baixas temperaturas (plasmas tecnológicos) é pioneira, e abre com certeza uma nova opção para aplicação deste diagnóstico. Nas pesquisas envolvendo implantação iônica por imersão em plasma, uma das grandes dificuldades é de se estudar os fenômenos que ocorrem nas regiões próximas à amostra como a dinâmica da bainha de plasma. Devido às altas tensões existentes nestas regiões, torna-se inviável o uso de sondas, que além de perturbar o campo elétrico e o plasma, podem danificar os equipamentos em utilização.

A aplicação de feixe de Li^0 de baixa energia ($< 10 \text{ keV}$) como o desenvolvido neste trabalho, ainda é pouco explorada para diagnóstico em dispositivos de confinamento magnético como tokamak e não se conhece medidas com feixes de partículas neutras em plasmas tecnológicos.



O uso de feixes de baixas energias tem aplicação limitada em diagnóstico de plasmas de alta temperatura devido à baixa intensidade da emissão de luz e à sua pouca penetração no plasma. Porém, ele vem sendo utilizado com sucesso na sondagem do plasma de borda ou na região do divertor, regiões estas que tem despertado grande interesse dos pesquisadores atualmente.

O uso de feixe de Li^0 com baixa energia ($E < 10 \text{ keV}$) apresenta vantagens tais como:

- A alta resolução espacial obtida com feixe de baixa energia e a pouca penetração permite o uso deste para detectar pequenas estruturas em densidade nas bordas de plasmas em tokamaks e outras máquinas de confinamento.
- Simplicidade na análise dos dados pois poucos processos atômicos são relevantes neste caso.
- O sistema de geração do feixe é mais simples, com custos bem mais acessíveis que aqueles necessários para os de alta energia.
- Menos problemas com alta tensão no que se refere a fontes de alimentação e isolações elétricas, pois utiliza tensões bem mais baixas do que em feixes de altas energias.
- O sistema é bem compacto, comparado ao de alta energia, e não apresenta aquecimento elevado dos seus componentes no vácuo
- A fonte de Li^0 obtida a partir do β -eucryptita é bem mais limpa que outros tipos de fontes e tem a vantagem de ser uma fonte DC de feixe que permite medidas com instrumentação relativamente simples durante todo o processo de diagnóstico.

1.1 - Motivação e organização do trabalho

Os países do futuro são aqueles capazes de criar suas próprias alternativas tecnológicas. Os avanços nas últimas décadas têm exigido dos países em desenvolvimento um esforço crescente para acompanhá-los. A velocidade com que os materiais sintéticos substituem os produtos naturais, fazem com que aqueles que lideram a arrancada tecnológica se tornem líderes no mercado mundial.

Uma das áreas que vêm despertando um forte interesse das indústrias de ponta nos países mais desenvolvidos, nos últimos anos, é o uso da tecnologia de plasma, em particular o processo de implantação iônica tridimensional na modificação de superfície de materiais. Trabalhos desenvolvidos nesta área pelo grupo do LAP/INPE têm colocado o país nesta vanguarda do desenvolvimento tecnológico, permitindo importantes intercâmbios nacionais e internacionais.

A grande motivação para estudar o diagnóstico por feixe de lítio neutro em plasma, foi devido a possibilidade de aplicá-lo em plasma tecnológico e principalmente pela carência desta tecnologia em nosso país. Outro fator importante foi a possibilidade de sua imediata aplicação em um dispositivo já construído. A sólida experiência dos orientadores permitiu uma visão clara da viabilidade deste projeto e de sua contribuição científica.

Do ponto de vista técnico científico, a Sonda de Feixe de Lítio Neutro Rápido - SFLNR é um experimento sofisticado que exigiu conhecimentos multidisciplinares tais como: tecnologia de vácuo, instrumentação, eletrônica e física.

Além da aplicação do feixe em diagnóstico, apresentamos detalhes da geração e otimização de feixes de partículas neutras. Estes conhecimentos são de grande importância e poderão ser aplicados para produção de feixes de

outras substâncias como: cézio, tálio e outros que também são aplicados em diagnóstico de plasma e em implantação iônica unidimensional.

Por se tratar de um trabalho essencialmente experimental procuramos apresentar aqui o máximo de detalhes do experimento, permitindo que com os dados aqui apresentados torne o experimento reprodutivo em qualquer laboratório. A seguir apresentamos de forma resumida o trabalho técnico científico que foi realizado no desenvolvimento do feixe de lítio do LAP/INPE:

No capítulo 2 desta dissertação fazemos uma rápida introdução teórica do princípio do diagnóstico por feixe de lítio neutro. Apresentamos os dois métodos para medida da densidade de plasma, sendo um para plasma de altas densidades, como os plasmas de tokamaks, e o outro para plasma de baixas densidades como os plasmas tecnológicos. Também fazemos neste capítulo uma apresentação resumida sobre a descarga glow que será usada como plasma alvo do diagnóstico.

O processo de obtenção de ions de lítio Li^+ e os tipos de fontes são apresentadas no capítulo 3, onde discutimos as vantagens e desvantagens entre o uso da fonte vítrea e a fonte pastosa. No Capítulo 4 é feita uma descrição do equipamento experimental e da instrumentação utilizada. A caracterização e otimização do feixe iônico, visando obter a máxima densidade de corrente e mínima divergência, e as diversas medidas da intensidade e do diâmetro do feixe iônico obtidos a partir de fontes com β -eucryptita pastosa e vítrea podem ser vistas no capítulo 5. Neste capítulo incluímos a lista dos parâmetros de operação do sistema para que se obtenha um feixe otimizado. A principal finalidade desta otimização foi a obtenção da máxima intensidade de luz emitida pelo feixe na linha $\text{LiI } 6708 \text{ \AA}$, dentro do plasma e do gás, a fim de aplicar este feixe na determinação da densidade de plasma.

O feixe de lítio iônico otimizado foi então neutralizado usando vapor de sódio, produzido numa célula neutralizadora. O capítulo 6, é dedicado ao estudo deste processo de neutralização do feixe. A neutralização depende da

concentração de sódio na célula. Por isso foram determinados os parâmetros ideais de operação do neutralizador tais como temperatura da célula e desgaste do sódio, buscando a eficiência máxima de neutralização

O capítulo 7 é dedicado à aplicação do feixe neutro no gás. O feixe neutralizado e devidamente otimizado foi injetado em uma câmara de gás e a emissão do feixe foi medida usando um espectrômetro óptico. O sistema de medida da emissão de luz devido ao feixe no gás foi otimizado e em seguida aplicado ao sistema de Implantação Iônica por Imersão em Plasma (IIIP). No capítulo 8 mostramos a aplicação da SFLNR no plasma gerado no sistema IIIP, mostramos os procedimentos para fazer o diagnóstico neste sistema e alguns resultados das medidas de densidades. No capítulo 9, concluímos o trabalho desenvolvido, onde salientamos a importância deste e justificamos o sucesso alcançado.



Capítulo 2

Plasma por descarga glow e o princípio de diagnóstico por feixe de lítio

2.1 - Descarga elétrica - Plasma

Antes de apresentarmos o método de diagnóstico de plasma, vamos fazer uma rápida apresentação do que é plasma, sua origem e desenvolvimento. Daremos ênfase a apresentação da descarga *glow* por ser este o tipo de plasma utilizado para aplicação deste nosso trabalho.

O interesse pelas descargas elétricas é tão antigo quanto a ciência. Na antigüidade, os egípcios chegaram a elaborar explicações para as descargas atmosféricas. Mas os estudos das descargas elétricas em tubos de gases começaram efetivamente em 1830 pelo físico inglês Michael Faraday^[9,20]. Hacia e Plücker, pioneiros do estudo das descargas elétricas, demonstraram que uma descarga elétrica entre dois eletrodos em gás raro produziam certos tipos de raios que poderiam ser deflexionados pela ação de campos elétricos^[9,20]. O trabalho de J. J. Thonson junto com outros físicos, explicou detalhadamente as propriedades destes raios em termos de partículas^[12]. Em 1879 Willian Crocker sugeriu que a descarga com gás constituía o quarto estado da matéria^[7]. Irving Langmuir, um químico norte americano, em 1929 empregou o termo plasma pela primeira vez. Ele se referia apenas a região da descarga em que ocorriam oscilações e por ser esta região visualmente semelhante a uma gelatina^[11]. O termo plasma se generalizou para todas as descargas, porém cientificamente, o plasma é uma descarga elétrica que

obedece certos critérios. A principal característica de um plasma é o seu comportamento coletivo, ele é um conjunto de partículas carregadas e neutras que exibe um comportamento quase neutro.

Um plasma pode em geral ser produzido por vários processos e a sua aplicação é ampla, vai de estudos de estrutura da matéria e fusão nucleares ao uso tecnológico para produção de novos materiais ou simplesmente como ferramenta de corte na indústria.

Para aplicação tecnológica, principalmente no processo de implantação iônica tridimensional, os plasmas podem ser gerados através de ^[10]: a) descargas em gases precursores, como nitrogênio, argônio, dióxido de carbono ou vapores metálicos, sendo excitada por tensões contínuas aplicadas em eletrodos imersos no gás; b) por descargas excitadas por tensões alternadas, em baixa ou alta frequência, sendo kHz e MHz (RF) e GHz (microondas) ^[10].

Podemos classificar as descargas elétricas em três tipos basicamente, de acordo com as correntes envolvidas ^[12]:

- Descarga Townsend ou descarga escura cujas correntes envolvidas estão abaixo de 10^{-6} A.
- Descarga glow ou descarga luminosa cujas correntes estão entre 10^{-6} a 10^{-1} A aproximadamente.
- Descarga em arco cujas correntes estão acima de 10^{-1} A.

Na figura 1 temos um gráfico que ilustra os diversos tipos de descargas DC e suas respectivas correntes e tensões.

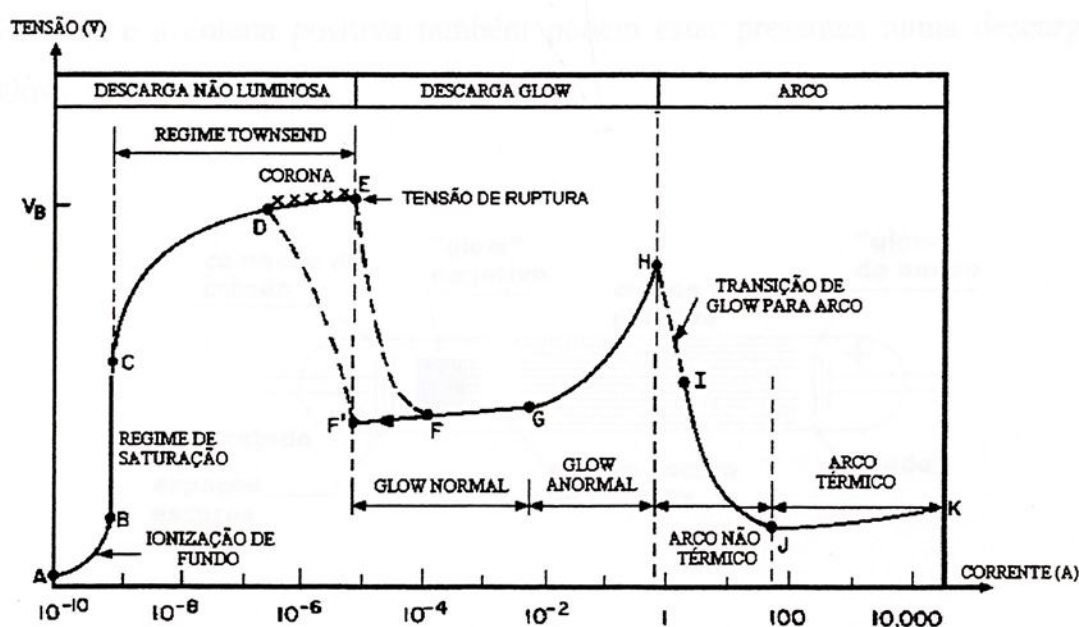


FIGURA 1- Características de tensão e corrente das descargas elétricas DC

Neste trabalho estamos interessados na descarga glow pois a técnica de diagnóstico de medida da densidade de plasma por feixe de lítio neutro aqui apresentado foi aplicado em uma máquina de implantação iônica que utiliza como fonte de ions uma descarga glow. A descarga glow para um sistema de Implantação Iônica por Imersão em Plasma - IIIP é reconhecidamente eficiente por ser uma técnica relativamente simples de produzir plasma ^[2].

Para obter a descarga glow ou luminescente aplica-se uma diferença de potencial adequada entre dois eletrodos imersos em um gás em baixa pressão. A densidade dos plasmas gerados por descarga glow, em geral, é baixa (da ordem de 10^{10} m^{-3}) comparada a dispositivos de fusão ($10^{13} - 10^{14} \text{ m}^{-3}$).

Na descarga glow podemos observar várias regiões distintas, com características próprias conforme mostrado na figura 2, das quais as principais são: região do catodo, espaço escuro do catodo: o que se estende até a próxima região luminosa; região de glow negativo: esta é uma região do plasma com densidades de elétrons e de íons variando entre 10^9 e 10^{11} cm^{-3} , com temperatura eletrônica de 2 a 10 eV. Região do anodo, o espaço escuro de

Faraday e a coluna positiva também podem estar presentes numa descarga glow.



FIGURA 2 - Principais regiões de uma descarga *glow*

2.2 - Método da medida de densidade do plasma por feixe de lítio

Para medir o perfil da densidade em um plasma usando feixe de partículas neutras, conforme mencionamos na introdução deste trabalho, utilizamos a técnica de injeção do feixe de lítio neutro no plasma e medimos a emissão de luz do feixe dentro do plasma. Esta técnica de diagnóstico utiliza os fótons por excitação devido ao impacto dos elétrons do plasma com os átomos de lítio no feixe. A emissão do feixe de lítio neutro no gás e/ou no plasma tem como linha mais intensa a linha de ressonância $\text{LiI } 2s-2p$ de comprimento de onda $6708 \text{ \AA}$.

A comparação dos resultados obtidos com sondas de feixe de lítio neutro com os métodos convencionais mostra que este método é prático para medidas com resolução espacial dos parâmetros do plasma, especialmente quando uma sonda de Langmuir não é a mais adequada.

Podemos determinar a densidade do plasma através da injeção de feixe de lítio neutro no plasma através de dois métodos ^[25,27] que discutiremos a seguir.

Para plasmas com $\langle n_e \rangle < 4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ e T_e entre 10 e 100 eV utilizamos o método baseado na comparação dos fluxos de fótons na linha 6708 Å emitida pelo feixe quando injetado em um gás neutro e quando injetado no plasma. Considerando este caso em que o plasma é de baixa densidade, podemos desprezar a atenuação do feixe dentro do plasma, e o fluxo de fótons resultante da excitação do feixe de Li^0 pelo impacto com os elétrons do plasma é dado por :

$$N_{vp} = K_1 n_e n_b Q_p \quad (2.1)$$

Onde:

n_e - Densidade de elétrons

n_b - Densidade do feixe de átomos

Q_p - Seção de choque de excitação efetiva

K_1 - Constante de proporcionalidade, que depende da geometria óptica e do fator de sensibilidade do detector

A emissão do fóton no gás pode ser determinada por:

$$N_{vg} = K_2 n_g n_b Q_g \quad (2.2)$$

Onde:

n_g - Densidade do gás

n_b - Densidade do feixe de átomos

Q_g - Seção de choque de colisões de átomos do feixe com átomos do gás.

$K_1 = K_2$ - Considerando as mesmas condições de medidas anteriores

Então a densidade do plasma pode ser escrita como:

$$n_e(r) = \frac{N_{vp}}{N_{vg}} \frac{Q_g}{Q_p} n_g \quad (2.3)$$

Desta forma, a densidade eletrônica do plasma pode ser obtida diretamente, sem a necessidade de calibração absoluta do detetor e do espectrômetro, desde que se conheçam dados da seção de choque envolvidos, e se a densidade do gás n_g e a razão N_{vp}/N_{vg} são medidas ^[25,18].

Um segundo método, usado para plasmas com $9 \times 10^{17} \leq \langle n_e \rangle \leq 10^{19} \text{ m}^{-3}$ e $T_e < 100 \text{ eV}$, é baseado no método da reconstrução da densidade usando o perfil de fluxo total de fótons ^[25,27]. Neste caso a densidade de plasma é obtida por:

$$n_e(r) = \frac{v_a}{\langle \sigma_{em} v \rangle_{ef}} \frac{N_{vp}(r)}{\int_0^r \frac{\langle \sigma_{i,cx} v \rangle_t}{\langle \sigma_{em} v \rangle_{ef}} N_{vp}(r') dr'} \quad (2.4)$$

onde:

v_a = velocidade do feixe de Li^0

$N_{vp}(r)$ = fluxo de fótons

$\langle \sigma_{i,\alpha} v \rangle_t$ = Seção de choque total da ionização e de troca de cargas dos átomos do feixe.

$\langle \sigma_{em} v \rangle_{ef}$ = Coeficiente da taxa de emissão efetiva

Este método deve ser utilizado quando a atenuação do feixe é predominante, como ocorre em plasmas de alta densidade. O estudo de plasma de borda obtido em dispositivos de fusão tem sido sondado por feixe de lítio neutro com sucesso e através do método da reconstrução de densidade, os perfis de plasma na borda determinados com alta precisão espacial e temporal ^[18].

Para o presente trabalho necessitamos somente do primeiro método de determinação da densidade pois o plasma usado como alvo é de baixa densidade (da ordem de 10^{16} m^{-3}) e portanto a atenuação do feixe pelo plasma é baixa.

Capítulo 3

Obtenção de íons de lítio - Li^+

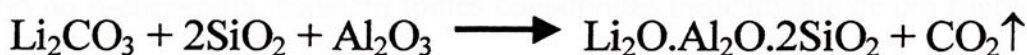
O lítio (Li) foi descoberto por Arfvedson e Davy em 1817 ^[22]. Ele é o terceiro elemento da Tabela Periódica e o primeiro do grupo I (metais alcalinos). Tem número atômico 3, massa atômica 6,939 g/mol e o raio iônico do Li^+ é de 0,60Å e é o mais leve de todos os metais. O lítio é encontrado na natureza abundantemente em pegmatitos e em salmouras naturais.

Os íons de lítio Li^+ utilizados na SFLNR são obtidos a partir da emissão termiônica do composto cerâmico denominado β -eucryptita. Este composto é um alumínio silicato alcalino de estrutura semelhante a do quartzo e que emite altos fluxos de íons alcalinos quando aquecido. Sua composição básica é:



Onde: o X pode ser qualquer um dos elementos químicos alcalinos como: Li, Na, K, Rb ou Cs ^[22].

O β -eucryptita de lítio é obtido através da sinterização por aquecimento do carbonato de lítio, dióxido de silício e óxido de alumínio ^[22],



A energia necessária para extrair os íons de lítio Li^+ do β -eucryptita é relativamente baixa, a sua energia de primeira ionização é de 2 a 3 eV. Portanto o composto emite íons de lítio muito facilmente. A estrutura deste composto possui enormes poros onde estão alojados os íons de lítio. Estes íons são relativamente livres para migrarem dentro da rede cristalina, e devido ao potencial eletrolítico eles tendem a migrar para a superfície do composto onde são emitidos facilmente quando o composto é aquecido.

A utilização do β -eucryptita de lítio em pesquisas científicas começaram no início do século, Ballo e Dittler ^[25] realizaram diversos estudos com este composto. Em 1936 Blewett e James ^[26] fizeram as primeiras pesquisas de emissão termiônica de Li^+ , com β -eucryptita à temperatura de 1136°C.

As pesquisas com β -eucryptita ganharam forte impulso a partir da década de 60 com a utilização de feixes de íons em diagnósticos de plasmas, conversores de energia termiônica, propulsão espacial, neutralização de carga espacial em feixe de elétrons e mais recentemente em colisões atômicas. Em 1961 Allison e Kamegai obtiveram correntes de Li^+ de 100 μA por 100 horas utilizando como fonte um filamento pintado com β -eucryptita e acetato de amila. Em 1962 Johnson obteve densidades de correntes de íons de até 1,5 mA/cm^2 a 1350° C utilizando fontes de ionização de superfície semelhante as utilizadas por Blewett e James. Heinz e Reover(1968) começaram a usar uma fonte semelhante as utilizadas neste trabalho e obtiveram correntes de 40 μA a 1200°C. Em 1996 M. Ueda et al realizou medidas utilizando fontes de β -eucryptita de lítio na forma vítrea e obteve correntes dez vezes maiores que as obtidas até então com fontes pastosas ^[26].

São diversos os tipos de estruturas para extração termiônica de íons de lítio do β -eucryptita. Existem fontes constituídas basicamente de um filamento pintado com β -eucryptita e acetato de amila, um outro tipo de fonte com

sistema de aquecimento indireto é constituído por uma pequena placa de tungstênio poroso contendo β -eucryptita.

No nosso trabalho utilizamos dois tipos de fontes: fontes com β -eucryptita pastoso e fontes com β -eucryptita vitrificado dentro de um cadinho comercial (Spectra Mat).

3.1 - Fontes com β -eucryptita pastoso

A fonte com β -eucryptita pastoso é o sistema mais simples e também o mais utilizado até o momento. A partir de um cadinho produzido comercialmente que pode ser de diversos tamanhos, é colocada uma certa quantidade da pasta de β -eucryptita. Esta pasta é obtida através do β -eucryptita em pó misturado com acetato de amila que serve como fixador, e ela deve ter a consistência ideal para aderir ao cadinho.

Este tipo de fonte é o que vem sendo utilizado pelos pesquisadores do National Institute for Fusion Science -NIFS (Japão). Embora este tipo de fonte seja muito simples de se obter ele apresenta alguns inconvenientes, o β -eucryptita na forma pastosa apresenta um ponto de fusão relativamente baixo (1300°C) próximo da temperatura ideal de extração de íons, o que exige um controle maior em relação a temperatura de operação, senão o material se funde e escorre do cadinho se o mesmo estiver operando na horizontal. Outro inconveniente do uso da fonte pastosa é que após aquecido pela primeira vez, o acetato de amila evapora ficando o β -eucryptita aglutinado dentro do cadinho formando uma estrutura frágil que se submetida a choque mecânico se desfaz perdendo-se a fonte.



3.2 - Fontes com β -eucryptita vítrea

As fontes que utilizam β -eucryptita vitrificado foram recentemente desenvolvidas. Este tipo de fonte tem mostrado ser mais prática e eficiente do que as fontes que utilizam β -eucryptita na forma de pasta. Entre as vantagens deste tipo de fonte podemos citar: i) a corrente de ions extraída chega a ser dez vezes maior que as obtidas em fontes pastosas operando nas mesmas condições; ii) por fornecer uma corrente bem mais alta pode-se trabalhar em temperatura de extração de ions ligeiramente mais baixas, o que evita o risco da fusão do material e consequentemente a perda da fonte. iii) a estrutura do β -eucryptita vítrea é muito mais resistente ao impacto mecânico do que a fonte pastosa, ele adere fortemente ao cadinho, permitindo trabalhar com a fonte em diversas posições e em situações de vibração mecânica, sem o risco da perda da fonte.

Comparações entre a fonte com β -eucryptita vítrea e pastosa podem ser observadas na figura 3 e 4. Na figura 3 temos o gráfico da densidade de corrente de ions extraída em função da tensão de aceleração do feixe para diferentes temperaturas do cadinho, onde podemos notar que a fonte com β -eucryptita vítrea apresenta uma corrente de ions bem maior. Na figura 4 temos o gráfico do decaimento da corrente de ions extraída ao longo do tempo, onde podemos observar que a fonte com β -eucryptita vítrea possui uma vida útil bem maior.



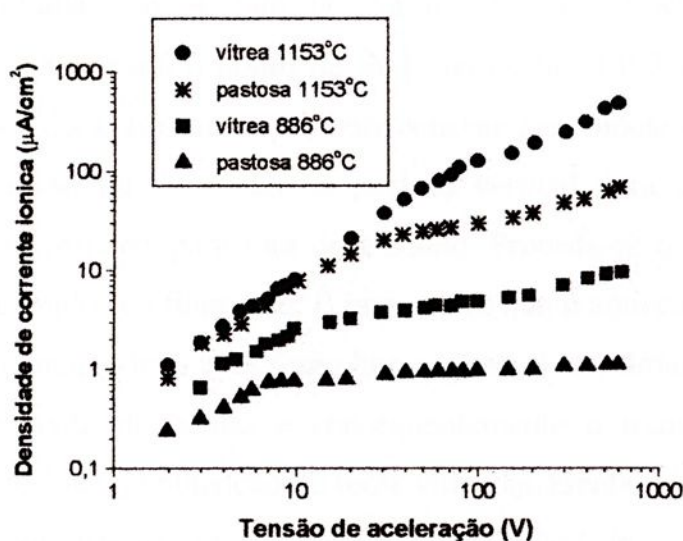


FIGURA 3 - Gráfico comparativo das correntes de ions extraídas entre as fontes com β -eucryptita vítrea e pastosa

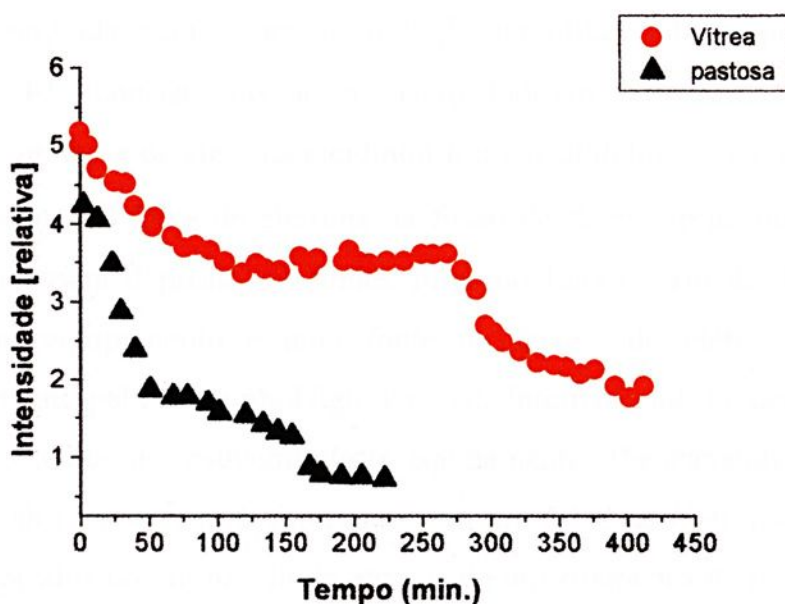


FIGURA 4 - Tempo de vida útil entre fontes com β -eucryptita vítrea e pastosa para 1150° C.

O inconveniente da fonte vítrea está na sua obtenção. Para se obter uma fonte vítrea utilizamos um cadinho onde colocamos a pasta de

β -eucryptita obtida com acetato de amila como no processo anterior, e aquecemos o cadinho até o ponto de fusão da pasta $\sim 1300^{\circ}\text{C}$. Para fundir a pasta utilizamos duas técnicas: a primeira consiste em colocar o cadinho com a pasta em uma câmara de vácuo na posição vertical para que ao fundir o material, ele não escorra para fora do cadinho. Procede-se o aquecimento do cadinho alimentando seu filamento. É importante que o aquecimento seja lento e progressivo para que haja uma fusão homogênea do material, evitando desta forma o surgimento de bolhas e consequentemente o transbordamento do material. Esta técnica de obtenção de fonte vítrea apresenta o inconveniente de necessitar de um sistema constituído por uma câmara de vácuo, circuito de alimentação do cadinho e sistema para monitorar a temperatura, dedicados exclusivamente a esta atividade. Outro fator desfavorável a esta técnica é a necessidade de submeter o filamento do cadinho a correntes acima da normal, podendo ocorrer um desgaste excessivo e o risco de ruptura do filamento.

A segunda técnica para fusão do β -eucryptita evita os inconvenientes anteriores. Ela consiste no aquecimento indireto do cadinho. Para isso utilizamos um feixe de elétrons incidindo sobre o cadinho com o β -eucryptita. Para aplicarmos o feixe de elétrons na fusão do β -eucryptita utilizamos um equipamento para depósito de filmes finos do Laboratório de Materiais do INPE. Este equipamento é uma fonte de feixe de elétrons produzido comercialmente pela Edwards High Vacuum International, modelo 306-EB3. Na figura 5 temos um esquema deste equipamento. Basicamente temos uma câmara de alto vácuo e uma fonte que gera um feixe de elétrons. O feixe de elétrons é produzido em um diodo através de um filamento de tungstênio que emite elétrons de forma espontânea e aleatória quando aquecido. Os elétrons são extraídos do diodo através de um furo no anodo que é polarizado negativamente em relação ao filamento, produzindo assim um feixe. Este feixe é então deflexionado em 207° por campos magnéticos criados por imãs permanentes, indo colidir com a amostra do material dentro de um cadinho especial ^[6].

Para produzir a fonte vítrea colocamos o nosso cadinho com a pasta de β -eucryptita dentro do cadinho especial do equipamento, e então feito um vácuo na câmara da ordem de 2 a 3×10^{-5} mbar e em seguida acionamos o feixe de elétrons numa corrente de ~ 20 mA. A fusão do β -eucryptita é obtida em alguns minutos mas como o material sofre uma redução no seu volume ao fundir-se é necessário o preenchimento do cadinho com mais pasta de β -eucryptita. O processo é repetido várias vezes até preencher completamente o cadinho.

Este processo de produção de fonte vítrea é muito simples e rápido podendo-se preparar uma fonte desta sem muita dificuldade e em menos de 60 minutos.

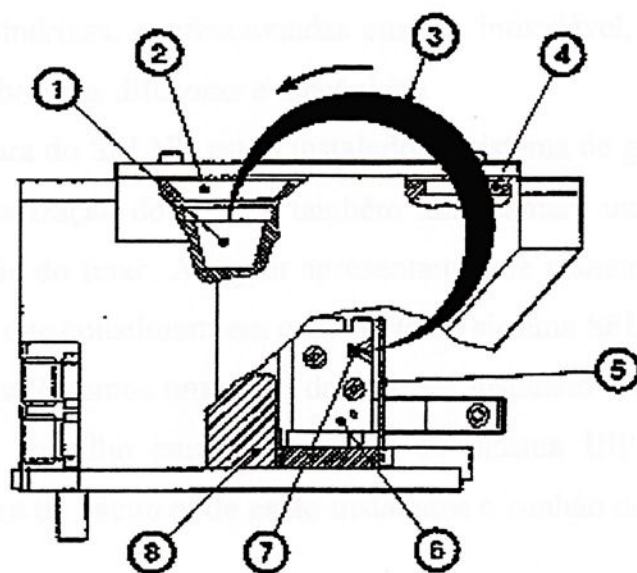


FIGURA 5 - Desenho esquemático da fonte de feixe de elétrons
1 - cadinho, 2 - abertura na blindagem, 3 - feixe de elétrons, 4 - abertura na blindagem, 5 - anodo, 6 - estrutura de emissão, 7 - filamento, 8 - ímãs permanentes.

Capítulo 4

Equipamentos utilizados e arranjo experimental

4.1 - Arranjo experimental para diagnóstico de plasma com feixe de lítio neutro

O diagrama em bloco do diagnóstico do plasma IIIP usando Sonda de Feixe de Lítio Neutro Rápido (SFLNR) é mostrado esquematicamente na figura 6. O sistema experimental é constituído por duas câmaras de vácuo independentes porém interligadas entre si. As câmaras do SFLN e do IIIP são de geometria cilíndricas, confeccionadas em aço inoxidável, e evacuadas por um conjunto de bombas difusoras e mecânicas.

Na câmara do SFLNR estão instalados o sistema de geração, extração, aceleração e focalização do feixe e também uma câmara interna responsável pela neutralização do feixe. A seguir apresentamos de maneira mais detalhada os componentes que constituem em cada parte do sistema SFLNR.

Na figura 7, temos uma foto da SFLNR instalado no LAP/INPE, que foi usada neste trabalho para diagnóstico do plasma IIIP. Nela podemos observar a câmara de vácuo onde estão instalados o canhão de ions e a câmara do neutralizador.

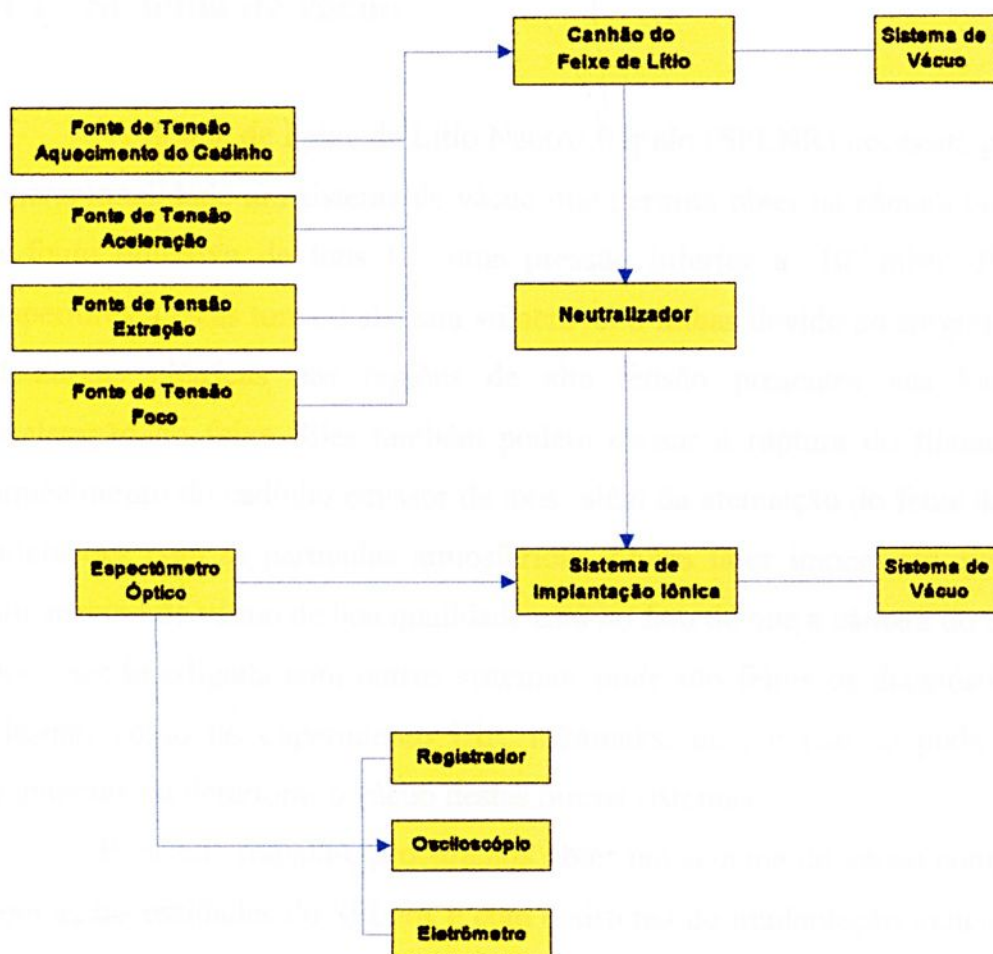


FIGURA 6 - Diagrama em bloco do sistema de diagnóstico aplicado no experimento IIIP

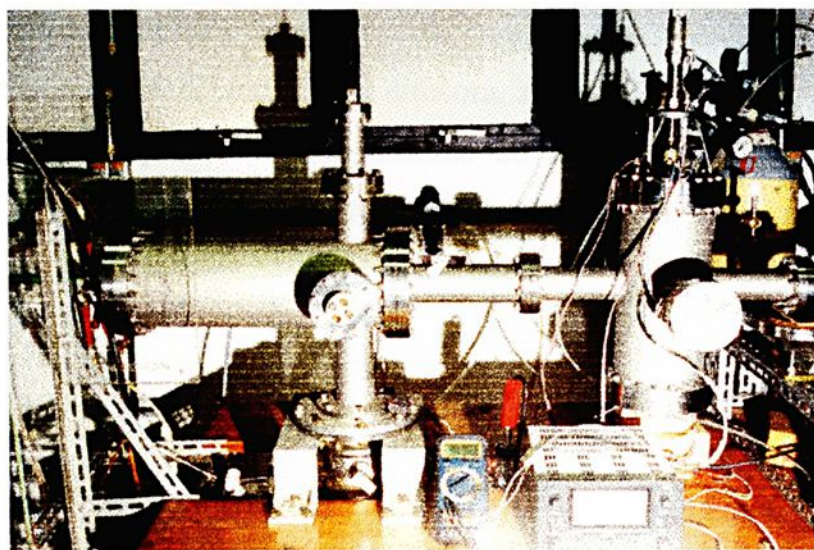


FIGURA 7 - Foto das câmara da SFLNR

4.2 - Sistema de vácuo

A Sonda de Feixe de Lítio Neutro Rápido (SFLNR) necessita para sua operacionalidade um sistema de vácuo que permita obter na câmara onde está a fonte emissiva de ions Li^+ uma pressão inferior a 10^{-3} mbar. Pressões superiores a estas torna o sistema vulnerável a falhas devido ao surgimento de descargas elétricas nas regiões de alta tensão presentes nas lentes de aceleração do feixe. Eles também podem causar a ruptura do filamento de aquecimento do cadinho emissor de ions, além da atenuação do feixe devido a interações com as partículas atmosféricas. Outro fator importante que exige um sistema de vácuo de boa qualidade está no fato de que a câmara do SFLNR pode ser interligada com outros sistemas, onde são feitos os diagnósticos do plasma, como no experimento IIIP, tokamaks, etc., e não se pode injetar impurezas ou deteriorar o vácuo destes outros sistemas.

Para este trabalho, procuramos obter um sistema de vácuo compatível com as necessidades do SFLNR e com o sistema de implantação iônica – IIIP onde é aplicado o feixe e também que fosse de acordo com as disponibilidades de recursos financeiros do projeto.

O equipamento utilizado para fazer vácuo no nosso sistema é bastante familiar nos laboratórios de plasmas em geral e é constituído basicamente por uma bomba mecânica, uma bomba difusora, sensores de pressão, instrumentos para leituras de pressão, e dispositivos de acionamento das bombas. Na figura 8 podemos observar o circuito esquemático do sistema de vácuo da SFLNR.

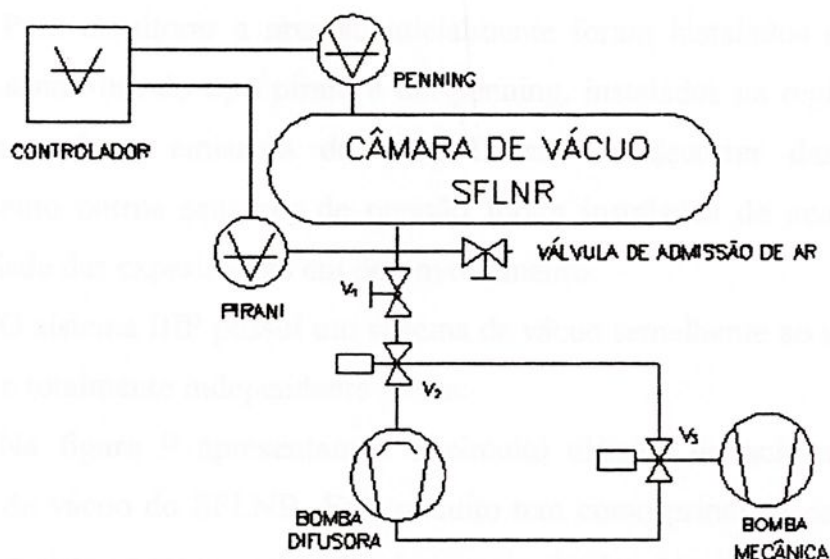


FIGURA 8 - Circuito do sistema de vácuo da SFLNR

Com uma bomba mecânica obtemos o pré-vácuo ($\sim 10^{-2}$ Torr) em seguida utilizamos uma pequena bomba difusora para obtermos pressões inferiores a 10^{-2} mbar.

O circuito das bombas (difusora e mecânica) está acoplado diretamente à câmara do feixe através de uma válvula tipo borboleta, com acionamento manual (V_1). Através desta válvula é possível isolar a câmara de vácuo do SFLNR do circuito das bombas.

A bomba mecânica encontra-se conectada na saída da bomba difusora e através de uma derivação no circuito ela está também acoplada na câmara do feixe. Um conjunto constituído de duas válvulas pneumáticas (V_2 e V_3) de acionamento elétrico permite que a bomba mecânica alterne o bombeamento entre a câmara do feixe e a saída da bomba difusora de acordo com o interesse do operador.

Antes de ligar o feixe de ions é necessário aguardar algumas horas para que a pressão na câmara do feixe atinja valores abaixo de 10^{-3} mbar. O tempo gasto para atingir a pressão ideal de operação do feixe dependerá das condições de limpeza da câmara. Em geral para o sistema em regime normal de trabalho obtêm-se 10^{-5} mbar em três horas de bombeamento.

Para monitorar a pressão inicialmente foram instalados sensores de pressão sendo um do tipo pirani e um penning, instalados na região onde se encontra a fonte emissora de ions. Durante o decorrer das fases do experimento outros sensores de pressão foram instalados de acordo com a necessidade das experiências em desenvolvimento.

O sistema IIIP possui um sistema de vácuo semelhante ao utilizado no SFLNR e totalmente independente deste.

Na figura 9 apresentamos o circuito elétrico de acionamento das bombas de vácuo do SFLNR. Este circuito tem como principal característica proteger o sistema no caso de falta de energia elétrica. No caso de interrupção de energia elétrica, o sistema desarma e as bombas são desligadas e só poderão ser religadas após acionarmos o botão de restauração (*reset*), evitando assim que as bombas operem em condições não adequadas.

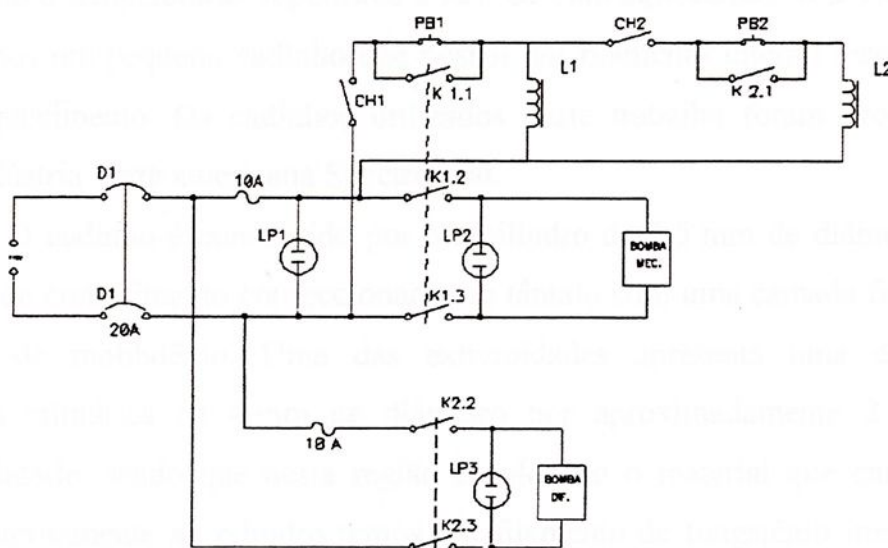


FIGURA 9 - Circuito elétrico do controle do sistema de vácuo na SFLNR

Como a qualidade do vácuo implica diretamente na eficiência do sistema de geração do feixe e consequentemente na confiabilidade do diagnóstico, procuramos otimizar o sistema de vácuo. Para isso foram realizados vários testes e medidas de pressão em diversos pontos do sistema.

O conjunto de bombas foram acoplados no centro da câmara da SFLNR entre o canhão de ions e o neutralizador. Isto é fundamental para que o vapor de sódio usado na neutralização não vá depositar na fonte de ions. Outro fator importante é que haja um gradiente entre a câmara do SFLNR e o sistema IIIP ou outro em que a sonda de feixe esteja acoplada para que o sódio não migre para este outro sistema.

Para garantir proteção ao operador e a instrumentação da SFLNR, as câmaras e as bombas são aterradas.

4.3 - Descrição da fonte emissora de Li^+

Os ions de lítio são extraídos a partir da emissão termiônica do composto β -eucryptita. A emissão de ions só ocorre quando aquecemos este composto a temperaturas superiores a 850°C . Para aquecermos o β -eucryptita utilizamos um pequeno cadinho que possui um filamento interno responsável pelo aquecimento. Os cadinhos utilizados neste trabalho foram produzidos pela indústria norte americana Spectra Mat.

O cadinho é constituído por um cilindro de 6,5 mm de diâmetro por 10 mm de comprimento confeccionado em tântalo com uma camada fina mais interna de molibdênio. Uma das extremidades apresenta uma cavidade também cilíndrica de 4 mm de diâmetro por aproximadamente 2 mm de profundidade, sendo que nesta região é colocado o material que emitirá os ions. Internamente ao cilindro temos um filamento de tungstênio imerso em material cerâmico. Na figura 10 temos um desenho esquemático do cadinho que foi utilizado neste trabalho e na figura 11 uma foto onde o β -eucryptita se encontra na forma vítrea.

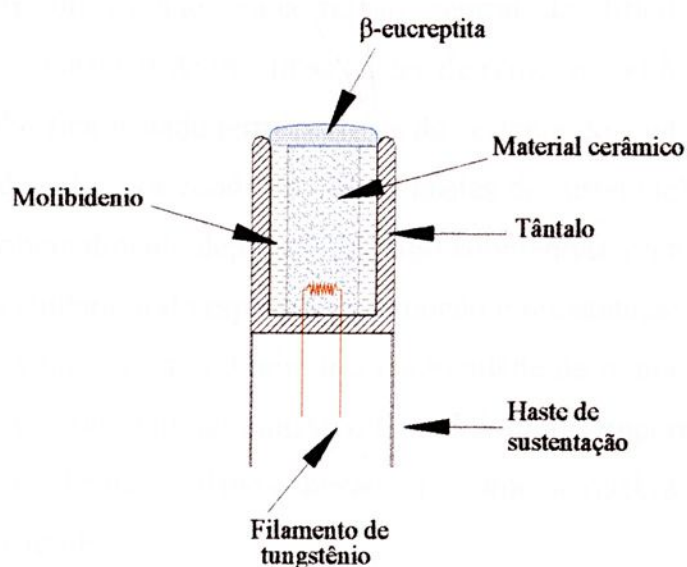


FIGURA 10 - Desenho esquemático do cadinho



FIGURA 11 - Foto do cadinho sobre um suporte

A instalação do cadinho no canhão de extração de ions que será descrito em 2.3 é delicada e exige muita habilidade do montador. Ele é

instalado dentro do canhão numa região central de difícil acesso, a sua sustentação é feita através de três finas hastes de rênio, de tal forma que todo o corpo do cadinho fica isolado termicamente do restante do canhão, diminuindo assim a perda de calor por condução. Estas hastes de sustentação são frágeis e quebradiças, principalmente depois de ter sido submetidas a temperaturas altas o que exige um cuidado todo especial na remoção e reinstalação do cadinho.

Técnicas que visem a diminuir a necessidade da remoção do cadinho, como a vitrificação do material emissivo têm sido muito importante pois evita a perda da fonte devido a danos mecânicos como a quebra das hastes de sustentação do cadinho.

A alimentação do filamento é feita por uma fonte AC que é constituída por apenas um variac e um transformador de isolação para alta tensão. Como um dos terminais do filamento está ligado junto à carcaça do cadinho e ambos estão no potencial V_{GUN} , conforme veremos mais a frente, foi necessário isolar a fonte em relação ao filamento através de um transformador especial 1:1 para alta tensão. Na figura 12 temos o esquema elétrico da fonte de alimentação do cadinho.

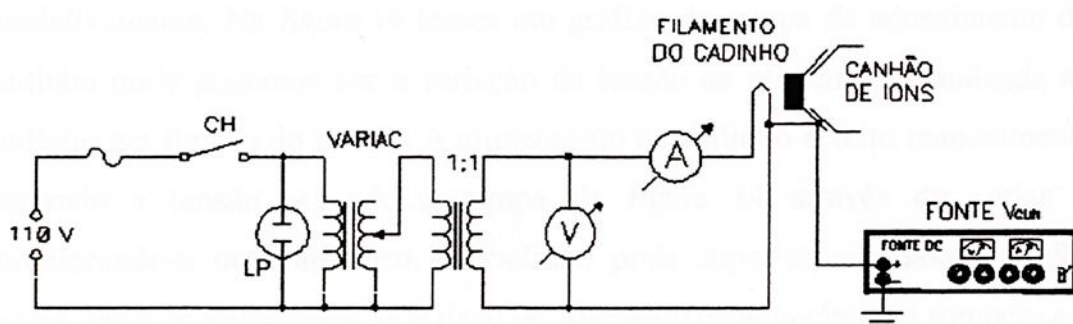


FIGURA 12 - Circuito elétrico da fonte de alimentação do cadinho

A resistência do filamento medida a frio é de aproximadamente $0,8 \Omega$ e durante o aquecimento naturalmente esta resistência aumenta. Na figura 13 temos a curva que nos mostra a variação da corrente do filamento em função

da tensão nele aplicada, a partir desta curva podemos determinar a resistência e a potência dissipada pelo cadinho.

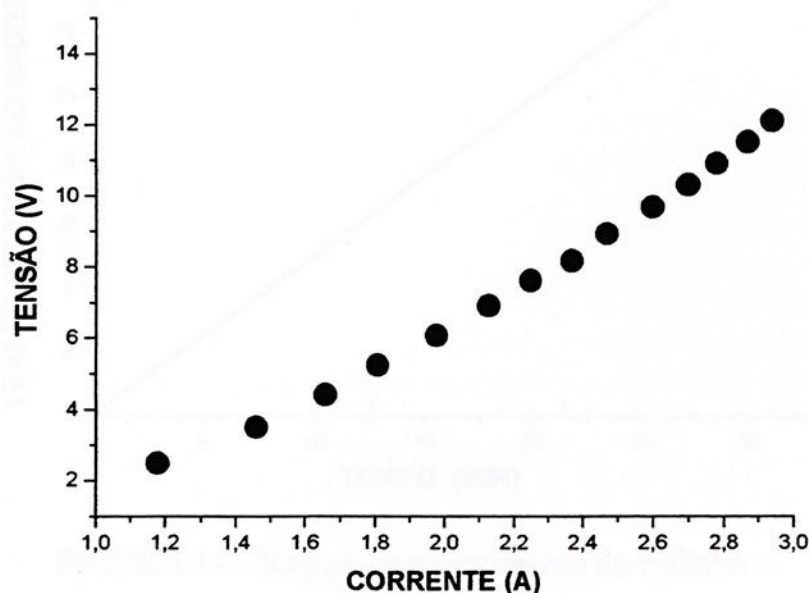


FIGURA 13 - Curva característica do filamento do cadinho

Por ser a resistência a frio muito baixa e para evitar danos ao filamento e fonte de alimentação, a corrente é aplicada ao filamento gradativamente. Na figura 14 temos um gráfico da rampa de aquecimento do cadinho onde podemos ver a variação da tensão de alimentação aplicada ao cadinho em função do tempo. A alimentação do cadinho é feita manualmente variando a tensão segundo a rampa da figura 14 através do variac e monitorando-a no voltímetro. O cadinho pode suportar no máximo 50W, acima desta potência corre-se o risco do filamento de aquecimento romper-se.

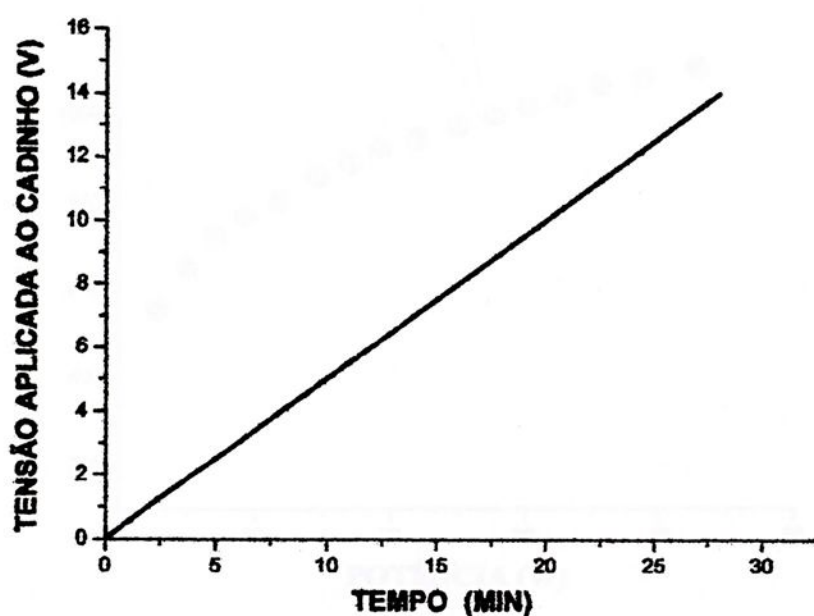


FIGURA 14 - Rampa de aquecimento do cadinho

Na figura 15 temos o gráfico da variação da temperatura do cadinho em relação a potência aplicada ao filamento. Para fazermos a medida da temperatura utilizamos um pirômetro óptico. Com este instrumento só foi possível a leitura acima da temperatura 500°C , a partir da qual o material do cadinho começou a emitir luz no visível.

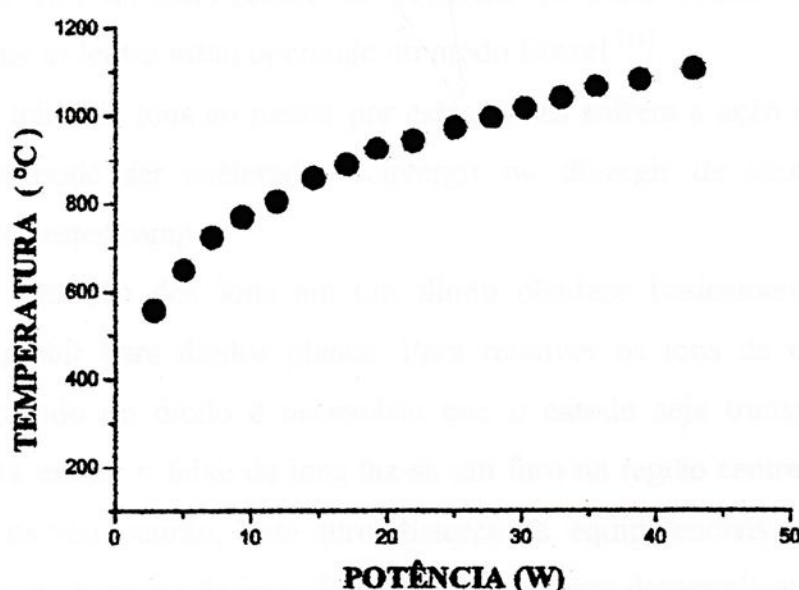


FIGURA 15 - Gráfico da potência x temperatura do cadinho

4.4 - Canhão de ions

Denominamos de canhão de ions o conjunto de lentes que podem ser eletrostáticas ou magnéticas que tem como função realizar a extração, aceleração e focalização do feixe de ions ^[13].

Existem diversos tipos de lentes e geometria de canhões. No nosso experimento utilizamos um canhão já existente e devidamente testado. O conjunto de lentes é do tipo usando em "*Nagoya Lithium beam*" e já tem sido utilizado com sucesso desde o início dos anos 80 pelos doutores Iguchi, Kadota, Ozaki e Fujita ^[14,18,27]. O esquema do canhão está mostrado na figura 16.

Este canhão é constituído por três lentes eletrostáticas de imersão de formato cilíndrico com mesmo diâmetro, através das quais passa o feixe de ions. Estas lentes podem ser operadas com tensões diferentes, ou em certos casos, as duas lentes das extremidades podem estar no mesmo potencial,

enquanto a lente do meio recebe um potencial diferente. Nesta configuração, dizemos que as lentes estão operando no modo Einzel ^[11].

O feixe de ions ao passar por estas lentes sofrem a ação dos campos elétricos e pode ser acelerado, convergir ou divergir de acordo com a intensidade destes campos.

A extração dos íons em um diodo obedece basicamente a lei de Child-Langmuir para diodos planos. Para remover os ions da região entre anodo e catodo do diodo é necessário que o catodo seja transparente. Na prática para extrair o feixe de ions faz-se um furo na região central do catodo por onde os ions sairão. Este furo distorce as equipotenciais e diminui a intensidade da corrente de ions. Em 1940 J. R. Pierce desenvolveu um canhão de elétrons de alta perveância incluindo o efeito de carga espacial no qual possibilitava que o feixe mantivesse o diâmetro constante e passasse todo pelo furo do ânodo ^[23]. Na figura 16 temos um desenho que nos permite observar a geometria do canhão desenvolvido J. R. Pierce que possibilita o feixe manter o diâmetro constante, até passar pelo orifício do extrator ^[23].

Após passar pelo furo, o feixe tende naturalmente a se divergir, para mantê-lo com o menor diâmetro possível, constante e alinhado ao longo de sua trajetória, o feixe é imerso em um conjunto de lentes eletrostáticas cilíndricas sob uma determinada configuração de potencial.

A estrutura do nosso sistema de extração e aceleração de feixe utiliza um canhão de ions com geometria do tipo planar Pierce e três lentes eletrostáticas cilíndricas operando no modo Einzel. Cada uma das lentes tem o diâmetro de 56 mm ^[11,29]. As lentes das extremidades possuem 60 mm de comprimento, enquanto a lente do centro tem o comprimento de 50 mm.

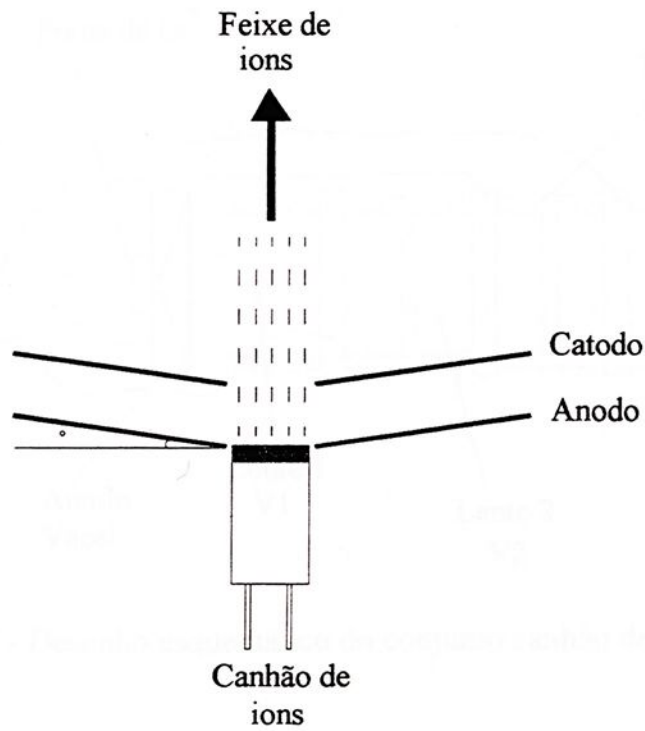


FIGURA 16 Geometria do canhão Pierce

O orifício de extração de íons no cátodo tem um diâmetro de 6 mm e a estrutura que sustenta as lentes e a fonte de íons é fixa numa flange com os terminais de ligação passando-a. Na figura 17 temos um desenho completo do canhão utilizado no nosso experimento e na figura 18 temos uma foto do mesmo.

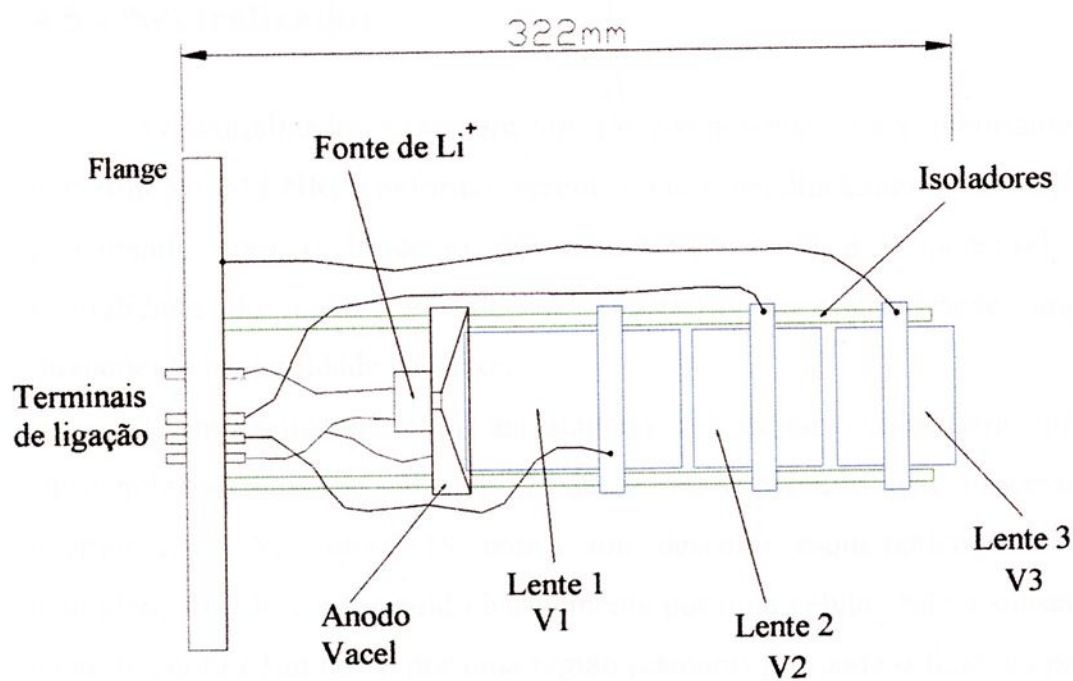


FIGURA 17 - Desenho esquemático do conjunto canhão de íons

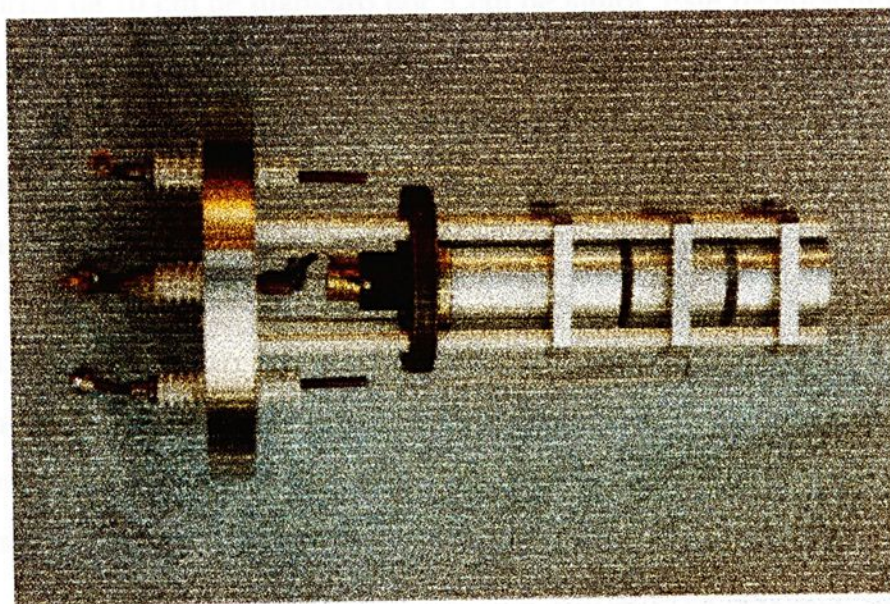


FIGURA 18 - Foto do conjunto canhão de íons de lítio

4.5 - Neutralizador

O neutralizador é também um dos componentes mais importantes do experimento SFLNR, conforme veremos mais detalhadamente no capítulo relacionado com o processo de neutralização. Ele é responsável pela neutralidade do feixe de lítio. A eficiência da neutralização implica diretamente na qualidade do feixe.

O neutralizador aqui apresentado foi desenvolvido para utilizar substâncias sólidas que são vaporizadas e seu vapor usado no processo de neutralização. Na figura 19 temos um desenho esquemático do nosso neutralizador. Ele é constituído basicamente por uma célula onde a substância neutralizadora é fundida e por uma região (câmara) por onde o feixe ao passar colide com o vapor desta substância sendo então neutralizado.

A célula onde a substância é fundida é um receptáculo de forma cilíndrica de 10 cm de diâmetro por 3 cm de altura. Este receptáculo é envolto por uma resistência blindada responsável pelo aquecimento. O vapor da substância fica aprisionado neste reservatório que é fechado hermeticamente por uma válvula pneumática de acionamento elétrico, cuja pressão de operação é de 3 barr.

Ao ser acionada, a válvula pneumática, após a substância estar devidamente fundida, abre liberando o vapor dentro da câmara de neutralização, que é basicamente um tubo em aço inóx cilíndrico de 12 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro por onde o feixe iônico passa e sofre a neutralização.

Para evitar que o vapor venha a se esfriar e vá depositar nas paredes do tubo de neutralização prejudicando a passagem do feixe e diminuindo a eficiência de neutralização, o tubo é também aquecido por uma outra resistência blindada que o envolve externamente, semelhantemente ao reservatório.

Para alimentação das resistências de aquecimento são utilizadas duas fontes de tensão ajustáveis, sendo uma para resistência que envolve o reservatório e gera o vapor de sódio e a outra para a resistência que mantém câmara de neutralização aquecida. Com isso podemos controlar melhor o aquecimento em cada região. Para monitorar a temperatura no neutralizador foram utilizados dois termopares, sendo um instalado junto ao reservatório e o outro no tubo de neutralização. O neutralizador usado no nosso sistema de neutralização é todo confeccionado em aço inoxidável e a válvula seladora é de metal macio (latão) para garantir uma perfeita vedação do reservatório de sódio.



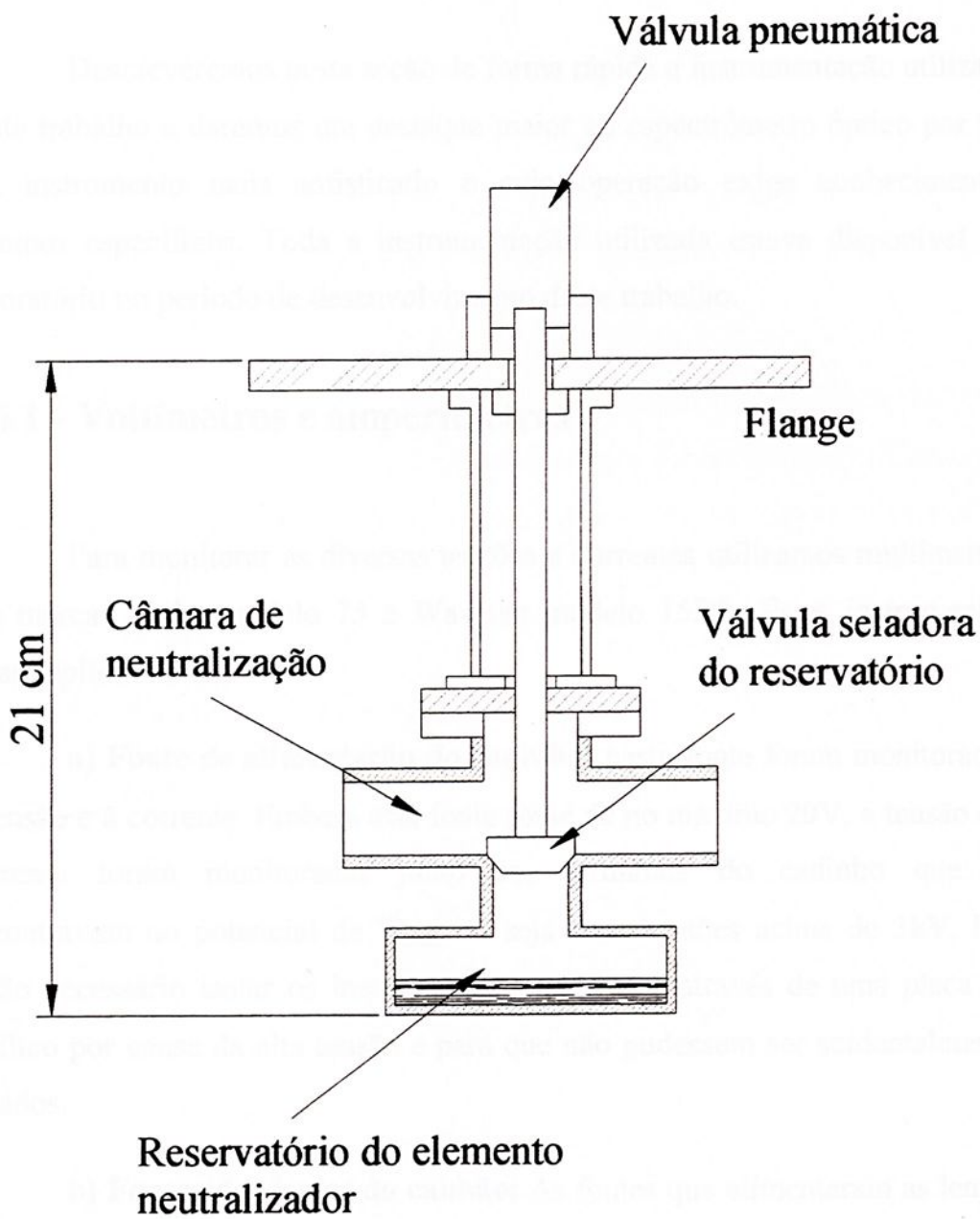


FIGURA 19 - Neutralizador de íons utilizado na SFLNR

4.6 - Instrumentação utilizada

Descreveremos nesta seção de forma rápida a instrumentação utilizada neste trabalho e daremos um destaque maior ao espectrômetro óptico por ser um instrumento mais sofisticado e cuja operação exige conhecimentos técnicos específicos. Toda a instrumentação utilizada estava disponível no laboratório no período de desenvolvimento deste trabalho.

4.6.1 - Voltímetros e amperímetros

Para monitorar as diversas tensões e correntes utilizamos multímetros das marcas Fluke modelo 75 e Wavetek modelo 15XL. Estes instrumentos foram aplicados em:

a) Fonte de alimentação do cadinho: nesta fonte foram monitoradas a tensão e a corrente. Embora esta fonte fosse de no máximo 20V, a tensão e a corrente foram monitoradas junto aos terminais do cadinho que se encontravam no potencial de V_{acel} , ou seja com tensões acima de 3kV. Foi então necessário isolar os instrumentos desta fonte através de uma placa de acrílico por causa da alta tensão e para que não pudessem ser acidentalmente tocados.

b) Fontes das lentes do canhão: As fontes que alimentaram as lentes do canhão e do sistema de extração e focalização do feixe possuíam voltímetros e amperímetros internos. Para alimentação da tensão de aceleração do canhão de íons (V_{acel}) foi utilizada uma fonte da marca Bertan modelo 215 com capacidade de 3000V/5 mA, para alimentação da lente-1 (V_1) utilizou-se uma fonte da Tectrol modelo TCA 3000-0,05 e para alimentação da lente-2 (V_2) utilizou uma fonte de marca Spellman modelo SL 150. Os instrumentos para monitorar as tensões e as correntes destas fontes não eram de precisão,

por isso foi feito uma calibração utilizando voltímetros de melhor precisão e gerado uma tabela, que foi utilizada para ajustar os valores de operação do sistema.

c) Fontes do neutralizador: No neutralizador foram usadas duas fontes de alimentação da Tectrol modelo TCA 120-2. Estas fontes possuem voltímetros e amperímetros de boa precisão e as tensões e correntes foram monitoradas através deles.

d) Sistema IIIP: No sistema IIIP a tensão de alimentação dos eletrodos do sistema de geração da descarga glow foi monitorado utilizando um multímetro Wavetek acoplado a uma ponta de prova especial para alta tensão.

4.6.2 - Medidores de pressão

Para monitorar o sistema de vácuo e a injeção de gás foram instalados na câmara de vácuo sensores de pressão da marca Edwards do tipo pirani modelo PRM10, pening modelo CP25 e um Ion Gauge e para leitura destes sensores foram utilizados controladores também da Edwards High Vacuum modelo 1105.

4.6.3 - Sensores de temperatura

Para medirmos a temperatura da fonte emissiva de ions utilizamos um pirômetro óptico portátil produzido pela Raytek modelo 2MSCB, que mede temperaturas utilizando detetor de infravermelho.

Para monitorarmos a temperatura no neutralizador foram instalados dois sensores de temperatura em duas posições diferentes no neutralizador. O termopar 1 foi instalado na parede externa ao tubo de neutralização e o



termopar 2 junto ao reservatório de sódio. Estes sensores são termopares do tipo k feitos de níquel e cromo (chromel).

Para a determinação da temperatura medimos as tensões nos terminais de saída de cada sensor com um multímetro Wavetek modelo 15XL na escala de milivolts e com auxílio de uma tabela de conversão da Omega Engineering Inc., fabricante de termopares, tínhamos o valor da temperatura em graus Celsius.

Para calibrar o nosso sistema de medida de temperatura utilizamos uma ponta especial devidamente calibrada acoplada ao termômetro digital. Retiramos o neutralizador da câmara de vácuo e instalamos o termômetro próximo ao termopar a ser calibrado, e na bancada do laboratório ligamos o sistema de aquecimento do neutralizador. Nas figura 20 e 21 temos as curvas de calibração dos termopares em relação ao termômetro. A comparação dos dados entre o termômetro calibrado e os termopares instalados no neutralizador resulta numa diferença de temperatura constante de cerca de 10% em relação ao valor tabelado, sendo que o termopar registrou sempre uma temperatura mais baixa que o termômetro. Esta diferença entre os dois instrumento se deve ao fato da fiação do termopar não ser compensada.

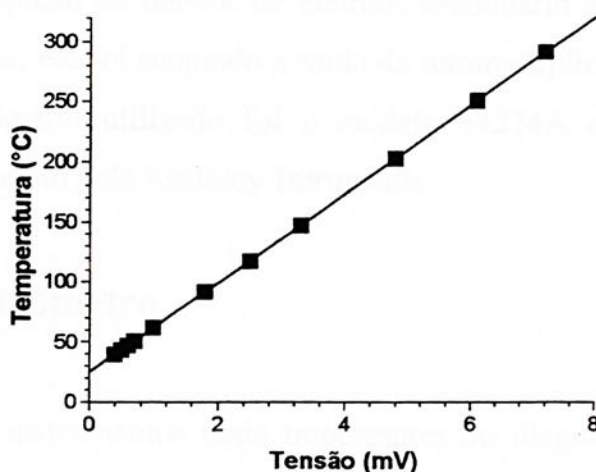


FIGURA 20 - Curva de calibração do termopar 1

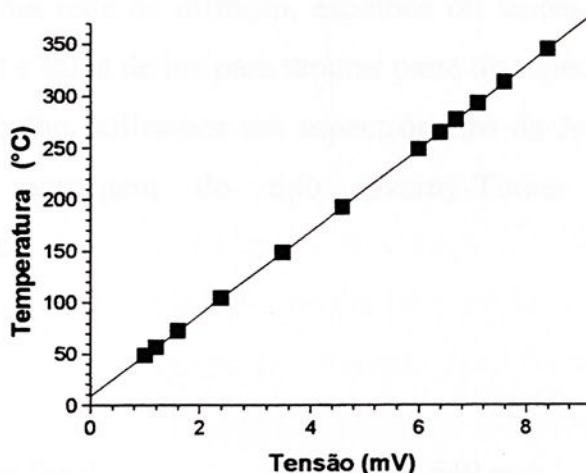


FIGURA 21- Curva de calibração do termopar 2

4.6.4 - Eletrômetro

O eletrômetro é um instrumento de alta precisão que permite medir correntes contínuas muito baixas. Com ele é possível medir correntes de mA até correntes da ordem de 10^{-12} A. Ele foi largamente utilizado neste trabalho na medida da corrente do feixe e na medida da intensidade de luz emitida pela colisão do feixe no gás neutro e no plasma. Para medir a corrente de íons do feixe ele foi acoplado ao detetor de elétrons secundário SED e para medir a intensidade de luz, ele foi acoplado a saída da fotomultiplicadora.

O eletrômetro utilizado foi o modelo 64274A de fabricação norte americana, produzido pela Keithley Instruments.

4.6.5 - Espectrômetro

Um dos instrumentos mais importantes no diagnóstico por feixe de lítio é o espectrômetro óptico.

Este instrumento tem a capacidade de separar uma pequena faixa de comprimento de onda de uma luz emitida por alguma fonte. Ele consiste

basicamente de uma rede de difração, espelhos ou lentes para focalização e fendas de entradas e saída de luz para separar parte do espectro desejado ^[1].

Neste trabalho utilizamos um espectrômetro da Jobim Yvon modelo HR640S, com montagem do tipo Czerny-Turner cujas principais características são:

- Distância focal 640 mm
- Rede de difração 110x110 mm plana com
1200 linhas /mm
- Abertura..... f/5.7
- Faixa de trabalho..... zero a 15000Å
- Dispersão..... 12Å/mm em 500 nm
- Precisão de leitura $\pm 0,5\text{Å}$ para zero a
15000 Å

Para sinal de luz muito fraco é comum acoplar ao espectrômetro uma fotomultiplicadora. Este dispositivo é capaz de converter um sinal de luz formado por apenas algumas centenas de fótons em um sinal elétrico com amplitude capaz de ser medido ^[1].

A fotomultiplicadora é uma válvula a vácuo formada por um conjunto de seções que permite dar ao sinal elétrico gerado pela luz um ganho proporcional ao número de estágios. Inicialmente a luz incide em um fotocatodo que ao receber a energia radiante produz fotoelétrons os quais são acelerados e guiados por lentes eletrostáticas até o primeiro eletrodo (dinodo)

e para os eletrodos seguintes passando por diversos estágios até atingir um anodo por onde o sinal é retirado. Ao incidir em cada eletrodo, os elétrons incidentes produzem elétrons secundários que também são acelerados aumentando a corrente, produzindo assim um ganho no sinal. Em cada dinodo a razão entre o número de fotoelétrons e o número de fótons incidente é conhecido como eficiência quântica (η) da fotomultiplicadora.

Acoplado ao espectrômetro foi utilizado uma fotomultiplicadora de fabricação japonesa, marca Hamamatsu e modelo R1246x cujas principais características são:

- Fotocatodo tipo..... bi-alkalino
- diâmetro do catodo..... 45 mm
- Número de estágios..... 14 estágios
- Eficiência quântica (η)..... 20%
- Material dos dinodos..... Sb-Cs
- Tempo de subida para 2500V..... 1,6 ns
- Faixa de trabalho 300 ~ 650 nm
- Resposta máxima em λ ~ 420 ± 30 nm
- Janela vidro borossilicato / Plano
côncava

4.7 - Sistema IIIP

O sistema de Implantação Iônica por Imersão em Plasma (IIIP) construído no LAP/INPE, foi utilizado como plasma alvo para aplicação do sistema de diagnóstico por espectroscopia com feixe de lítio. O sistema IIIP foi desenvolvido para pesquisa de modificações de superfícies de materiais utilizando plasma como fonte de íons. A eficiência do processo de implantação iônica depende das propriedades intrínsecas do plasma produzido, e o diagnóstico com o feixe de lítio permitirá no futuro caracterizar o plasma com precisão necessária ao tratamento adequado das superfícies de materiais em estudo.

O sistema IIIP desenvolvido no LAP/INPE é constituído basicamente por uma câmara de vácuo de geometria cilíndrica de 27 cm diâmetro e 40 cm de comprimento confeccionada em aço inoxidável, onde é produzido plasma por descarga *glow*, um gerador de pulsos de alta tensão e um sistema de injeção de gás. Dentro da câmara temos um suporte onde são fixadas as amostras ou substratos que terão suas superfícies modificadas .

A descarga *glow* ou luminescente é produzida no nosso sistema pela aplicação de uma diferença de potencial adequada entre eletrodo (anodo) e a câmara (catodo), e um gás a baixa pressão é alimentado próximo ao anodo. Medidas por sondas de Langmuir indicaram que a densidade do plasma gerado por descarga *glow* no sistema IIIP é da ordem de 10^{10} cm^{-3} [10].

Na figura 22 temos uma representação esquemática do experimento de implantação iônica, onde um substrato ou componente é imerso no plasma e nele são aplicados pulsos de alta tensão repetidamente, tipicamente da ordem de 10 kV, cerca de 5 -50 μ s de largura, e taxas de repetição da ordem de 10 Hz a 400 Hz.

Sob um pulso de alta voltagem que aparece entre o plasma e o porta substrato, a bainha se expande continuamente até que a tensão seja zerada. O

campo elétrico gerado na bainha acelera os íons daquela camada e posteriormente permite a extração e aceleração dos íons do plasma. A implantação ocorre na direção normal à superfície do substrato.

Na figura 23 temos uma foto da câmara utilizada no experimento IIIP. O sistema de vácuo desta câmara é constituído de duas bombas uma mecânica e uma difusora semelhante ao descrito para a SFLNR.

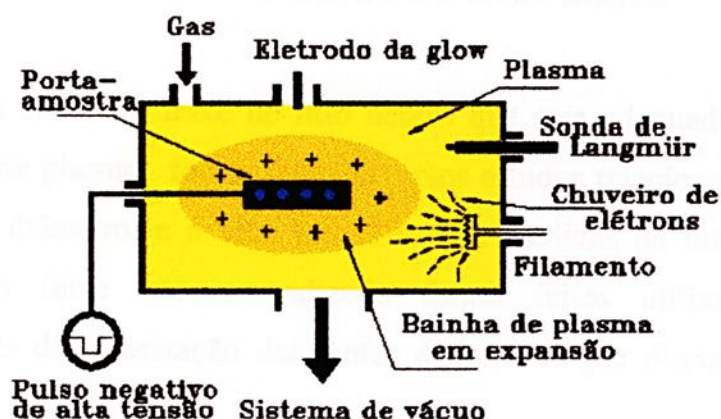


FIGURA 22 - Esquema do experimento de Implantação Iônica por imersão em Plasma (IIIP), do LAP/INPE, que utiliza descarga *glow*.

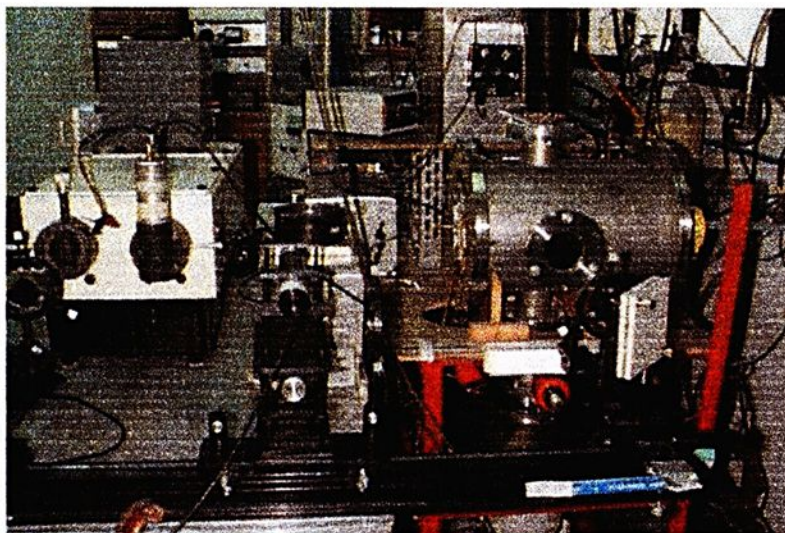


FIGURA 23 - Foto do experimento IIIP do LAP/INPE onde podemos observar a câmara de vácuo onde se produz a descarga *glow*.

Capítulo 5

Otimização do feixe iônico

Para obter um feixe de lítio neutro que seja adequado para uso em diagnóstico de plasma, foram feitos diversos estudos relacionados com a sua intensidade, diâmetro, e a vida útil. Testes e medidas da intensidade e do diâmetro do feixe não neutralizado foram feitos utilizando diversas configurações de polarização das lentes do canhão que discutiremos neste capítulo.

O objetivo principal nesta fase do nosso trabalho de desenvolvimento da SFLNR era obter as condições ideais de operação do sistema para que o feixe gerado nos permitisse quando aplicado ao gás e no plasma a ser diagnosticado, obter um sinal de luz com a maior intensidade e com a melhor resolução espacial possível. Uma das grandes dificuldades quando utilizamos este tipo de sonda, principalmente no nosso caso em que a energia do feixe é relativamente baixa, é distinguir o sinal de luz devido ao feixe e os outros sinais de luz presentes no plasma. Concentramos nossos esforços afim de obtermos um feixe que apresentasse a maior intensidade de corrente possível com o menor diâmetro, ou seja um feixe com alta densidade de corrente.

Para extrair, acelerar e focalizar o feixe de lítio, é utilizado um canhão constituído por um conjunto de lentes que são polarizadas com potenciais contínuos. Estas lentes podem ser eletrostáticas ou magnéticas, conforme já vimos anteriormente. Neste trabalho utilizamos um canhão descrito no capítulo 2 que tem geometria Pierce cujas lentes são eletrostáticas e

polarizadas na configuração conhecida como modo einzel. O conjunto formado pela fonte de Li^+ e o canhão foi instalado horizontalmente em uma câmara de vácuo, com um tubo de vôo para o feixe de $\sim 1,5$ m com diâmetro de ~ 15 cm.

Durante todas as medidas procuramos manter na câmara um vácuo abaixo de 2×10^{-5} Torr.

Não houve nesta fase uma preocupação em seguir qualquer modelo teórico quanto a extração e focalização, procuramos apenas variar sistematicamente os principais parâmetros de operação do sistema, tais como a temperatura da fonte, e as tensões de polarização das lentes do canhão.

Na fase inicial de estudos do comportamento do feixe de lítio iônico tínhamos como objetivo principal observar a variação sofrida pelo feixe em função das alterações dos parâmetros de operação do sistema. Fizemos uma série de medidas da intensidade de corrente e do diâmetro do feixe variando alguns parâmetros de operação do sistema tais como a temperatura da fonte emissiva, a energia do feixe, a tensão de extração e focalização

Para medirmos a intensidade da corrente de íons utilizamos a montagem do canhão de íons conforme foi descrito no capítulo 2, com suas respectivas lentes ligadas segundo o modo einzel. Inicialmente realizamos testes de extração do feixe de Li^+ com fonte de β -eucryptita pastosa, posteriormente substituímos a fonte por β -eucryptita vítrea.

Para detecção do feixe iônico e para medirmos a densidade de íons do feixe de lítio introduzimos na câmara de vácuo da SFLNR, dois detetores de íons, do tipo *Secondary Electron Detector* (SED), que interceptam o feixe perpendicularmente a sua trajetória. Estes detetores são discos confeccionados em cobre de 45 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura. As medidas das correntes devido aos íons coletados nos detetores foram feitas através de um amperímetro (Eletrômetro), capaz de medir correntes muito baixas (pico-Ampères). O diâmetro dos nossos detetores foram escolhidos de tal forma a capturar todos os íons do feixe de lítio.



Para podermos estudar o efeito dos parâmetros de operação do sistema SFLNR sobre o feixe ao longo da sua trajetória, foi instalado um detector a 20 cm da saída do canhão (detector 1), e instalado um outro detector a 1 metro do primeiro (detector 2), ambos com igual diâmetro e na mesma direção de deslocamento do feixe. O detector 1 era retrátil, de tal forma que para fazermos a leitura no segundo detector procedíamos a retração do primeiro sem dificuldade e sem a necessidade de abrir a câmara de vácuo.

Na figura 24 podemos observar o esquema do experimento para caracterização do feixe iônico que permitiu determinar os parâmetros ideais de operação para a SFLNR. Neste esquema mostramos as posições dos detectores e as principais instrumentações utilizadas durante a fase.

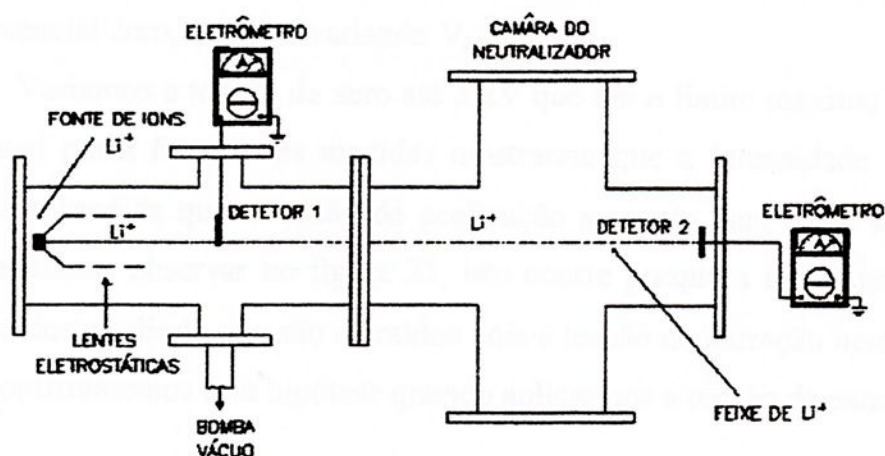


FIGURA 24 - Esquema geral do experimento para caracterização do feixe iônico

Apresentaremos a seguir algumas medidas feitas com feixe de Li^+ alterando os vários parâmetros de operação do sistema. Vamos considerar os vários casos de polarização do sistema de lentes do canhão de íons e o respectivo comportamento do feixe. Analisaremos a influência da temperatura da fonte sobre o feixe e por fim determinaremos pela análise da intensidade e o diâmetro do feixe, as condições ótimas de operação da SFLNR.

5.1 - Efeito da tensão de aceleração sobre o feixe

Afim de verificar o comportamento do feixe em função da variação da sua energia, foram feitas medidas da variação da corrente do feixe através do detetor 1 localizado a 20 cm do canhão, em função da variação da tensão de aceleração do canhão (V_{acel}). Para estas medidas trabalhamos com a fonte na forma pastosa, embora a corrente total de ions gerada seja menor que a obtida na fonte vítrea. Isto não invalida o nosso estudo pois estávamos apenas interessados no comportamento do feixe.

Apresentamos na figura 25 uma das curvas destas medidas. Para estas medidas fizemos vácuo na câmara até 10^{-5} Torr e então aquecemos o cadinho até $\sim 980^{\circ}\text{C}$ e mantivemos as lentes de foco e extração sem polarização, ou seja com potencial zero, e fomos variando V_{acel} .

Variamos a tensão de zero até 3 kV que era o limite máximo da fonte disponível nesta fase. Estas medidas mostraram que a intensidade do feixe aumenta a medida que a tensão de aceleração aumenta mas tende a saturar, como podemos observar no figura 25, isto ocorre porque a maior partes dos ions gerados no diodo não são extraídos pois a tensão de extração neste caso é zero. Confirmaremos esta hipótese quando aplicarmos a tensão de extração.

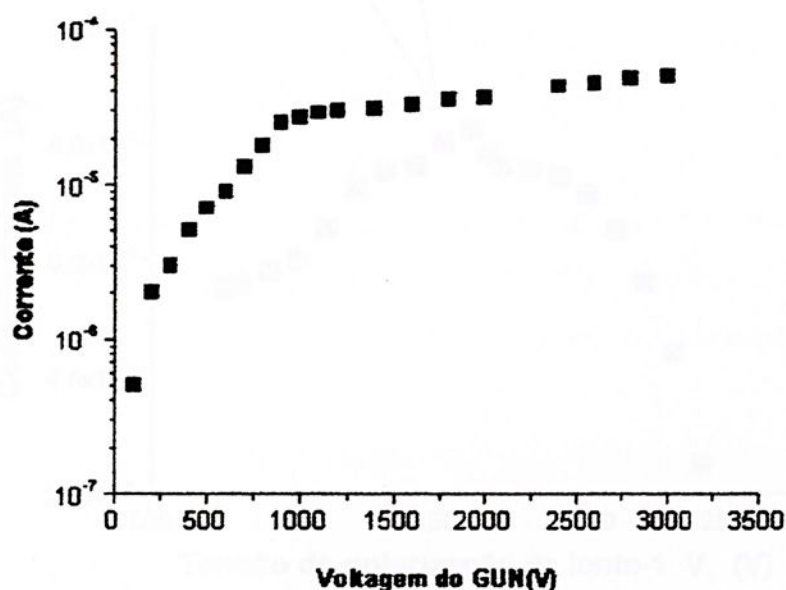


FIGURA 25 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 1 em função da voltagem de aceleração dos íons (V_{acc}).

5.2 - Efeito da tensão de polarização da lente-1 sobre o feixe

Para estudarmos o efeito da tensão de polarização da lente-1 (V_1) sobre o feixe, mantivemos V_{acc} em 3 kV e conservamos as mesmas condições anteriores e fizemos V_1 variar e monitoramos a corrente no detector 1. Em V_1 de $\sim 1,7$ kV obtivemos a corrente máxima que foi de $\sim 80 \mu\text{A}$. Na figura 26 temos a curva desta medida. Acreditamos que em $V_1 \sim 1,7$ kV todos os íons gerados pela fonte são extraídos, ou seja temos a máxima extração do feixe.

Ainda nas mesmas condições anteriores, e mantendo a lente de foco sem polarização medimos a corrente no detector 2, distante um metro do primeiro detector. Obtivemos uma corrente muito baixa da ordem de $10 \mu\text{A}$.

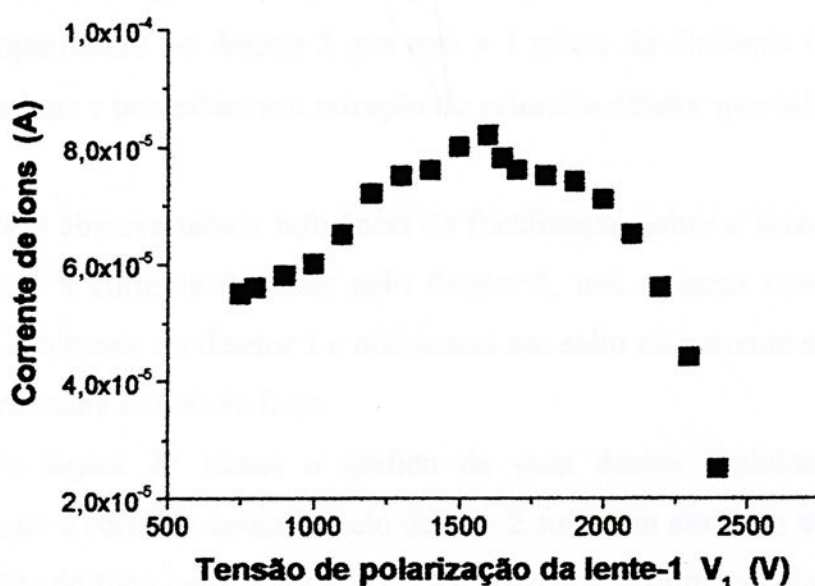


FIGURA 26 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 1 em função da voltagem de polarização da lente-1 (V_1).

5.3 - Efeito da tensão de polarização da lente-2 sobre o feixe

Para estudarmos o comportamento de feixe em relação a polarização da lente de foco fixamos alguns dos parâmetros de operação do sistema tais como: a potência de aquecimento do cadinho P_H em 28,7 W, a tensão V_{acc} foi mantida em 3 kV e V_1 em 1,9 kV. Aplicamos a tensão de foco gradativamente, variando-a de zero até o limite máximo da fonte que neste caso era de 3 kV também. Observamos que no detector 1 a intensidade da corrente se manteve praticamente constante independente da variação da tensão de foco. Isto já era por nós esperado, pois o detector 1 está a apenas 20 cm do canhão e nesta distância o efeito de focalização é muito pequeno comparado com as dimensões do nosso coletor e não pôde ser sentida a variação da intensidade de corrente de íons. Testes preliminares revelaram que a distância focal está acima desta distância.

Para investigarmos a ação da polarização da lente de foco instalamos o pico-amperímetro no detector 2 que está a 1 metro de distância da saída do canhão de íons e procedemos a retração do primeiro detector que interceptava o feixe.

Para observarmos a influência da focalização sobre o feixe, medimos inicialmente a corrente coletada pelo detector 2, nas mesmas condições que medimos a corrente no detector 1 e obtivemos um salto na corrente de íons para uma determinada tensão de foco.

Na figura 27 temos o gráfico de uma destas medidas. Podemos observar que a corrente coletada pelo detector 2 sofre um aumento significativo para tensões de foco entre 2,0 kV a 2,3 kV. Isto nos permite concluir que para as condições acima preestabelecidas, o feixe tende a convergir para o coletor quando aplicamos V_{FOCO} neste intervalo. Para tensões abaixo ou acima deste valor provavelmente o feixe deve divergir muito ou convergir mais adiante, de tal forma que apenas uma pequena parcela do feixe é captada pelo coletor ou o feixe por algum motivo sofre um desvio de sua trajetória e apenas tangencia o coletor. Um estudo mais detalhado sobre o diâmetro do feixe, que mostraremos mais adiante, nos permitirá obter maiores informações sobre o comportamento do feixe em relação à polarização da lente de foco.

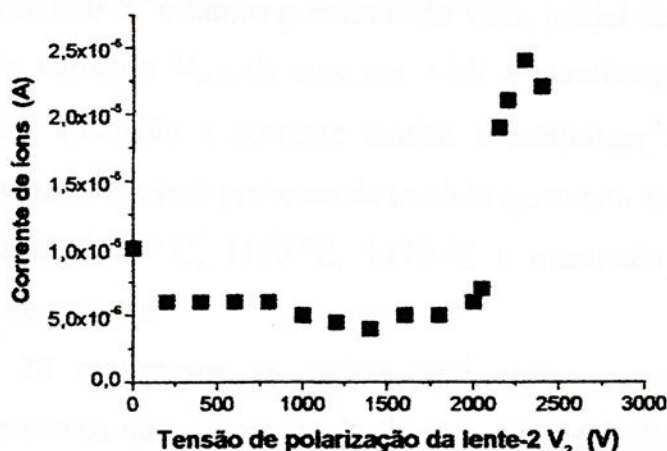


FIGURA 27 - Gráfico da corrente de íons coletados no detector 2 em função da voltagem de polarização da lente-2 (V_2).

5.4 - Influência da temperatura do cadinho na intensidade da corrente do feixe

Antes de estudarmos o comportamento do diâmetro do feixe, vamos verificar a influência da temperatura na extração de feixe, ou seja, a influência que a temperatura do cadinho tem sobre a intensidade de íons extraídos da fonte de β -eucryptita.

Como o nosso objetivo era de verificar somente se a temperatura da fonte afeta a intensidade da corrente de íons extraídos, utilizamos o detetor 1, porque neste detetor toda a corrente extraída é coletada. Para determinarmos a temperatura da fonte de íons, valemo-nos da curva de potência do cadinho que foi apresentada no capítulo 2. Com ela podemos ajustar a temperatura com uma margem de erro pequena ajustando a potência do cadinho.

Primeiramente abaixamos a temperatura do cadinho ajustando a potência num valor bem baixo e esperamos a temperatura estabilizar por uns trinta minutos, em seguida elevamos a potência do cadinho até obtermos uma temperatura de $\sim 1030^\circ\text{C}$.

Pudemos observar que o β -eucryptita começa a emitir íons de lítio a partir de 800°C . Em 860°C estamos próximos do valor inicial de emissão da nossa fonte. Fomos variando V_{acel} de zero até 3 kV e mantivemos V_1 e V_2 desligado. Para essa condição a corrente tendeu a estabilizar em $\sim 2\ \mu\text{A}$. Repetimos várias vezes o mesmo processo de medida ajustando a temperatura em 1030°C , 1050°C , 1130°C , 1150°C , 1170°C e mantendo sempre os demais parâmetros constantes.

Na figura 28 mostramos as curvas para cada temperatura aqui mencionadas. Observamos que a corrente de íons aumenta significativamente com o aumento da temperatura da fonte emissiva a partir de 1030°C . Mas a corrente em função da tensão de aceleração dos íons (V_{acel}) aumenta até certo limite, onde então começa a saturar. Este ponto de saturação da corrente de

ions depende da temperatura. Isto ocorre porque a fonte emissora de ions não consegue manter uma emissão continuamente crescente, isto é uma limitação física da fonte.

A dependência da corrente de saturação com a temperatura está coerente com a equação de Richardson ^[5], que nos dá a corrente máxima, $I_{\max}$, obtida para uma fonte em função da temperatura:

$$I_{\max} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right) \quad (5.1)$$

Onde:

A - constante de Dushman que depende da superfície emissora e no nosso caso vale $5,3 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$;

T - temperatura da fonte em Kelvin;

k - constante de Boltzmann ($8,6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$);

$e\Phi$ - é a função trabalho, dada em eV, obtida a partir da inclinação da reta do gráfico $\ln I/T^2$ versus $1/T$.

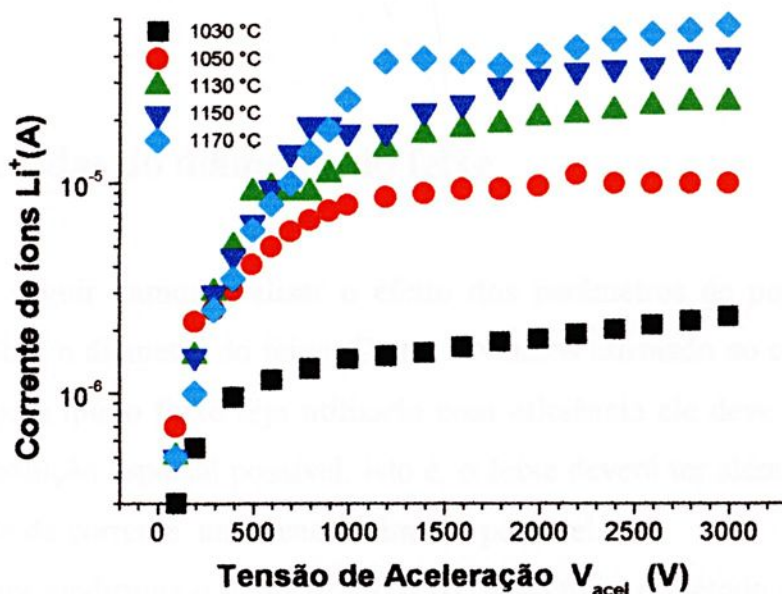


FIGURA 28 - Curvas das correntes de íons coletadas em função da tensão de aceleração V_{acel} para diversas temperaturas

O limite da temperatura que podemos trabalhar com a nossa fonte depende de dois fatores: 1) o β -eucryptita tem seu ponto de fusão em $\sim 1300^\circ \text{C}$. Se atingirmos a temperatura de fusão, o β -eucryptita escorre do cadinho devido a posição em que este foi instalado e perde-se a emissão da fonte. 2) a potência máxima que o cadinho pode suportar sem danificar-se. Este dado importante do cadinho não foi fornecido pelo fabricante e por experiência observamos que este fator variava de um cadinho para outro mas estava próxima de $\sim 50 - 70 \text{W}$.

Na fase inicial da análise das características do feixe de lítio produzido no LAP/INPE, conseguimos avaliar a dependência da intensidade da corrente de íons do feixe e os parâmetros de operação do sistema de geração, extração, aceleração e focalização do feixe. Conseguimos determinar para a fonte em uso de β -eucryptita na forma pastosa as condições em que o feixe apresentava a maior intensidade de corrente. Passaremos a seguir a

analisar o efeito dos parâmetros de operação do sistema sobre o diâmetro do feixe

5.5 - Medidas do diâmetro do feixe

A seguir vamos analisar o efeito dos parâmetros de polarização do sistema sobre o diâmetro do feixe. Como havíamos afirmado no começo deste capítulo, para que o feixe seja utilizado com eficiência ele deve apresentar a melhor resolução espacial possível, isto é, o feixe deverá ter além de uma alta intensidade de corrente um menor diâmetro possível.

Para medirmos o diâmetro do feixe utilizamos o método da varredura transversal do feixe por coletor de íons. Esta técnica consistiu em instalarmos um detetor de feixes móvel (detetor 3), constituído por uma haste de cobre instalada dentro da câmara de vácuo a 80 cm do canhão de íons que interceptava o feixe transversalmente. Ligamos no detetor 3 o pico-amperímetro e através de uma escala graduada em milímetro, podíamos medir o deslocamento do detetor perpendicular ao feixe e no sentido vertical, conforme podemos observar na figura 29. Juntamente com a medida do deslocamento medimos a corrente de íons total coletada no detetor 2, com isso conseguimos a determinação direta do diâmetro do feixe e de seu perfil bem como a sua densidade.



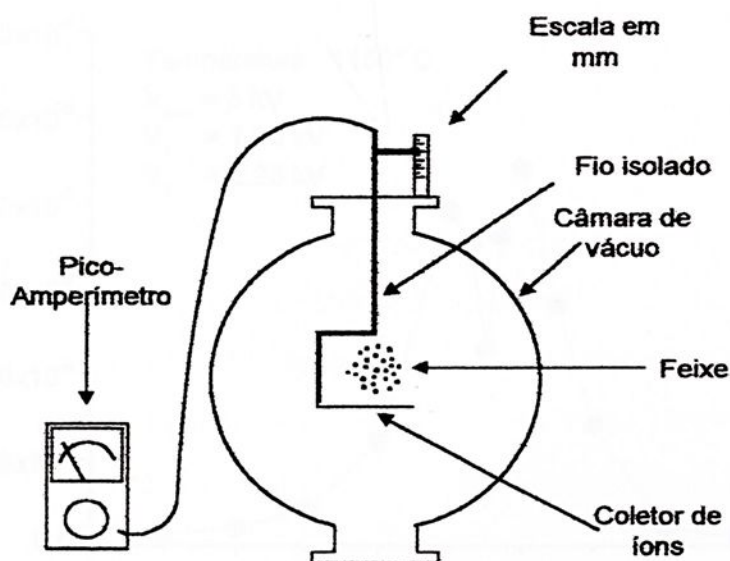


FIGURA 29 - Desenho esquemático da técnica de medida do diâmetro do feixe

Ajustamos as condições de operação do sistema em: $V_{\text{acel}} = 3 \text{ kV}$, $V_1 = 1,95 \text{ kV}$ e $V_2 = 2,25 \text{ kV}$ para uma potência de cadinho de $\sim 29 \text{ W}$ ($\sim 1150^\circ \text{C}$). Nesta condição o feixe apresentava máxima intensidade de corrente no detector 2 e obtivemos para este feixe um diâmetro de $\sim 2,5 \text{ cm}$ máximo a meia altura conforme podemos observar na figura 30.

Podemos observar que o feixe neste caso apresentava um perfil anular. Para esta potência, a fonte de lítio em uso apresenta um aquecimento não homogêneo. Observações visuais permitiram detectar uma mancha escura na região central do cadinho o que implica que ele estava mais quente nas bordas, produzindo um feixe anular. Para temperaturas maiores ocorreu o preenchimento do feixe, veja a figura 31, onde elevamos a temperatura para 1170°C . Isto está de acordo com o aquecimento mais homogêneo da fonte. Neste caso obtivemos um *Full Width at Half Maximum* (FWHM) de $1,5 \text{ cm}$.

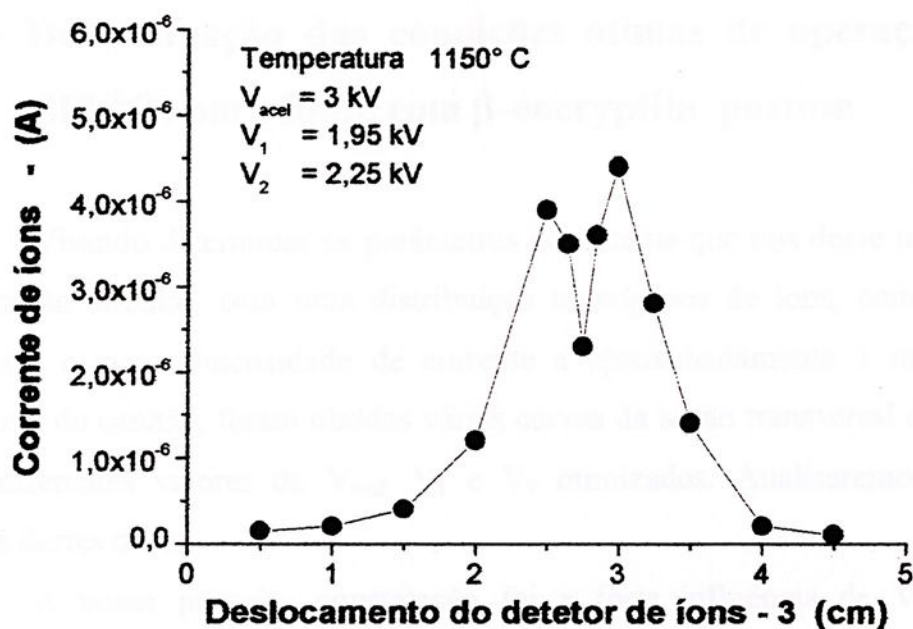


FIGURA 30 - Gráfico da corrente de feixe versus o deslocamento do detector 3

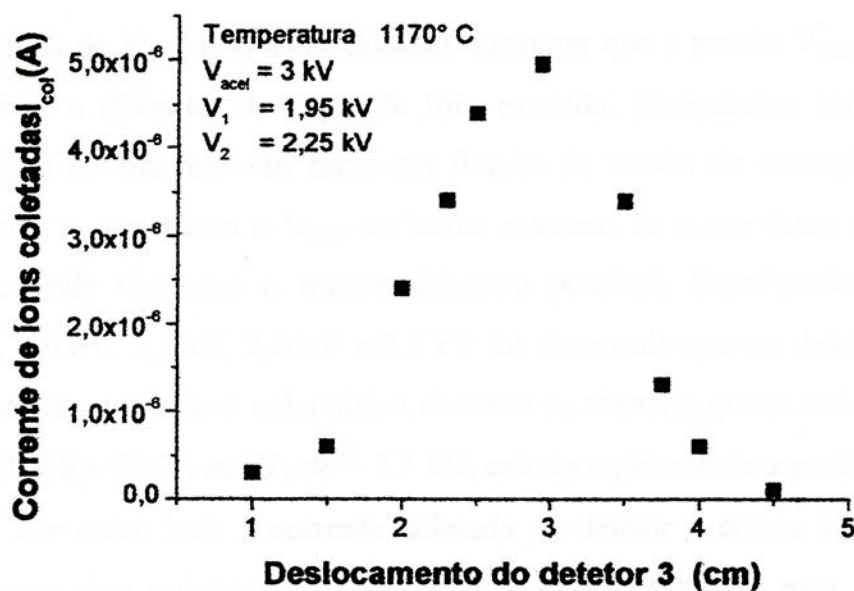


FIGURA 31 - Gráfico da corrente do feixe versus o deslocamento do detector 3 para uma temperatura da fonte de íons de 1170° C

5.6 - Determinação das condições ótimas de operação da SFLNR para fonte com β -eucryptita pastosa

Visando determinar os parâmetros do sistema que nos desse um feixe com seção circular, com uma distribuição homogênea de íons, com menor diâmetro e maior intensidade de corrente a aproximadamente 1 metro de distância do canhão, foram obtidas várias curvas da seção transversal do feixe para diferentes valores de V_{acel} , V_1 e V_2 otimizados. Analisaremos agora alguns destes casos.

A nossa primeira constatação foi a forte influência de V_{GUN} no diâmetro do feixe. Comparando o resultado apresentado anteriormente onde usamos $V_{\text{acel}} = 2 \text{ kV}$, $V_1 = 2,2 \text{ kV}$ e $V_2 = 0 \text{ V}$ para $T \sim 1150^\circ \text{ C}$, obtivemos $12 \mu\text{A}$ no detector 2 e um feixe extremamente grosso. O diâmetro total deste feixe foi de 4 cm e o diâmetro a meia altura da curva de $\sim 3 \text{ cm}$, um contraste com o caso de V_{acel} de 3 kV. Pudemos constatar que a tensão V_{acel} influencia fortemente o diâmetro do feixe de lítio extraído. Procuramos então fazer a otimização do diâmetro do feixe em função da tensão de extração V_1 para diferentes V_2 mantendo o V_{acel} no limite máximo de nossa fonte que era de 3 kV, e onde tínhamos o menor diâmetro possível. Escolhendo $V_2 = 0 \text{ V}$, 0,5 kV, 1,0 kV, 1,5 kV, 2,0 kV e 2,3 kV foi observado que no detector 1 (onde toda corrente extraída é coletada) a corrente se mantém quase constante e da ordem de 40 a 70 μA até V_1 de $\sim 2,3 \text{ kV}$, caindo rapidamente a partir daí.

Por outro lado a corrente coletada no detector 2 cresce até um valor ótimo com pico próximo a $V_1 \sim 2,3 \text{ kV}$ e caindo a seguir para valores de $V_2 < 2 \text{ kV}$. Conforme podemos observar na figura 32, com $V_2 = \sim 2,3 \text{ kV}$ desaparece a corrente coletada no detector 2 conforme constatado anteriormente e a corrente se mantém praticamente constante até cair em $V_1 > 2,3 \text{ kV}$.



A queda acentuada da corrente para V_1 acima de 2,3 kV reflete provavelmente a queda da tensão real de extração quando $V_{\text{acel}} - V_1 < 700\text{V}$, como já havíamos constatado anteriormente, no gráfico da figura 26 para a temperatura de 1150°C .

Por outro lado o pico de corrente para tensões de V_1 abaixo de 2,3 kV é devido provavelmente ao efeito de focalização do feixe. Mesmo no caso da figura 30, onde $V_2 = 0$ o efeito de V_1 alto deve focalizar o feixe melhor do que com V_1 baixo.

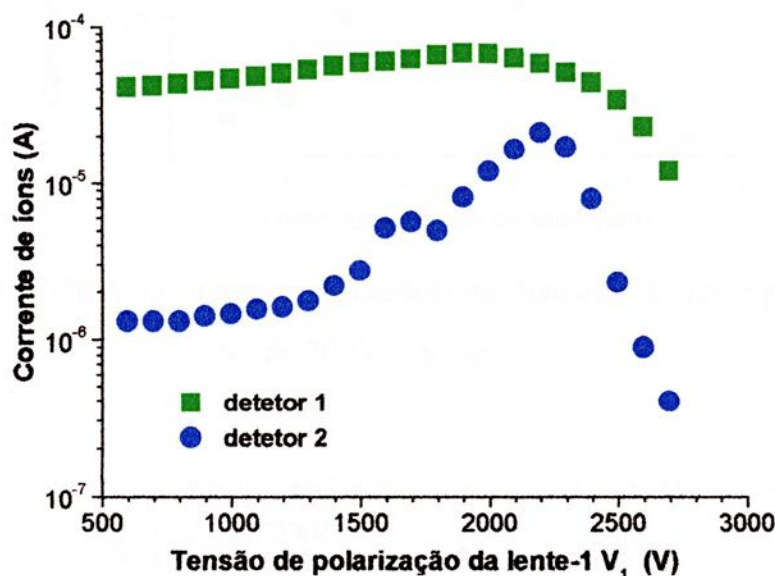


FIGURA 32 - Gráfico da variação da intensidade de corrente do feixe versus tensão de Polarização da lente-1 (V_1)

Para o melhor entendimento do porquê da constância da corrente de feixe para $V_2 = 2,3\text{ kV}$, foram feitas várias medidas do diâmetro do feixe, mantendo V_2 sempre em 2,3 kV como podemos observar nas figuras 33, 34 e 35.

Para V_1 de 700 V obtivemos um feixe com diâmetro de 1,5 cm para $V_1 = 1,7\text{ kV}$ o diâmetro era de 1,0 cm e para $V_1 = 2,2\text{ kV}$ o diâmetro ficou

menor que 1,0 cm. Percebe-se então que a tendência do diâmetro do feixe é ir diminuindo à medida que a tensão de extração vai crescendo até 2,3 kV. A redução do diâmetro do feixe se deve ao aumento de V_2 , ou seja a focalização do feixe melhora à medida que V_1 aumenta.

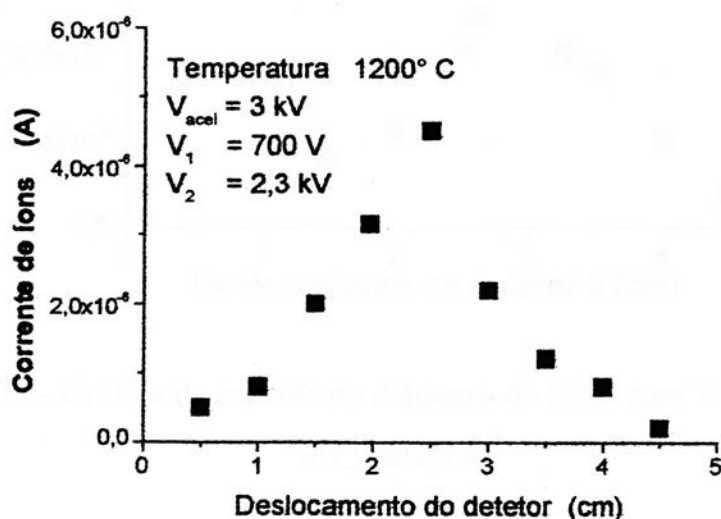


FIGURA 33 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 700V e V_2 de 2,3 kV

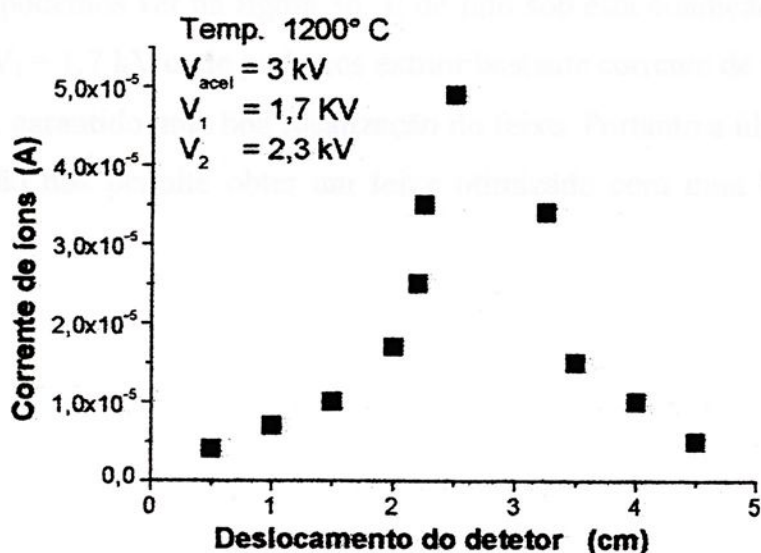


FIGURA 34 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 1,7 kV e V_2 de 2,3 kV

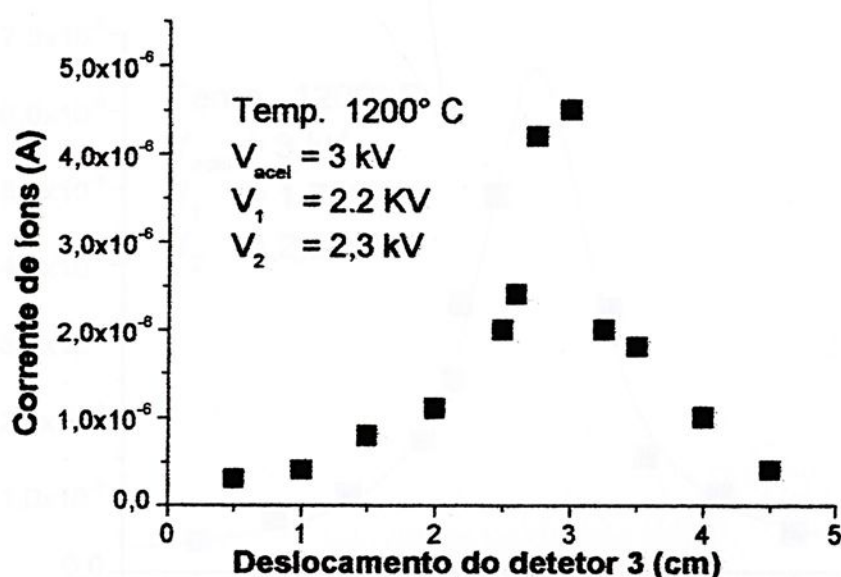


Fig. 35 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe para V_1 de 2,2 kV e V_2 de 2,3 kV

Uma análise do perfil do feixe nos permite constatar que para $V_1 = 1,7 \text{ kV}$ a distribuição da intensidade da corrente ao longo do diâmetro do feixe nos parece fornecer uma distribuição Lorentziana mais bem comportada, conforme podemos ver na figura 36. E de fato sob esta condição, há uma ddp de $V_{\text{acel}} - V_1 = 1,7 \text{ kV}$ onde podemos extrair bastante corrente de ions e com V_2 de 2,3 kV, garantido uma boa focalização do feixe. Portanto a última condição de operação nos permite obter um feixe otimizado com uma boa resolução espacial.

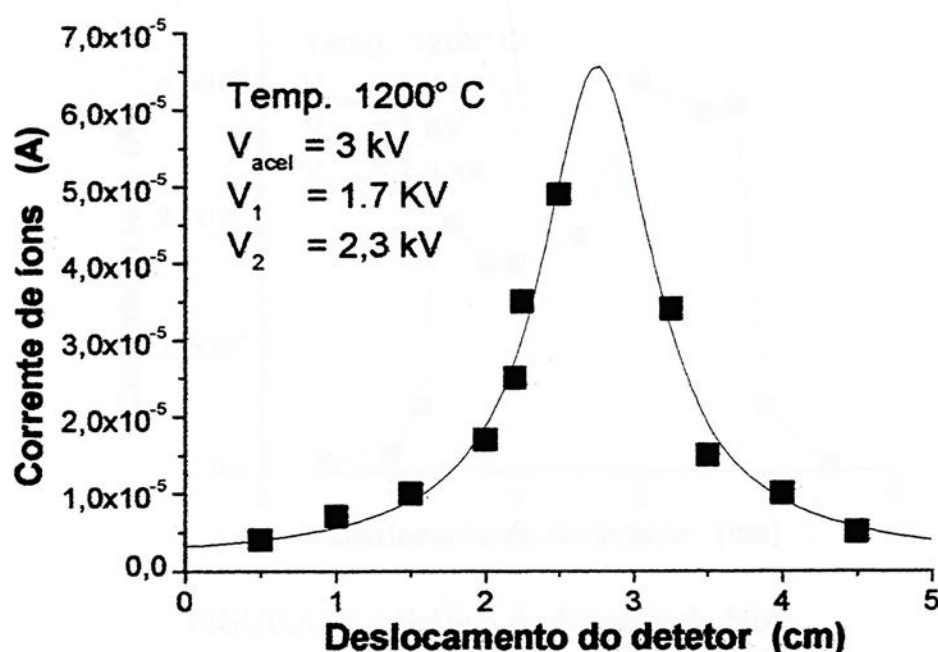


FIGURA 36 - Gráfico da medida do diâmetro do feixe onde podemos observar uma distribuição Lorentziana mais bem comportada.

Para completar nossos estudos sobre a influência da tensão de foco sobre o feixe medimos o diâmetro do feixe para $V_2 < 2,3 \text{ kV}$. Vimos que para $V_1 = 2,3 \text{ kV}$ e $V_2 = 1 \text{ kV}$ e V_{acel} de 3 kV , o feixe tinha um diâmetro total de $\sim 3 \text{ cm}$ a meia altura da curva, conforme se pode observar na figura 37. Já para medidas do diâmetro fora da região de pico com $V_1 = 700 \text{ V}$ e $V_2 = 1 \text{ kV}$ o diâmetro é maior ainda, ficando acima de 5 cm conforme podemos observar na figura 38. Podemos observar que o feixe nestes casos não é simétrico apontando mais para cima do eixo de simetria. Provavelmente, a divergência do feixe faz com que ele fique maior que o tubo de propagação e então o feixe bate nas paredes do tubo e acaba tendo seu perfil total alterado.

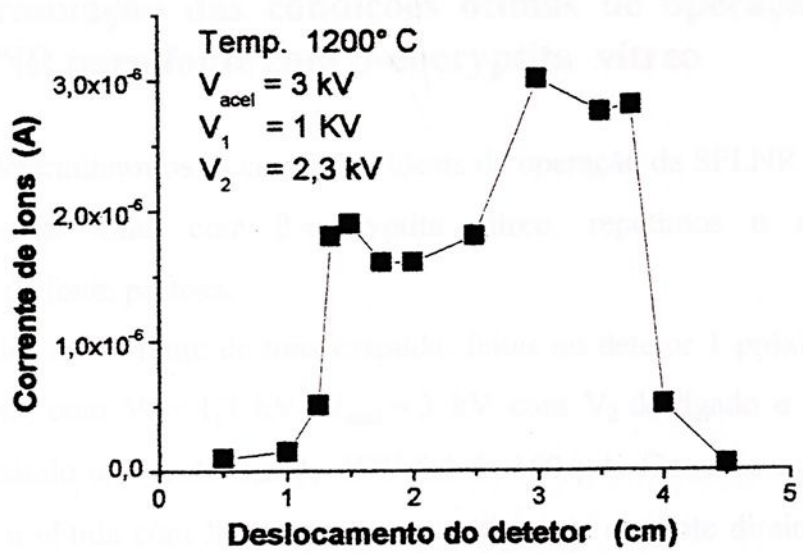


FIGURA 37 - Gráfico do diâmetro do feixe

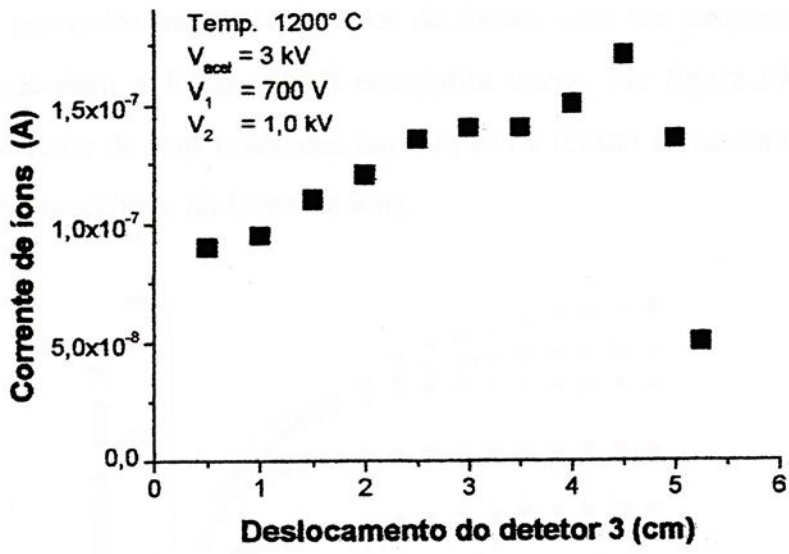


FIGURA 38 - Medidas do diâmetro do feixe fora da região de otimização

5.7 - Determinação das condições ótimas de operação da SFLNR para fonte com β -eucryptita vítrea

Para determinarmos as condições ideais de operação da SFLNR para o caso de uso da fonte com β -eucryptita vítrea, repetimos o mesmo procedimento da fonte pastosa.

Medidas da corrente de íons extraída, feitas no detector 1 próximo ao canhão de íons, com $V_1 = 1,7$ kV, $V_{\text{acel}} = 3$ kV com V_2 desligado e com o cadinho dissipando uma potência de 35W foi de 160 μ A. Corrente esta bem maior do que a obtida com fontes pastosas, porém esta corrente diminuiu de intensidade rapidamente após algumas horas, indo para 60 μ A. Ainda assim este valor de corrente está relativamente alta no detector 2 (~ 30 μ A) comparativas às condições otimizadas anteriormente.

Os gráficos da corrente coletada no detector 1 em função da variação de V_{acel} são parecidos para os dois tipos de fontes, com um pequeno aumento na intensidade para a fonte com β -eucryptita vítrea. Na figura 39 temos as curvas de corrente de íons coletadas em função da tensão de aceleração (V_{acel}) para várias temperaturas da fonte de íons.

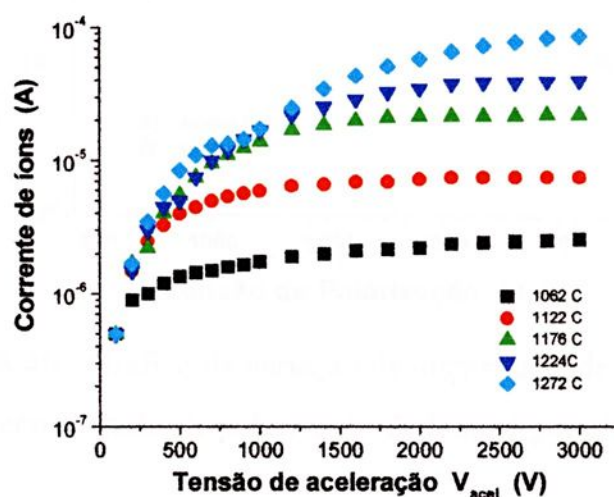


FIGURA 39 - Curvas das correntes de íons coletadas em função da tensão de aceleração V_{acel} para fonte vítrea

Na figura 40 temos um gráfico da medida da intensidade de íons coletada nos detectores 1 e 2 em função da variação da tensão de extração (V_1) para fonte de β -eucryptita vítrea, feitas nas mesmas condições da fonte pastosa com $V_2 = 0$. Comparando estes resultados com a do gráfico da figura 32 observamos que elas são parecidas com uma leve vantagem para a fonte vítrea principalmente no detector 2. Também podemos notar que os valores de pico da corrente são obtidos com valores de tensão um pouco maior.

Constatamos que para focalização do feixe obtido com fonte vítrea, houve a necessidade de ajustar V_2 entre 2,3 kV a 2,5 kV, o qual talvez seja devido a maior corrente de íons no detector 2. Na figura 41 temos a gráfico da corrente de íons obtida no detector 1 e 2 em função da tensão de polarização V_2 , onde para esta medida mantivemos V_{acel} em 3 kV, e V_1 de 1,7 kV.

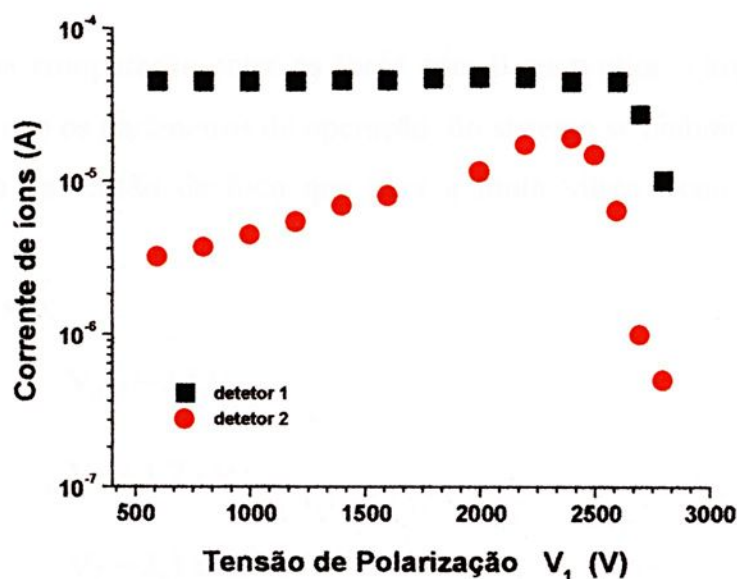


FIGURA 40 - Gráfico da variação da intensidade de corrente do feixe versus tensão de polarização da lente-1 para fonte vítrea

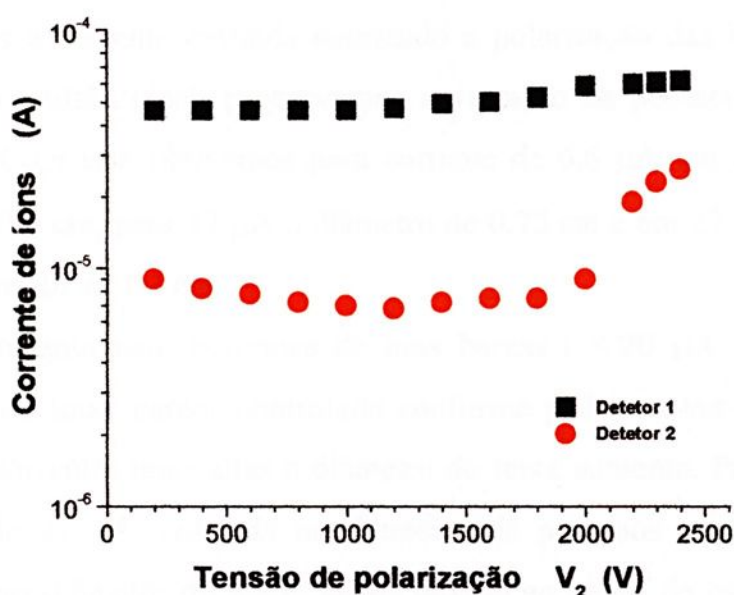


FIGURA 41 - Gráfico da intensidade de corrente do feixe versus tensão V_2 para fonte vítrea

Numa comparação entre as fonte com β -eucryptita vítrea e pastosa, constatamos que os parâmetros de operação do sistema se mantêm os mesmos com exceção da tensão de foco que para a fonte vítrea ficou ligeiramente maior.

Eles são:

$$V_{\text{acel}} = 3 \text{ kV}$$

$$V_1 = 1,7 \text{ kV}$$

$$V_2 = 2,3 \text{ a } 2,5 \text{ kV}$$

A diferença básica entre a fonte com β -eucryptita vítrea e pastosa que pudesse alterar o perfil do feixe é a densidade de corrente extraída. Para isso fizemos um estudo utilizando a fonte vítrea. Mantendo as condições de operação do SFLNR dentro do padrão acima determinado realizamos diversas

medidas do diâmetro do feixe para diferentes densidades de corrente. Para alterarmos a corrente extraída mantendo a polarização das lentes do canhão dentro do padrão ideal, promovemos a variação da potência dissipada pelo cadinho. Com isso obtivemos para corrente de $6,6 \mu\text{A}$ um diâmetro a meia altura de $0,8 \text{ cm}$, para $17 \mu\text{A}$ o diâmetro de $0,75 \text{ cm}$ e em $27 \mu\text{A}$ o diâmetro a meia altura foi de $1,4 \text{ cm}$.

Portanto para correntes de íons baixas ($< 20 \mu\text{A}$ no detector 1), o diâmetro do feixe parece controlado conforme podemos ver nas figuras 42 e 43. Para correntes mais altas o diâmetro do feixe aumenta. Para uma corrente de íons de $27 \mu\text{A}$, coletada no detector 2 já podemos perceber um ligeiro aumento no diâmetro do feixe, talvez devido ao efeito de carga espacial. Na Figuras 44 temos a medida do diâmetro do feixe em função da corrente de íons para corrente de $27 \mu\text{A}$, onde comparando com os gráficos das figuras 42 e 43 podemos notar o aumento do diâmetro.

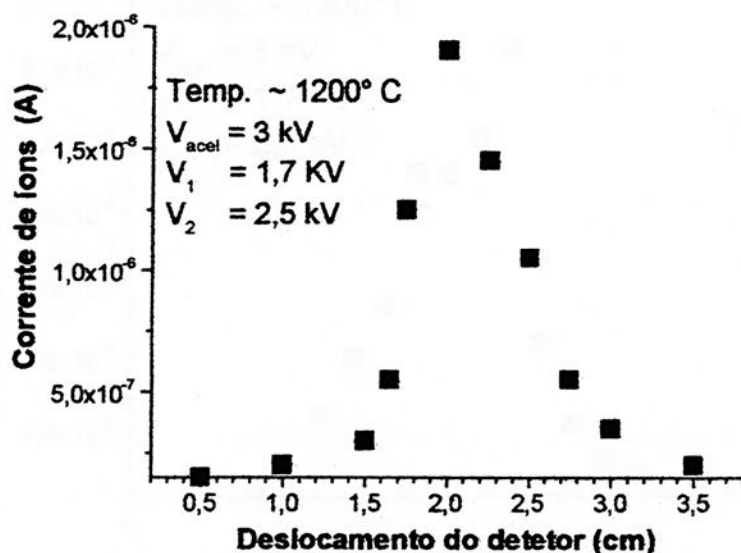


FIGURA 42 - Gráfico do diâmetro do feixe para corrente coletada no detector 2 de $6,6 \mu\text{A}$

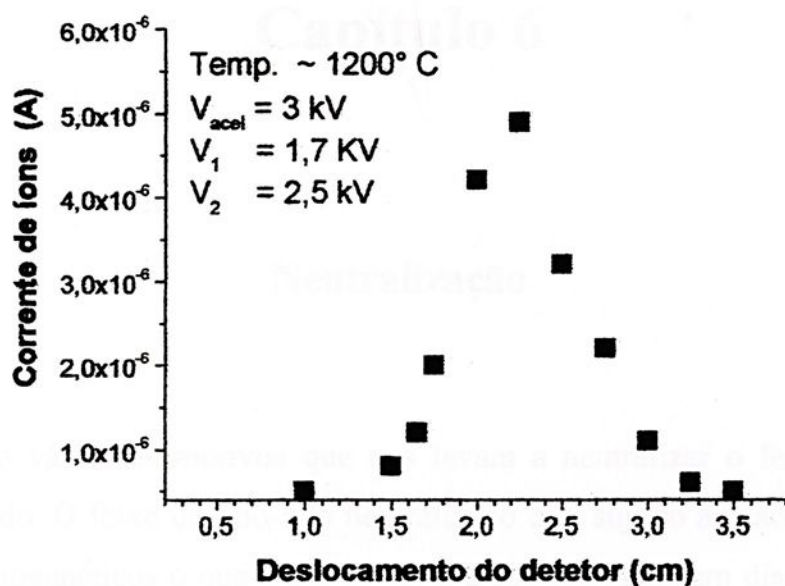


FIGURA 43 - Gráfico do diâmetro do feixe para
corrente coletada no detector 2 de 17 μA

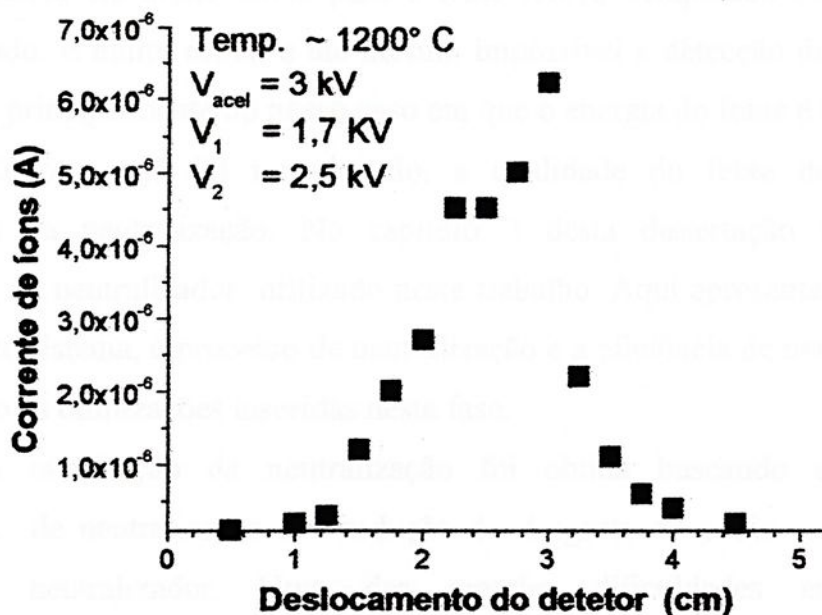


FIGURA 44 - Gráfico do diâmetro do feixe para
corrente coletada no detector 2 de 27 μA

Capítulo 6

Neutralização

São vários os motivos que nos levam a neutralizar o feixe de lítio iônico obtido. O feixe de lítio não neutralizado está sujeito a ação de campos elétricos e magnéticos o que torna inviável a sua aplicação em diagnóstico de plasmas onde há tais campos, como por exemplo, em máquinas de confinamento magnético e até mesmo em sistema IIIP onde as amostras são pulsadas com alta tensão. Outro fator importante que nos levam a neutralizar o feixe é a relação de luz (sinal /ruído) do feixe iônico quando injetado em plasma, sendo ela muito baixa para o feixe iônico comparado com o feixe neutralizado. É muito difícil e até mesmo impossível a detecção da sua linha emissiva, principalmente no nosso caso em que o energia do feixe é baixa.

Conforme já foi mencionado, a qualidade do feixe depende da eficiência da neutralização. No capítulo 2 desta dissertação fizemos a descrição do neutralizador utilizado neste trabalho. Aqui apresentamos como operar este sistema, o processo de neutralização e a eficiência de neutralização bem como as otimizações inseridas nesta fase.

A otimização da neutralização foi obtida buscando a máxima eficiência de neutralização e a redução do desgaste do sódio usado como elemento neutralizador. Uma das grandes dificuldades encontradas inicialmente quanto ao processo de neutralização do feixe, era a baixa vida útil da carga do neutralizador. Por isso procuramos determinar a vida útil da carga e criar um procedimento que permitisse aumentar esta vida útil. Outro problema encontrado, foi que operado o sistema de forma inadequada

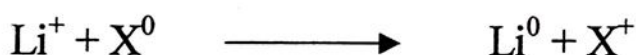
ocorreria uma alta contaminação da câmara de vácuo com Na e NaOH. Experiências com o neutralizador operando continuamente mostraram que regiões próximas do neutralizador ficaram impregnadas de substâncias derivadas do elemento de neutralização. Para tentar amenizar este problema trabalhamos com o neutralizador em condições em que a quantidade de vapor de sódio é a mínima necessária para que haja 100 % de neutralização do feixe.

Ao determinarmos as condições ideais de operação do neutralizador conseguimos aumentar a vida útil da carga de sódio, diminuindo com isso a necessidade de abrirmos a câmara de vácuo muitas vezes para reposição da carga de sódio, e evitando o problema do excesso de contaminação da câmara.

6.1 Processo de neutralização

Vamos discutir agora o processo de neutralização do ponto de vista físico.

A neutralização do feixe de lítio é obtida através do processo da transferencia de carga eletrônica.



Onde:

X – elemento químico doador da carga eletrônica

No nosso neutralizador utilizamos sódio metálico (Na) por apresentar maiores vantagens do que outras substâncias neutralizadoras, conforme veremos no decorrer deste capítulo. A boa neutralização do feixe depende da substância utilizada, da temperatura da célula neutralizadora e do desgaste do elemento neutralizador.

McCornick relata em seu trabalho ^[25] os valores de pressão e temperatura de neutralização para um sistema muito semelhante ao nosso. Para uma célula neutralizadora como o da figura 45, a fração do feixe de Li^+ que é neutralizado quando passa por ela é dada por:

$$F = 1 - \exp(-\overline{nl}\sigma_{CX}) \quad (6.1)$$

Onde:

σ_{CX} - seção de choque para transferência de carga

n - densidade do meio neutralizador

l - distância percorrida pelo feixe dentro do tubo neutralizador

$$\overline{nl} = \int_l n dl \quad (6.2)$$

Para obtermos F grande (máximo de 100%) é necessário que:

$$\overline{nl}\sigma_{CX} > 1$$

Para o nosso caso, onde utilizamos Na como substância neutralizadora, temos $\sigma_{CX} = 10^{-14} \text{ cm}^2$ para $\text{Li}^+ + \text{Na}^0$. E portanto, para uma dimensão de tubo de neutralizador de 12 cm como o da nossa célula de neutralização, é necessária uma densidade de vapor de sódio de $n = 1,1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Utilizando a equação ideal dos gases e considerando a

temperatura de neutralização de 280°C , vamos ter na célula neutralizadora uma pressão do vapor de sódio de $\sim 8,5 \times 10^{-5}$ mbar.

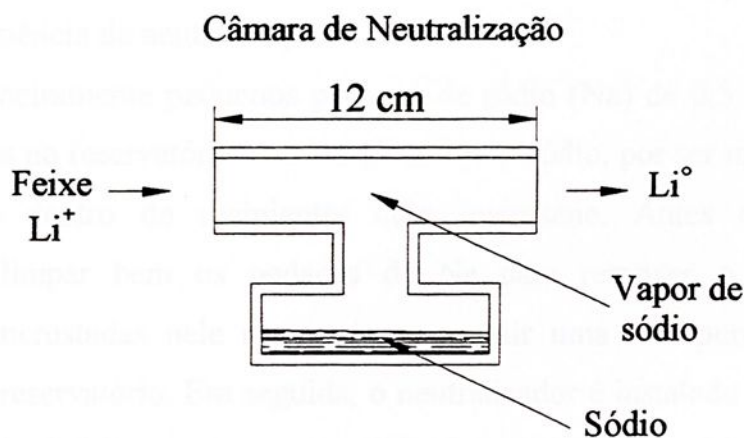


FIGURA 45 - Célula neutralizadora com o reservatório de sódio.

Os metais alcalinos apresentam as maiores seções de choque, como os íons de lítio, sódio etc. Em particular para a nossa aplicação o uso do sódio é o que mais apresenta vantagens pois possui baixa temperatura de vaporização facilitando a operação do neutralizador e possui número atômico relativamente baixo, o que é interessante pois evita a contaminação excessiva do plasma a ser diagnosticado.

Uma outra vantagem das células neutralizadoras com metais alcalinos sobre a células de gases, é que os vapores alcalinos ao entrarem em contato com superfície em baixa temperatura se solidificam aderindo a estas, eliminando a necessidade do bombeamento diferencial. O inconveniente do uso dos metais alcalinos como substância neutralizadora é que eles precisam ser vaporizados através de aquecimento, necessitando assim de reservatório onde com o seu aquecimento o vapor é gerado, e o fato de aderirem nas paredes frias da câmara, exigem uma limpeza periódica para remoção destes materiais.

6.2 - Operação do neutralizador

A seguir discutiremos a operação do neutralizador, procurando mostrar aqui as condições mais adequadas de operação para obtermos a máxima eficiência de neutralização.

Primeiramente pequenos pedaços de sódio (Na) de 0,5 a 0,8 gramas, são inseridos no reservatório do neutralizador. O sódio, por ser muito reativo é armazenado dentro de recipientes com querosene. Antes de usá-los é necessário limpar bem os pedaços de Na para remover o querosene e oxidações incrustadas nele e com isso garantir uma boa pureza do sódio inserido no reservatório. Em seguida, o neutralizador é instalado na câmara da SFLNR onde é feito o vácuo. A célula é então pré-aquecida até 150 °C, usando apenas a fonte do reservatório. Este pré-aquecimento é necessário para condicionar o sódio e deve ser de algumas horas para todas as vezes em que se troca a carga. O sódio é uma substância muito higroscópica e o pré-aquecimento permite que toda água e outras substâncias como resíduos de querosene sejam eliminados. É recomendável também que todas as vezes que for operar o neutralizador, principalmente se o vácuo foi quebrado, que se faça o condicionamento aquecendo o neutralizador a 150° C durante 20 minutos.

Uma vez instalado o neutralizador dentro da câmara de vácuo, deve-se ajustar a pressão do ar da válvula pneumática responsável pelo selamento do reservatório de sódio.

No neutralizador usam-se duas fontes de aquecimento independentes, sendo uma responsável pelo aquecimento do reservatório de sódio e a outra pela célula de neutralização. O aquecimento do neutralizador deve ser gradual para evitar danos na resistência de aquecimento e para que haja um aquecimento uniforme do reservatório e da célula de neutralização.

Para aquecer o sistema, ajustamos as tensões nas fontes de alimentação das resistências de aquecimento em 60V, para fonte da resistência



do reservatório, e 40V para a fonte da célula neutralizadora. Com estas tensões temos 100W dissipada na primeira resistência e 200W na segunda.

Para monitorar as temperaturas nestes dois pontos utilizamos dois termopares. Durante a neutralização procuramos manter a temperatura no reservatório ligeiramente mais elevada do que na célula.

Para reduzir o desgaste do sódio e diminuir a contaminação, o neutralizador foi desenvolvido para trabalhar de forma pulsada. Uma válvula seladora de acionamento pneumático impede que o vapor de sódio escape do reservatório, exceto durante o tempo de neutralização do feixe (alguns segundos).

6.3 - Medida da eficiência de neutralização

Para medir a eficiência de neutralização do feixe de lítio fazemos com que o feixe sofra um desvio em sua trajetória a partir de um campo elétrico. O feixe iônico sofrerá a ação deste campo elétrico mas o feixe neutralizado Li^0 não sofre ação de campos elétricos ou magnéticos.

Um experimento para medir a eficiência de neutralização do feixe de lítio iônico em função da temperatura tem seu esquema mostrado na figura 46. Este experimento simples nos permite medir de forma confiável se o feixe foi neutralizado e o quanto, de forma percentual, ele foi neutralizado. Neste experimento o feixe iônico é extraído, acelerado e injetado no tubo de neutralização. Em seguida passa por duas placas defletoras onde por ação do campo elétrico os íons não neutralizados são desviados. Foram instalados dois detetores de íons do tipo SED, sendo um em frente ao feixe e o outro em paralelo distante 10 cm do primeiro lateralmente, de tal forma que quando o feixe iônico passa entre as placas do defletor ele é totalmente desviado de sua trajetória sendo coletado pelo detetor três. Sem a ação do campo elétrico, o feixe é coletado no detetor 2.

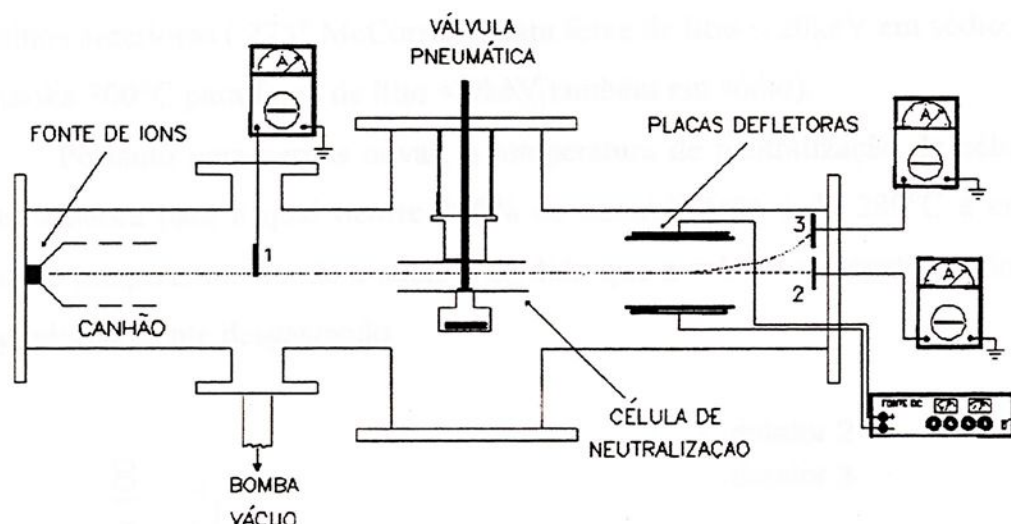


FIGURA 46 - Esquema de um sistema para medida da eficiência de neutralização do feixe de lítio

Um feixe de lítio Li^+ de intensidade I é gerado e injetado na célula neutralizadora. Aplicamos então uma tensão no defletor de 500 V e o feixe iônico é totalmente coletado pelo detetor 3. Abrindo a válvula do reservatório do neutralizador que se encontra a uma temperatura T , o vapor de sódio injetado na célula neutralizadora permite que o feixe de lítio Li^+ seja transformado em feixe de Li^0 . Este não sofre ação do defletor e não é desviado, sendo coletado no detetor 2. A relação entre as intensidade das correntes no detetor 2 e 3 nos dá o grau de neutralização sofrida pelo feixe.

Na figura 47 temos uma curva que nos mostra a relação entre a pressão na câmara devido ao vapor de sódio e a temperatura medida na célula neutralizadora

trabalhos anteriores (275° McCormick para feixe de lítio < 20keV em sódio; e Yamaoka 300°C para feixe de lítio < 9keV também em sódio).

Portanto para cargas novas, a temperatura de neutralização da célula neutralizadora para a qual ocorre 100% de neutralização é de 280°C e este valor de temperatura tende a subir à medida que a substância neutralizadora vai gradativamente desgastando.

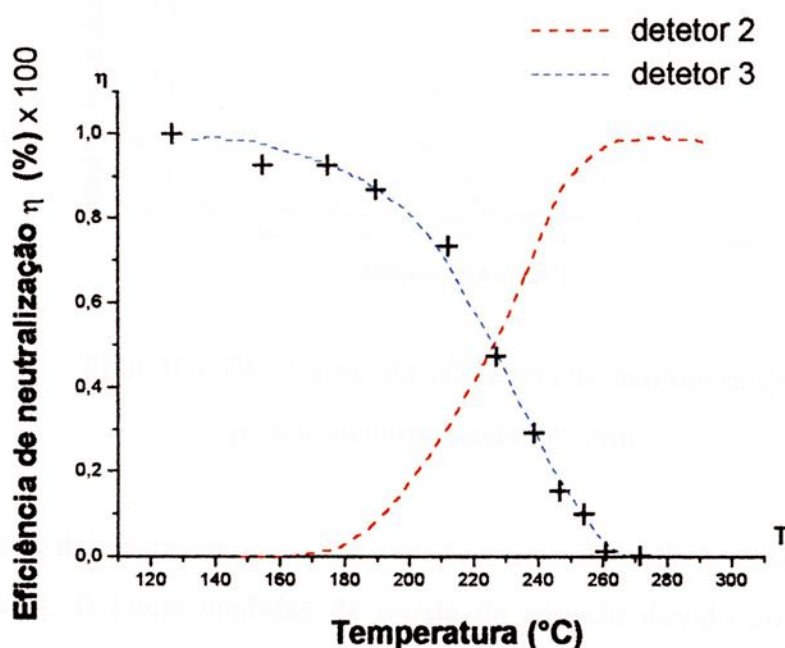


FIGURA 48 - Gráfico da eficiência de neutralização para uma carga nova de sódio

Na figura 49 temos um gráfico da eficiência de neutralização $\eta(\%)$ versus a temperatura $T(^{\circ}\text{C})$, onde neste caso em particular, a neutralização de 100% foi atingida somente com temperatura de cerca de 400°. Isto se deve ao desgaste da carga de sódio após algumas horas de uso. A medida que a quantidade de sódio no reservatório vai diminuindo, vai caindo a eficiência de neutralização. O desgaste da carga de sódio causa uma queda na pressão do vapor de sódio e em consequência uma diminuição na densidade do vapor de

sódio, e então é necessário elevarmos a temperatura da célula neutralizadora para que a pressão do vapor de sódio fique sempre constante.

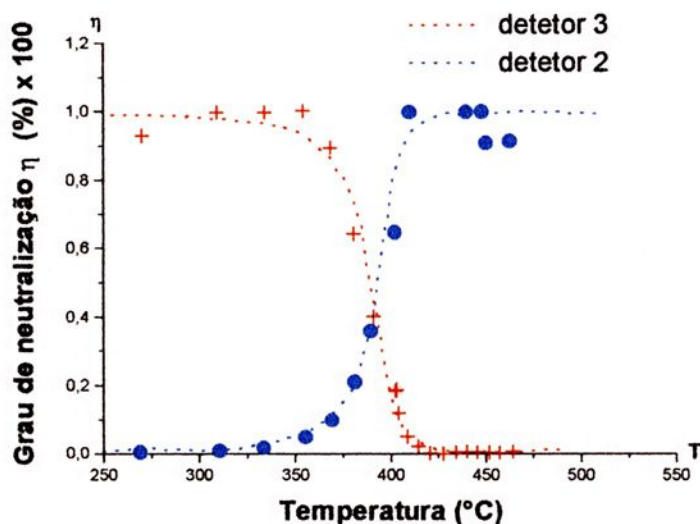


FIGURA 49 - Curva da eficiência de neutralização para uma carga gasta de sódio

Para determinarmos a vida útil da carga de sódio utilizada no nosso neutralizador, fizemos medidas da queda de pressão devido ao desgaste da massa de sódio ao longo do tempo. Conforme vimos anteriormente para que a neutralização seja eficiente é necessário que a densidade do vapor do sódio na célula neutralizadora seja de $\sim 1,1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Para uma temperatura constante de 280° C e mantendo a válvula do neutralizador aberto medimos a queda da pressão do vapor de sódio e consequentemente a queda da densidade. Na figura 50 podemos observar a variação da pressão devido ao vapor de sódio ao longo do tempo. Salientamos que a medida da pressão não foi feita diretamente na célula neutralizadora, mas sim dentro da câmara de vácuo da SFLNR próximo ao neutralizador. Na figura 51 podemos observar um gráfico da vida útil para três diferentes massas de sódio colocadas no neutralizador, operando na temperatura de 280° C. Devemos lembrar que durante a operação normal da SFLNR utilizamos o neutralizador no modo pulsado e

conseqüentemente a vida média da carga de sódio é significativamente estendida (fator de 10).

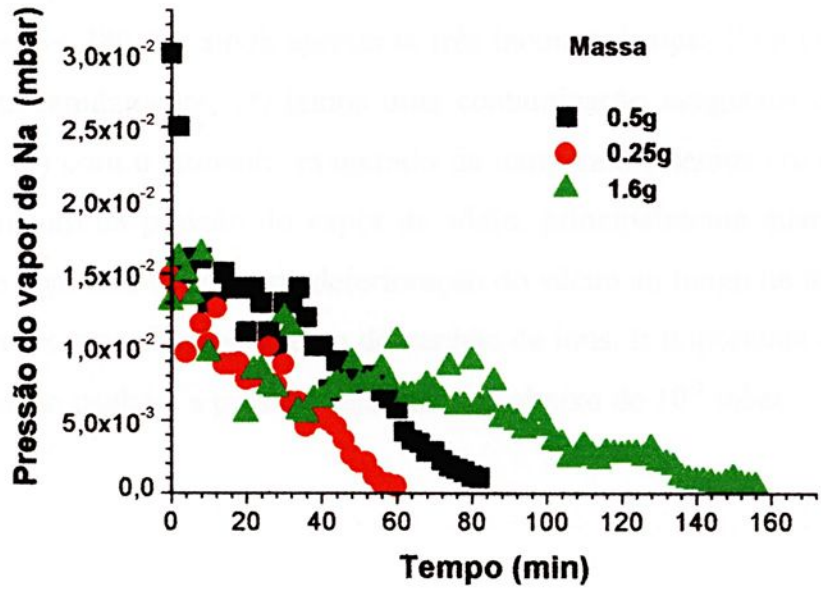


FIGURA 50 - Variação da pressão do vapor de sódio ao longo do tempo

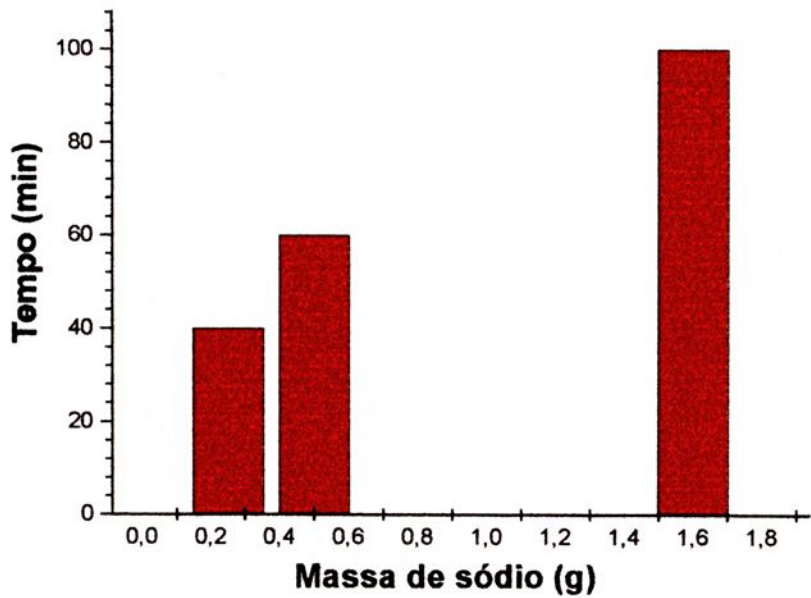
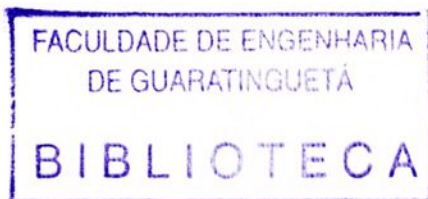


FIGURA 51 - Vida útil da carga de sódio no neutralizador

A redução de Li^+ com a temperatura é consistente com o aumento de Li^0 , ambos medidos com coletores simples. O aumento da temperatura de forma exagerada além de não melhorar a eficiência de neutralização, pois ela é 100% em $\sim 280^\circ\text{C}$, ainda apresenta três inconvenientes: 1º) a carga de sódio desgasta rapidamente; 2º) temos uma contaminação exagerada da câmara de vácuo; 3º) com o aumento exagerado da temperatura temos em consequência um aumento da pressão do vapor de sódio, principalmente quando a carga é nova, e com isso temos uma deterioração do vácuo ao longo de toda a câmara, causando o mau funcionamento do canhão de ions. É importante que na região próxima ao canhão, a pressão seja mantida abaixo de 10^{-3} mbar.



451



Capítulo 7

Injeção do feixe de lítio em gás neutro

O próximo passo após o feixe de lítio iônico ou neutralizado ter sido devidamente caracterizado e otimizado foi injetá-lo em um gás neutro. A injeção do feixe em um gás neutro nos permitiu uma avaliação do feixe com relação a eficiência deste em termos de geração de luz proveniente do feixe de lítio, e também nos permitiu determinar quais as linhas de emissão detectáveis nesta condição e qual apresentava a maior intensidade. Fatores que influenciam a qualidade do feixe e sua emissão de luz na linha LiI foram estudados nesta fase. Outra realização importante deste experimento, foi a otimização do sistema óptico para detecção da luz emitida pelo feixe.

7.1 - Teste de injeção do feixe de lítio no gás em uma câmara protótipo

Para injetar o feixe de lítio no gás neutro foi acoplado ao dispositivo SFLNR uma pequena câmara cilíndrica de aço inóx com volume de $\sim 30 \text{ cm}^3$, a um metro de distância da saída do canhão de ions como é mostrado na figura 52. Nesta câmara foi instalado um injetor de gás e um medidor de pressão do tipo pirani ligado ao controlador de vácuo. Também foi instalado uma janela na parte superior desta câmara como um visor para inspeção visual do feixe emissivo.

Posteriormente neste visor foi acoplado o sistema óptico de detecção de luz, para a sua guiagem até o espectrômetro.

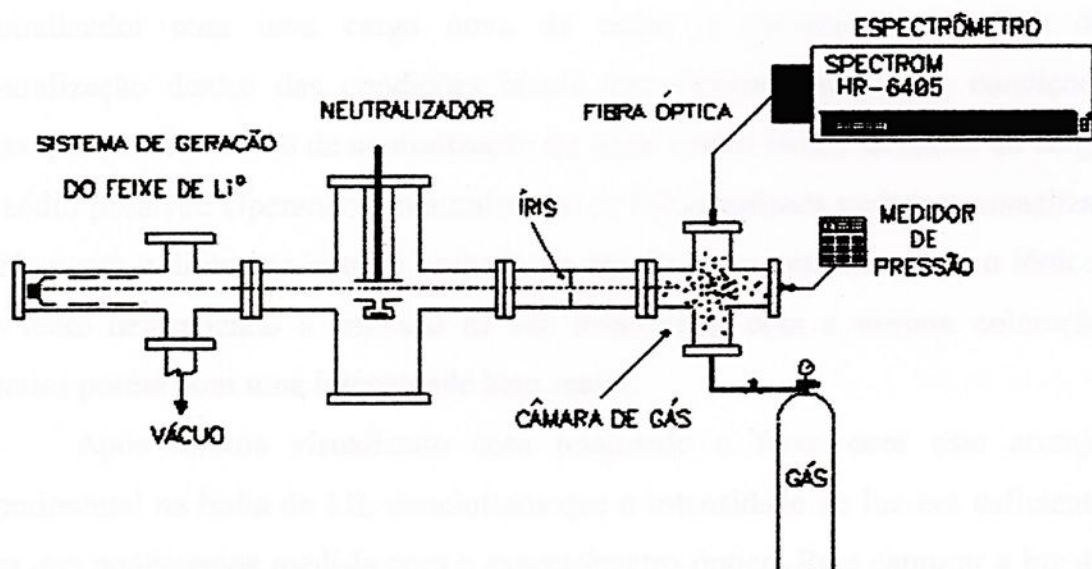


FIGURA 52 - Esquema da aplicação do feixe de lítio no gás

Inicialmente utilizamos como gás na câmara o ar atmosférico (nitrogênio). Tínhamos como objetivo apenas visualizar a emissão de luz proveniente da colisão do feixe com este gás. A primeira tentativa de visualizar a emissão de luz do feixe, consistiu em injetar um feixe iônico, operando o sistema nas condições anteriormente determinadas como ideais. Mantivemos a pressão do gás injetado na câmara em $1,0 \times 10^{-3}$ mbar e a corrente do feixe medido no detector-1 na saída do canhão era de $20 \mu\text{A}$. Nesta condição pudemos visualizar a emissão de uma luz suavemente avermelhada e muito tênue. Esta emissão de luz era devido ao feixe neutralizado pelo próprio gás, e não devido ao feixe iônico, como pudemos confirmar mais tarde com o uso do espectrômetro, que nos permitiu a devida identificação das linhas de emissão.

Na expectativa de que a emissão de luz devido ao feixe neutralizado pudesse ser bem mais intensa do que a gerada pelo feixe iônico providenciamos a neutralização do feixe. Para neutralização do feixe fizemos o carregamento do neutralizador com uma carga nova de sódio e operamos o sistema de neutralização dentro das condições ideais anteriormente definidas, condições estas que permite 100% de neutralização do feixe com o menor desgaste da carga de sódio possível. Operando o neutralizador de forma pulsada pudemos visualizar nitidamente a diferença entre a emissão de luz do feixe neutralizado e o iônico. No feixe neutralizado a emissão de luz manteve-se com a mesma coloração anterior porém com uma intensidade bem maior.

Após termos visualizado com totalidade o feixe com este arranjo experimental na linha de LiI, concluímos que a intensidade de luz era suficiente para que pudéssemos medi-la com o espectrômetro óptico. Para capturar a luz da emissão no gás utilizamos uma janela no topo da câmara onde foi instalado um visor e através de uma fibra óptica comum acoplada ao espectrômetro. O sinal elétrico na saída da fotomultiplicadora devida à radiação luminosa por ser contínua, pode ser medido através do eletrômetro.

Injetamos ar na câmara a uma pressão de $6,0 \times 10^{-3}$ mbar e aplicamos inicialmente o feixe iônico. Fizemos um ajuste preliminar no sistema óptico para a maior intensidade de luz e em seguida fizemos uma varredura no espectro variando o comprimento de onda de 3200Å até 6750Å mantendo a fenda do espectrômetro aberta no máximo. Nesta condição não foi possível perceber nenhum sinal devido ao feixe, a não ser o sinal de fundo que era constante para todo o espectro varrido e de amplitude com escala total de $0,03 \times 10^{-7}$ A no eletrômetro.

Por estar o sinal de fundo devido a outras fontes de luz, muito intenso, tivemos que cobrir o equipamento óptico com um plástico preto e conseguimos reduzir então o sinal de fundo para $0,025 \times 10^{-8}$ A.



Após várias tentativas e ajustes no sistema óptico conseguimos captar o sinal de luz pela primeira vez no comprimento de onda de $6708\text{\AA}$ utilizando o feixe neutralizado. A partir deste sinal ajustamos o foco do feixe atuando na tensão de polarização da lente-2 (V_2), que para este caso apresentou um ponto ótimo em 2,25 kV. Otimizamos as posições dos componentes ópticos ainda mais, para captar a máxima intensidade do sinal, que ficou em torno de $1,6 \times 10^{-8}$ A.

Uma vez obtido a melhor condição do sinal, e com o sistema óptico devidamente ajustado fizemos novamente a varredura do espectro variando o comprimento de onda de $6750\text{\AA}$ até $3200\text{\AA}$ e conseguimos detectar as 4 principais linhas de emissão do feixe de lítio neutro, sendo a de maior intensidade a linha de comprimento $6708\text{\AA}$ conforme podemos observar na figura 53.

Como o sinal de maior intensidade é o de $6708\text{\AA}$ e por ser este o comprimento de onda principal e que será utilizado no diagnóstico, fizemos uma varredura em torno deste comprimento de onda com a fenda do espectrômetro devidamente ajustada. Na figura 54 temos o gráfico desta varredura. De fato o pico de linha de emissão fica em $6711\text{\AA}$ (medido) pois há um deslocamento de cerca de $3\text{\AA}$ para mais, na leitura do comprimento de onda com o espectrômetro na presente calibração.



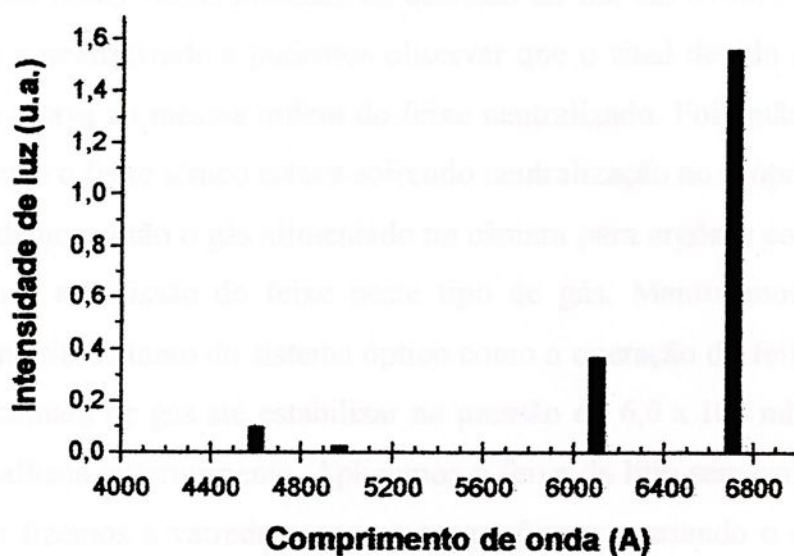


FIGURA 53 - Principais comprimentos de ondas do feixe de Li^0 detectadas.

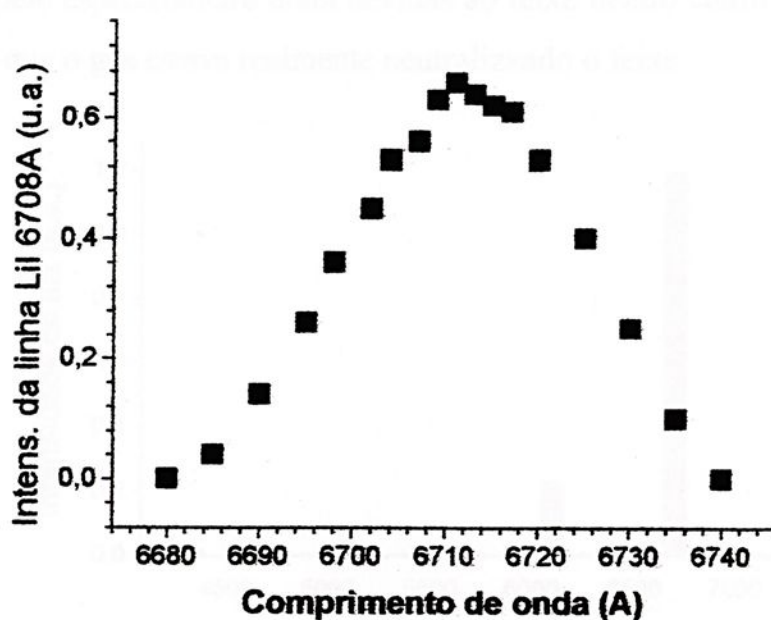


FIGURA 54 - Varredura do sinal de luz em torno do comprimento de 6708 Å

Foram feitas várias medidas da emissão de luz em $6708\text{\AA}$ utilizando o feixe iônico e neutralizado e pudemos observar que o sinal devido a emissão do feixe iônico estava na mesma ordem do feixe neutralizado. Foi então levantado a hipótese de que o feixe iônico estava sofrendo neutralização no próprio gás alvo.

Mudamos então o gás alimentado na câmara para argônio com a intenção de estudarmos a emissão do feixe neste tipo de gás. Mantivemos as mesmas condições anteriores tanto do sistema óptico como a operação do feixe. Injetamos argônio na câmara de gás até estabilizar na pressão de $6,0 \times 10^{-3}$ mbar, a mesma pressão trabalhada anteriormente. Aplicamos o feixe de lítio sem ser neutralizado pelo sódio e fizemos a varredura com o espectrômetro variando o comprimento de onda de $3200\text{\AA}$ até $6750\text{\AA}$. Na figura 55 temos o gráfico destas medidas onde podemos observar as linha de maior intensidade detectadas pelo espectrômetro. Não conseguimos detectar a linha de emissão devido ao feixe iônico, as linhas detectadas pelo espectrômetro eram devidas ao feixe neutro confirmando assim a hipótese de que o gás estava realmente neutralizando o feixe.

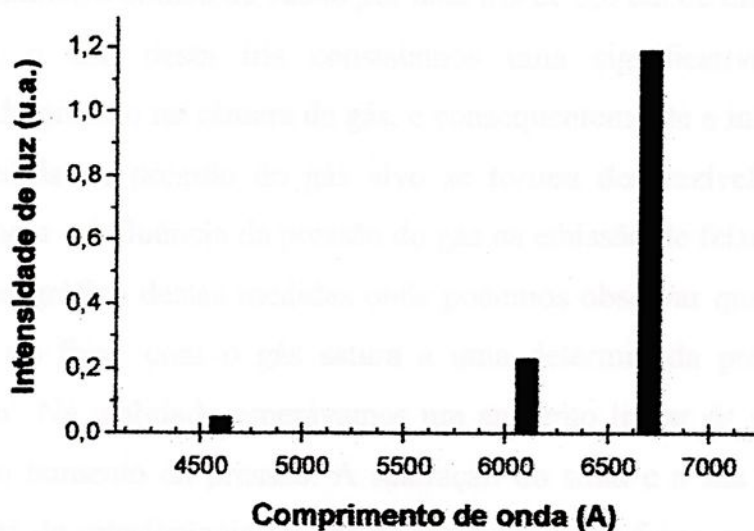


FIGURA 55 - Linhas detectadas no gás argônio

Para investigarmos a influência da pressão do gás alvo sobre a intensidade de luz emitida pelo feixe foram feitas diversas medidas utilizando o feixe neutralizado em condições otimizadas. Alimentamos argônio na câmara de forma controlada para que a pressão fosse variando lentamente. Antes de cada medida era esperado um determinado intervalo de tempo para que a pressão se estabilizasse.

Inicialmente a pressão na câmara de gás aumentava muito quando abríamos a válvula pneumática do neutralizador, isto acontecia devido principalmente a dois fatores que eram o fato da câmara de gás estar muito próxima do neutralizador e por ter esta câmara um volume muito pequeno. Deste modo o gás sódio ao migrar para a câmara de gás, alterava a pressão e consequentemente a medida da intensidade da emissão de luz pelo feixe. Para diminuir a influência do gás sódio na pressão da câmara de gás foi tentado um bombeamento diferencial introduzindo uma pequena bomba difusora de vácuo, entre o neutralizador e a câmara de vácuo, porém sem resultados satisfatórios. Então substituímos a bomba de vácuo por uma íris de 0,8 cm de diâmetro.

Com o uso desta íris constatamos uma significativa melhora na estabilidade da pressão na câmara de gás, e consequentemente a influência do gás sódio na medida da pressão do gás alvo se tornou desprezível, e com isso pudemos estudar a influência da pressão do gás na emissão de feixe. Na figura 56 temos um dos gráfico destas medidas onde podemos observar que a luz emitida pela colisão do feixe com o gás satura a uma determinada pressão e depois começa a cair. Na realidade esperávamos um aumento linear da emissão de luz em função do aumento da pressão. A saturação do sinal e a sua queda provêm provavelmente da interferência do gás na intensidade do feixe, na região de sua propagação.



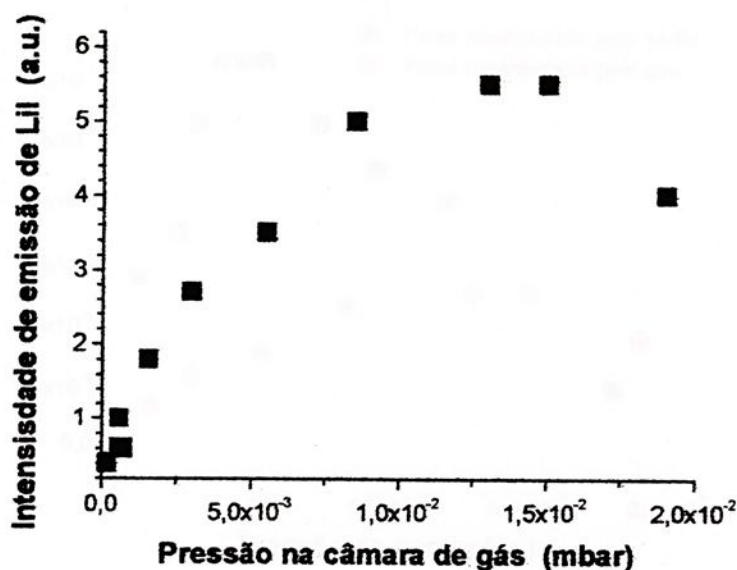


FIGURA 56 - Variação da intensidade de luz em função da pressão do gás

Também foram feitas medidas da influência da pressão do gás sobre o feixe não neutralizado pelo sódio, figura 57. Comparando-se os resultados obtidos com o feixe neutralizado pelo sódio observamos que a intensidade de emissão do feixe neutralizado pelo gás é sempre menor do que obtido com o feixe neutralizado pelo sódio até pressões de $1,5 \times 10^{-2}$ mbar. Também observamos que a influência das pressões mais altas de gás sobre a intensidade de luz emitida pelo feixe neutralizado é menos acentuada acima de 5×10^{-3} mbar, vindo a cair com a pressão para valores acima de 6×10^{-3} mbar. Isto se deve talvez ao fato de que à pressões mais altas, também aumenta a neutralização do feixe melhorando a emissão de luz e consequentemente compensando o efeito de atenuação da intensidade do feixe. Porém, para as maiores pressões, a redução da intensidade do feixe se torna prevaiente.

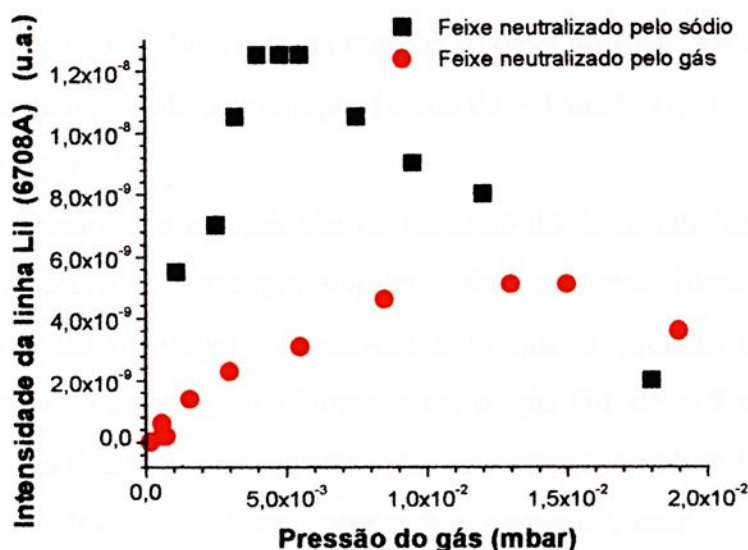


FIGURA 57 - Comparação da emissão de luz devido ao feixe neutralizado pelo gás e pelo sódio.

Para verificarmos se a pressão na câmara de gás afetava o feixe no processo de extração e aceleração, medimos a pressão na região do canhão de ions enquanto monitorávamos a corrente de ions do feixe medido próximo ao canhão. A pressão na região do canhão foi medida durante a variação da pressão na câmara de gás. Pode-se constatar então que a variação era muito pequena, mantendo-se sempre baixa, em torno de $1,0 \times 10^{-4}$ mbar para uma pressão na câmara de gás de $2,0 \times 10^{-2}$ mbar. A existência deste gradiente de pressão é importante para o bom funcionamento do sistema de geração do feixe, conforme vimos no capítulo 3, onde discutimos que a pressão na região do canhão deve ser mantido sempre abaixo de 10^{-3} mbar para não afetar o feixe na origem. Medidas da corrente de ions através do detetor 1, instalado na saída do canhão, mostraram que a corrente de ions se mantinha constante, independente da pressão na câmara de gás e da operação do neutralizador pelo menos na faixa de pressão estudada. A atenuação da intensidade de emissão de luz do feixe no gás devido ao aumento

da pressão, anteriormente constatado, não se deve a atenuação direta da corrente do feixe no canhão. Talvez esta atenuação se deva ao fenômeno de dispersão do feixe no gás na região de propagação (cerca de ~ 1 metro) que se intensifica com o aumento da pressão.

Estudando-se a intensidade da emissão do feixe em função da variação da pressão do gás alvo, conseguimos determinar a pressão ideal de trabalho com o feixe na atual montagem. Determinamos que a pressão em que o feixe apresenta maior emissão em choque com o gás foi de $\sim 5 \times 10^{-3}$ mbar. Para pressões acima deste valor a emissão de luz começa a sofrer forte atenuação e assim dificuldades nas medidas começam a aumentar, embora não invalidem a utilização do feixe para o diagnóstico de plasma, como veremos adiante.

Para avaliarmos também a influência do grau de neutralização do feixe na intensidade de luz emitida pelo feixe no gás, fizemos medidas da intensidade da emissão de luz em função do grau de neutralização do feixe. Utilizamos argônio como gás alvo para o feixe e mantivemos a pressão na câmara de gás constante em 5×10^{-3} mbar. Utilizamos o feixe nas condições padrão com a tensão de polarização V_2 de 2,25 kV, e medimos a intensidade da emissão de luz do feixe em função da temperatura da célula neutralizadora. Conforme vimos no capítulo 5, a temperatura do neutralizador é um dos parâmetros que nos permite determinar o grau de neutralização do feixe. Naquele capítulo vimos que o feixe é 100% neutralizado em temperatura acima de 280°C .

Para esta medida trabalhamos dentro do período em que o desgaste da carga de sódio não afetou o grau de neutralização do feixe. Recarregamos o neutralizador com uma carga de sódio de $\sim 1\text{g}$, e realizamos as medidas com o neutralizador operando no modo pulsado. A figura 58 mostra esta medida, onde podemos observar um ligeiro aumento da intensidade de emissão nas temperaturas mais altas. Isto se deve provavelmente a interferência do vapor de sódio na pressão da câmara de gás, aumentando naturalmente a emissão do feixe. Pudemos desta

forma, confirmar que a eficiência de neutralização influencia diretamente na emissão de luz do feixe.

Na figura 59 podemos observar o decaimento da intensidade de emissão de luz de feixe em função do desgaste da massa de sódio, com o desgaste da massa de sódio conforme vimos temos uma queda na eficiência de neutralização do feixe. Para esta medida utilizamos uma carga de sódio 0,25g. e o neutralizador foi aquecido a uma temperatura até 285°C. Após atingir esta temperatura manteve-se a temperatura do neutralizador constante e a válvula do neutralizador foi acionada ficando aberta até o total desgaste da carga de sódio. Como pudemos ver após 40 minutos ocorre o esgotamento do sódio, acarretando numa abrupta redução da intensidade de luz.

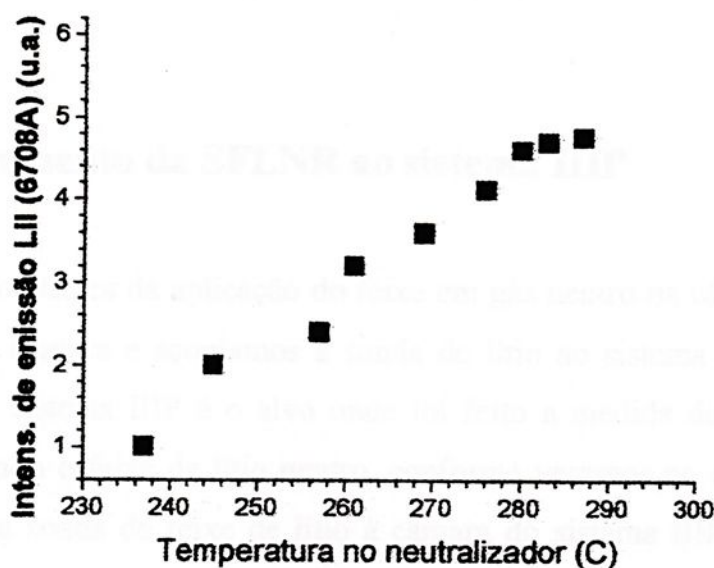


FIGURA 58 - Variação da emissão de luz do feixe em função da temperatura de neutralização

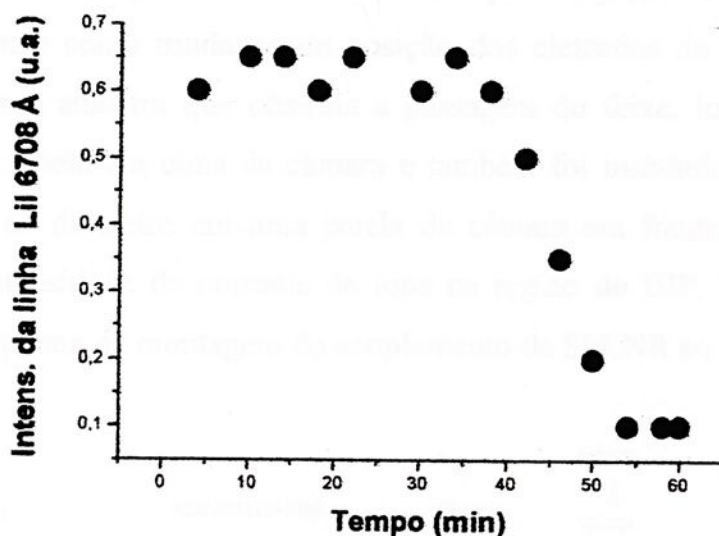


FIGURA 59 - Variação da intensidade de luz em função do desgaste da massa de sódio

7.2 - Acoplamento da SFLNR ao sistema IIP

Após os testes da aplicação do feixe em gás neutro na câmara protótipo, retiramos esta câmara e acoplamos a sonda de lítio ao sistema de implantação iônica IIP. O sistema IIP é o alvo onde foi feita a medida da densidade do plasma utilizando o feixe de lítio neutro, conforme veremos no capítulo 8. Para conectarmos a sonda de feixe de lítio à câmara do sistema IIP foi necessário uma série de adaptações. Entre elas foi necessário ajustar a altura da câmara da sonda de lítio para poder alinhá-la com a câmara do IIP, também foi necessário confeccionar peças para adaptar as conexões entre os dois sistemas. Entre a câmara da SFLNR e a câmara do sistema IIP foi instalado uma válvula que permitiu isolar os dois sistemas, desta maneira as câmaras ficaram independentes, sem a necessidade da quebra total do vácuo nos dois sistemas. Foram necessários

fazer algumas adaptações no sistema IIP para injeção do feixe e sua visualização, tais como mudança da posição dos eletrodos da descarga glow, retirada do porta amostra que obstruía a passagem do feixe, instalação de um visor em uma janela em cima da câmara e também foi instalado um detetor de ions de 4 cm de diâmetro em uma janela da câmara em frente ao feixe, para medidas da intensidade de corrente de ions na região do IIP. Na figura 60 é mostrado o esquema da montagem do acoplamento da SFLNR ao sistema IIP.

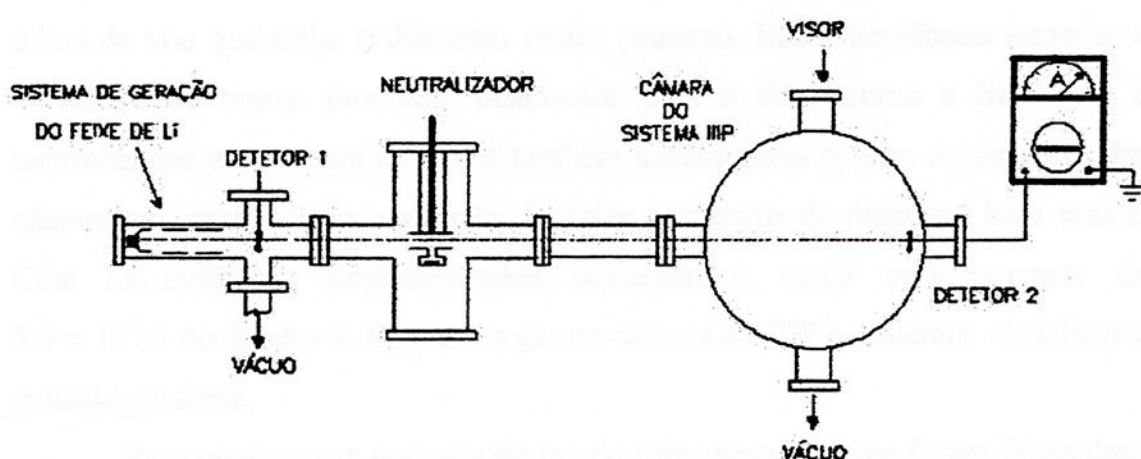


FIGURA 60 - Montagem do acoplamento da SFLNR ao sistema IIP

Uma vez conectados os dois sistemas, foram feitos testes de alinhamento através da visualização da luz emitida pelo cadinho e também foram feitos testes com o sistema de vácuo.

Após obtermos as condições ideais em termos de vácuo e alinhamento dos sistemas, iniciamos a injeção do feixe na câmara do sistema IIP. Utilizamos uma fonte vítrea por ela fornecer uma corrente de ions bem mais alta que a pastosa, mas a corrente no detetor - 2 na câmara IIP ainda era muito baixa, da ordem de $6,0 \times 10^{-7}$ A. Para podermos visualizar a emissão do feixe no gás, de acordo com a nossa experiência, a corrente do feixe deve estar acima de

1.0×10^{-6} A no ponto de observação. Como a corrente medida no detetor próximo a fonte, era da ordem de 100×10^{-6} A, esperávamos uma corrente de pelo menos 10×10^{-6} A.

Após uma inspeção minuciosa no tubo de vôo do feixe concluímos que o fator mais importante na limitação da intensidade do feixe era o pequeno orifício da válvula que separa os dois sistemas, embora o sistema estivesse visualmente alinhado. Provavelmente o feixe estava deslocado do centro do orifício, e com isso poderia estar colidindo na parede da válvula e talvez na parede de um dos tubos de vôo que tinha o diâmetro muito pequeno. Então decidimos remover a válvula e os outros possíveis obstáculos para o feixe como a íris entre o neutralizador e a câmara de gás e também substituímos o tubo de conexão das câmaras na região de propagação do feixe por outro de diâmetro bem maior. Com as melhorias implementados conseguimos medir uma corrente de $3,5 \times 10^{-6}$ A no detetor-2. Injetamos gás na câmara do IIIP e pudemos visualizar a emissão do feixe.

Para medirmos a emissão de luz do feixe neste sistema foram feitas duas montagens. Uma consistiu em utilizar uma janela no topo da câmara onde foi instalado um visor, e desta posição foi possível medir a luz emitida pelo feixe perpendicular ao seu deslocamento, como está mostrado na figura 61. Para capturar a luz e levá-la até o espectrômetro utilizamos a fibra óptica, conforme utilizada anteriormente na câmara de gás. Uma outra montagem óptica também foi realizada e consistiu em utilizar uma janela em frente ao feixe, onde estava o detetor-2. Foi colocado nesta janela um visor, e a luz da emissão do feixe foi direcionada através de dois espelhos planos e duas lentes convergentes até a fenda de entrada do espectrômetro.



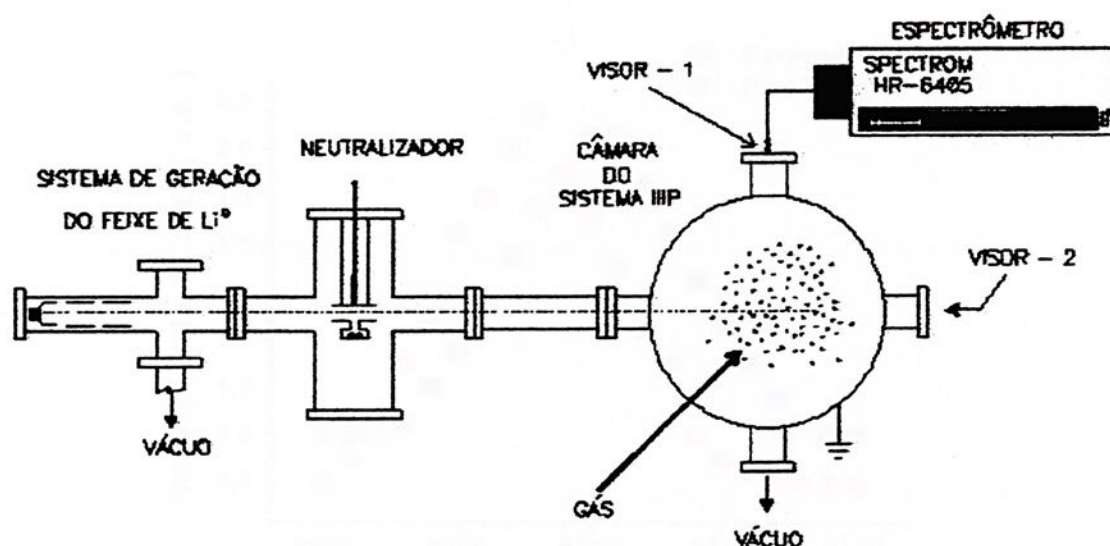


FIGURA 61 - Montagem para medida da emissão de luz no sistema IIP

Foram feitas diversas medidas da emissão do feixe nesta duas posições, procurando otimizar o sistema óptico e reproduzir os resultados anteriormente obtidos na câmara de gás protótipo. Na figura 62 temos um gráfico da medida da intensidade do feixe feitas na posição paralela ao feixe e perpendicular ao feixe. Para estas medidas trabalhamos com o feixe neutralizado e injetamos gás argônio na câmara do IIP, mantendo a pressão constante em $6,5 \times 10^{-3}$ mbar. O deslocamento no comprimento de onda observado no gráfico da figura 62 está relacionado com o efeito Doppler.

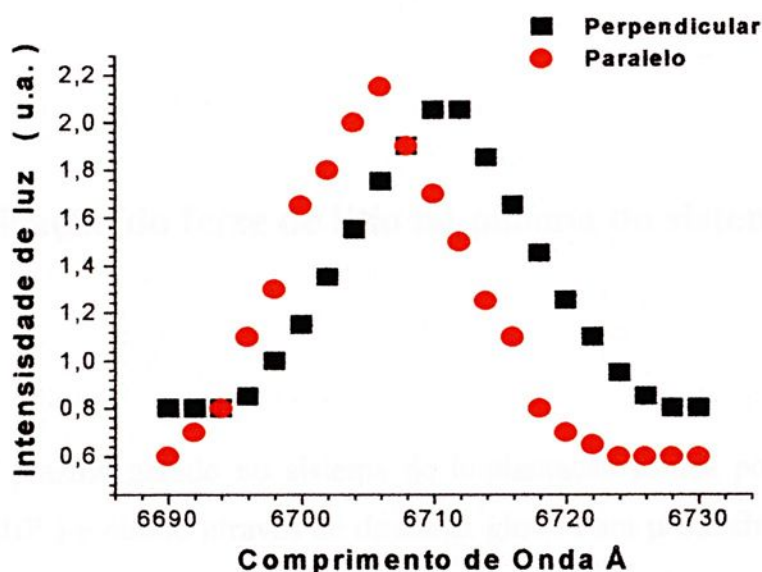


FIGURA 62 - Medidas da intensidade de emissão do feixe em duas posições diferentes.

Como era de se esperar, se observarmos perpendicularmente o feixe propagando na direção de observação (caso 1), os fótons emitidos na linha LiI não sofrem nenhum deslocamento em λ (comprimento de onda). Porém se observarmos aqueles fótons na direção de observação, veremos um deslocamento $\Delta\lambda$ para baixo de λ . Uma estimativa deste efeito Doppler permitiu a determinação da energia real dos átomos de lítio que foram acelerados pelo canhão. Considerando um deslocamento de $\Delta\lambda = 5,5\text{\AA}$, conforme podemos observar no gráfico da figura 62, obtivemos que a energia dos átomos de lítio do nosso feixe era de 2,2 keV.

Capítulo 8

Aplicação do feixe de lítio no plasma do sistema IIIP

O plasma gerado no sistema de implantação iônica por imersão em plasma (IIIP) é obtido através de descarga glow. Para produzir esta descarga faz-se admissão de gás à baixa pressão na câmara, e aplica-se uma ddp entre dois eletrodos (anodo e catodo). O campo elétrico gerado irá provocar a descarga elétrica e mantê-la. No nosso caso, o campo elétrico é criado entre um eletrodo (anodo) e as paredes da câmara do sistema IIIP. O eletrodo utilizado como anodo é confeccionado em aço inoxidável e tem a geometria de uma haste cilíndrica com 0,5 cm de diâmetro e 9,0 cm de comprimento e está fixado em uma flange da região central da câmara.

Para gerar o potencial da descarga glow utiliza-se uma fonte simples de tensão DC construída no próprio laboratório, com saída ajustável de zero a 900V e com capacidade máxima de 0,6 A.

Para provocar a ruptura do gás existem vários processos. No caso do sistema IIIP podemos provocar a ruptura do gás por dois processos. O primeiro processo consiste em aplicar a tensão entre os eletrodos (900V) e admite-se gás na câmara, aumentando gradativamente a pressão até que o plasma acenda e então abaixa-se a pressão até o valor que se quer trabalhar efetivamente. O segundo processo consiste em ajustar inicialmente a pressão do gás na condição de trabalho e em seguida aplica-se a tensão nos eletrodos, para provocar a ruptura do gás, auxiliado por um filamento aquecido dentro da



câmara e assim a descarga se inicia e é mantida facilmente com tensões de descarga de cerca de 600V.

A dificuldade para provocar a descarga depende do tipo de gás usado, da pressão, da geometria e da distância entre os eletrodos. No sistema IIIP utiliza-se com mais frequência nitrogênio e argônio numa pressão típica de 8×10^{-4} mbar. O uso de um filamento aquecido facilita o início da descarga nesta pressão e ajuda a manter a descarga estabilizada principalmente em pressões mais baixas. Além de facilitar a ruptura do gás, o filamento no sistema IIIP também é utilizado durante o processo de implantação iônica para abaixar o potencial flutuante do plasma. Na figura 63 temos uma curva onde podemos ver a relação entre a potência dissipada pelo filamento e a tensão mínima entre os eletrodos, necessária para que haja ruptura do gás ^[2].

Normalmente no sistema IIIP, para uma descarga com gás nitrogênio na pressão de 8×10^{-4} mbar, com a tensão entre os eletrodos de 900V, basta aplicarmos uma potência de 40W no filamento para obtermos a ruptura do gás. Nestas mesmas condições, se não utilizássemos o filamento, teríamos que aplicar uma tensão muito maior entre os eletrodos para obtermos o plasma ^[2].

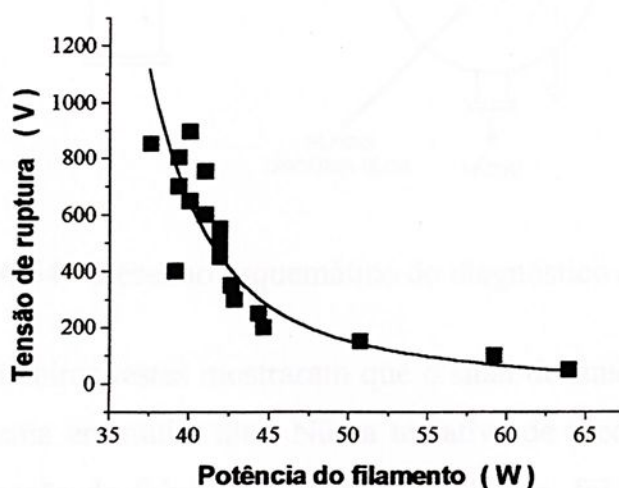


FIGURA 63 - Curva de potência de filamento versus potencial de ruptura para nitrogênio na pressão 8×10^{-4} mbar

O filamento utilizado no IIIP consiste em um fio de tungstênio ($2,2\Omega/\text{m}$) com 15 cm de comprimento. Este filamento é alimentado por uma fonte AC variável e pode chegar a dissipar 140W atingindo uma temperatura máxima de 1600°C [2,10].

8.1 - Aplicação do feixe no plasma

Para injetar o feixe de lítio no plasma, inicialmente utilizamos as mesmas condições anteriores para a injeção no gás. Na figura 64 temos o esquema do sistema de injeção do feixe no plasma IIIP, onde podemos observar que utilizamos a fibra acoplada no visor - 1 no topo da câmara, permitindo captar a luz devida a emissão do feixe perpendicularmente ao seu deslocamento.

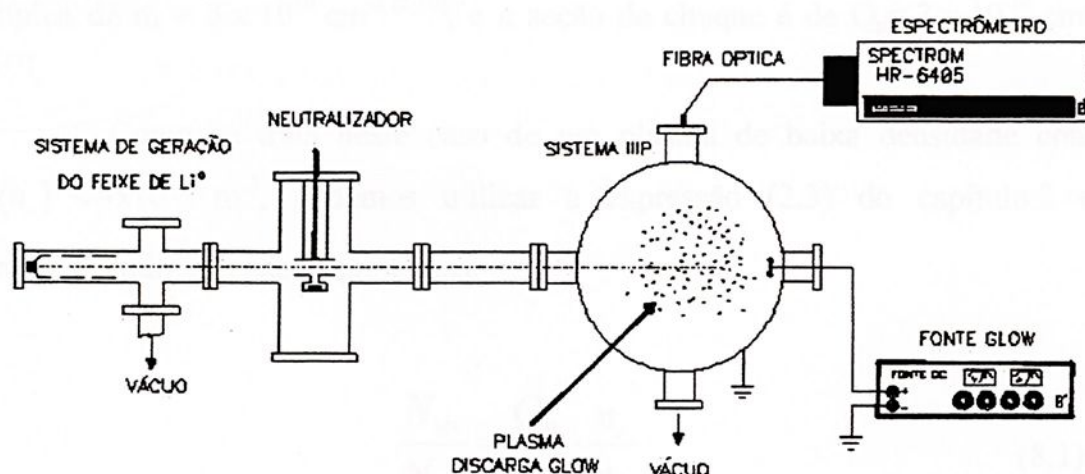


FIGURA 64 - Desenho esquemático do diagnóstico do plasma IIIP

Os primeiros testes mostraram que o sinal de fundo devido a emissão de luz do plasma era muito alto. Numa tentativa de medir a emissão de luz devido a aplicação do feixe neutralizado ao plasma, foi feita uma varredura com o espectrômetro com uma abertura da fenda em $800\ \mu\text{m}$, e mesmo assim não foi possível detectar o sinal devido ao feixe.

A grande dificuldade para medir a emissão de luz devido ao feixe de baixa energia aplicado ao plasma de baixa densidade como no caso do IIIP, é a relação sinal/ruído. Para fazermos uma avaliação da relação sinal ruído para o nosso caso e também para verificarmos as possibilidades de detectar a emissão do feixe no plasma, fizemos uma estimativa preliminar da intensidade da emissão do feixe de lítio neutro na linha LiI 6708Å no plasma, tendo como parâmetro de referência a emissão do feixe nas mesmas condições no gás neutro.

Para nossa estimativa vamos considerar o plasma de argônio à pressão de 5×10^{-4} mbar. Para esta pressão temos uma densidade do gás de $n_g = 1,35 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, sendo que para o argônio temos uma seção de choque de $Q_g = 4,2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ [2,10]. Para o plasma obtido no IIIP nas mesmas condições de pressão do gás, sem o uso do chuveiro de elétrons, temos uma densidade típica de $n_e = 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ [2,10], e a seção de choque é de $Q_p = 3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ [17].

Como se trata neste caso de um plasma de baixa densidade com $\langle n_e \rangle < 4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, podemos utilizar a expressão (2.3) do capítulo 2 e rearrumando esta expressão temos:

$$\frac{N_{vp}}{N_{vg}} = \frac{Q_p}{Q_g} \cdot \frac{n_e}{n_g} \quad (8.1)$$

Substituindo os valores de n_e , n_g , Q_g e Q_p na expressão obtemos a relação da emissão do feixe para o caso considerado, que é:

$$\frac{N_{vp}}{N_{vg}} = 0,15$$

Então deveremos esperar que o feixe aplicado ao plasma apresente um acréscimo de 15% na sua intensidade em relação ao feixe aplicado no gás neutro nas mesmas condições de medida.

Nos testes iniciais havíamos obtido para a aplicação do feixe neutralizado no gás argônio neutro na pressão de 5×10^{-4} mbar um sinal de 0,90 u.a.. E este mesmo feixe quando aplicado ao plasma nas mesmas condições irá emitir $\sim 1,4$ u.a e o sinal de fundo devido ao plasma estava acima de 1,5 u.a., e conseqüentemente não seria possível detectarmos a emissão do feixe dentro do plasma.

Para melhorar a relação sinal/ruído da nossa medida foram tomadas algumas providências. Para aumentarmos a intensidade da emissão de luz devido ao feixe no plasma, providenciamos um aumento da energia do feixe. Para isso substituímos a fonte V_{acel} que limitava a operação em no máximo 3 kV por outra que nos permitiu obter tensões até 5 kV.

Com a nova fonte de V_{acel} foi feito uma avaliação das condições de otimização do feixe e determinou-se um novo valor para tensão de polarização da lente-2 responsável pela focalização do feixe. A melhor condição de operação do feixe para esta nova otimização é:

$$V_{\text{acel}} = 5 \text{ kV}$$

$$V_1 = 3 \text{ kV}$$

$$V_2 = 1,7 \text{ kV}$$

Para um detetor de ions (detetor -2) instalado dentro da câmara do IIIP operando o feixe nas condições acima obtivemos uma corrente de $5 \mu\text{A}$ na região da medida, para uma corrente de $100 \mu\text{A}$ no detetor na região do canhão. Com essa otimização do feixe conseguimos uma melhoria significativa na intensidade da emissão de luz do feixe.

Para otimizarmos o sistema óptico, substituímos a fibra óptica comum por uma de alto desempenho. Também foi feita, uma montagem de um sistema

em cima do visor, utilizando uma lente convergente com foco de 6 cm onde foi colocada a fibra óptica.

Com o sistema óptico otimizado e com o aumento da energia do feixe fizemos várias medidas da emissão do feixe no gás e no plasma. Na figura 65 temos uma destas medidas da emissão do feixe aplicado em argônio em função da variação da pressão.

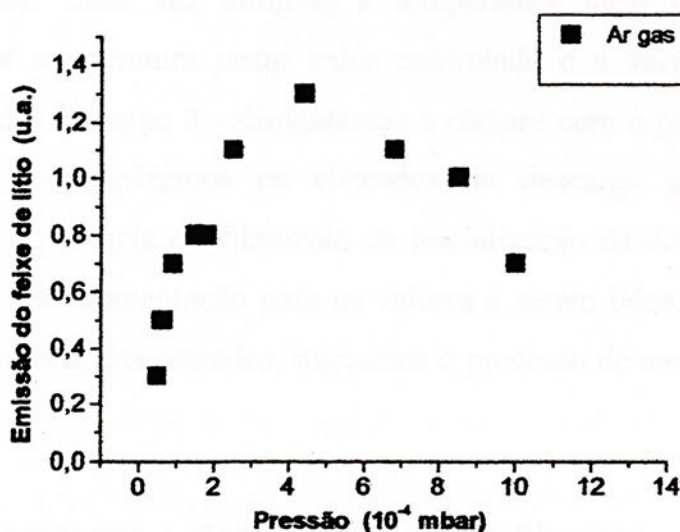


FIGURA 65 - Curva da emissão do feixe Li^0 aplicado no gás argônio

8.2 - Procedimento para medida da densidade do plasma

Para determinarmos a densidade do plasma utilizando a sonda de feixe de lítio neutro de forma confiável e com boa precisão é importante que as medidas sejam feitas dentro de um certo procedimento sistemático previamente estabelecido. O princípio da medida é simples, consiste em medir a emissão do feixe no gás neutro e em seguida medir a emissão deste mesmo feixe no plasma de tal modo que a mesma óptica de detecção seja mantida para a determinada razão N_p/N_g . O importante é que as condições de pressão

do gás e do plasma não se alterem durante a medida, e também que o feixe deverá estar dentro das mesmas condições nas duas medidas.

Para fazermos as medidas da densidade do plasma utilizamos o seguinte procedimento: 1 - ligamos o feixe ajustando-o nas condições ideais, com a maior intensidade e o melhor foco possível, e mantivemos o feixe bloqueado mantendo a saída da fonte V_{acel} inibida; 2 - ligamos o neutralizador até atingirmos a temperatura de máxima neutralização utilizando uma carga nova de sódio. Uma vez atingida a temperatura ideal do neutralizador mantivemos a temperatura neste valor controlada e a válvula seladora da câmara de sódio fechada; 3 - alimentamos a câmara com o gás até a pressão de trabalho; 4 - polarizamos os eletrodos da descarga glow em 900V; 5 - ajustamos a potência do filamento de inicialização da descarga em 40W. 6 - ajustamos a instrumentação para os valores a serem lidos. Uma vez todos os procedimentos acima tomados, iniciamos o processo de medida na seguinte seqüência:

1. Acendemos o plasma com o uso do filamento o qual é logo em seguida desligado
2. Abrimos a válvula seladora do neutralizador
3. Injetamos o feixe no plasma acionando V_{GUN} .
4. Fizemos a leitura da emissão do feixe neutralizado no plasma
5. Apagamos o plasma desligando a fonte de polarização dos eletrodos do glow
6. Fizemos a leitura da emissão do feixe no gás neutro.

FIGURA 66 - Emissão do feixe no gás neutro

8.2 - Resultados obtidos utilizando a SFLNR para medir a densidade do plasma de argônio no sistema IIIP

Utilizando gás argônio na câmara do sistema IIIP e aplicando o feixe de lítio Li^0 , fizemos medidas do fluxo de fótons emitidos no gás neutro e no plasma em função da variação da pressão, como mostrado na figura 66. A partir deste gráfico podemos determinar a densidade do plasma em função da pressão no ponto onde medimos a emissão de luz.

Para calcularmos a densidade do plasma no sistema IIIP em uma determinada pressão, recorremos ao método da comparação dos fluxos de fótons na linha 6708 Å, que é válida para este caso, porque o plasma gerado no sistema IIIP possui densidade $\langle n_e \rangle < 4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ e temperatura entre 10 a 100 eV [20]. Utilizaremos para o nosso cálculo a expressão da densidade $n_e(x)$ com resolução espacial dada pela expressão (2.3) do capítulo 2.

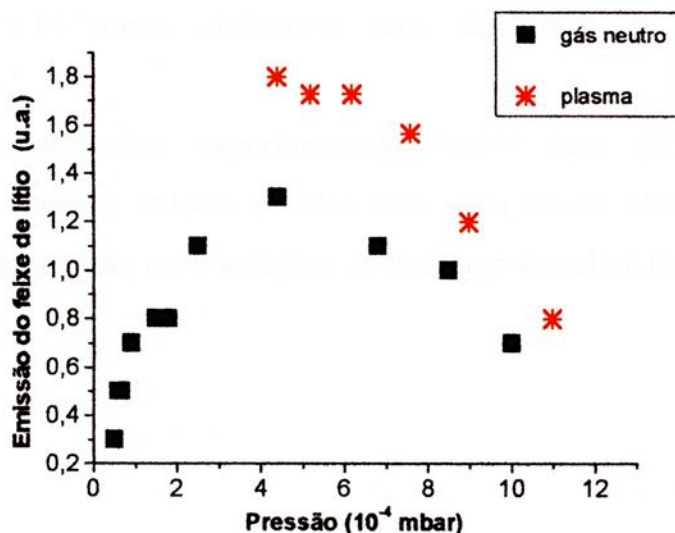


FIGURA 66 - Emissão do feixe de lítio no gás e no plasma de argônio

Para usarmos a expressão da densidade precisamos conhecer a seção de choque efetiva para o feixe de lítio Li^0 aplicado no gás Q_g e para o feixe aplicado no plasma Q_p . Precisamos também determinar a densidade do gás neutro. As seções de choque são tabeladas, e a densidade do gás neutro pode ser calculada usando o número de Loschmidt que nos dá para um gás nas condições normais de pressão e temperatura (CNPT) uma densidade de partícula de $2,6868 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [10,21].

Para a determinação da densidade do plasma de argônio do sistema IIIP vamos considerar a pressão de $7,0 \times 10^{-4} \text{ mbar}$. Calculamos para essa pressão uma densidade do gás neutro de $1,33 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. A seção de choque devido a colisão do feixe de Li^0 no gás neutro é $Q_g = 4,2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ e para o feixe aplicado ao plasma é $Q_p = 3,0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ [2,10]. A partir da curva da figura 66 temos que o fluxo de ftons medidos para aplicação do feixe no gás neutro foi de $N_{vg} = 1,7$ (u.a.) e devido ao plasma $N_{vp} = 0,4$ (u.a.). Aplicando estes dados na expressão (2.3), obtemos o valor da densidade pontual do plasmas que é $n_e(x) = 3,3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Utilizando um outro ponto da curva da figura 66 para uma pressão igual a $4,6 \times 10^{-4} \text{ mbar}$, obtivemos uma densidade de plasma igual a $2,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Estes resultados experimentais obtidos com SFLNR estão em concordância com os valores obtidos com uma sonda eletrostática simples para plasma de argônio em condições de descarga semelhantes.

Capítulo 9

Conclusões e Comentários

Neste trabalho, de caráter essencialmente experimental, foram descritos os principais componentes do experimento bem como o método de diagnóstico de plasma usando o feixe de partículas neutras.

A primeira parte deste trabalho consistiu basicamente no estudo do feixe de lítio, sua caracterização e otimização. A determinação dos parâmetros ótimos de operação do sistema de geração, extração e focalização do feixe foram fundamentais para que tivéssemos um feixe com características adequadas para aplicação do diagnóstico de plasma no sistema IIIP. Pudemos nesta fase avaliar os fatores que influenciam o diâmetro, o foco e a densidade de corrente de ions do feixe de lítio obtidos no nosso canhão.

O uso da fonte com β -eucryptita vítreo mostrou ser o mais eficiente. Com a fonte vítrea obtivemos feixes com maior intensidade de corrente e com maior vida útil. O uso do feixe de elétrons na produção deste tipo de fonte simplificou imensamente o processo de vitrificação. Antes, para produzir uma fonte vítrea gastava-se horas, e muitas vezes devido ao estresse provocado no filamento do cadinho por causa do aquecimento exagerado necessário para fusão do composto, perdia-se a fonte ou reduzia a vida útil do cadinho. O custo destes cadinhos de alta eficiência é bastante alto (~ U\$500).

A otimização do processo de neutralização do feixe, permitiu prolongar a vida útil da carga de sódio, reduzindo assim a necessidade da difícil tarefa de repor a carga, evitando a constante quebra do vácuo para abertura da câmara.

O estudo do processo de injeção do feixe no gás neutro apresentado no capítulo 7, permitiu ter uma noção das reais características que o feixe deve possuir para a sua aplicação em diagnóstico, e mostrou também a necessidade de se ter um sistema óptico otimizado para detectar a luz devida à emissão do feixe quando este colide com o gás.

Com a aplicação do feixe de Li^0 no plasma houve a necessidade de aumentarmos a energia do feixe para que pudéssemos medir a sua emissão, através de uma melhor relação sinal/ruído. Com o aumento da energia, foi necessário ajustarmos os parâmetros de operação para que o feixe fosse devidamente focalizado.

O uso de detetores do tipo SED (Secondary Electron Detector) na medida do feixe, é muito simples e fácil de implementar, mas com certeza não é o mais adequado, principalmente quando se deseja medidas absolutas e de alta precisão. Porém comparando os nossos resultados com de outros autores percebemos que o nosso erro é relativamente pequeno. O uso de copo de Faraday para detectar as corrente de feixe não mostraram diferença significativas nas medidas, e detetores mais sofisticados como os que utilizam sensores piezoelétricos são de difícil aquisição e possuem preços elevados, não justificando o seu emprego para o nosso tipo de experimento.

Medidas de densidade n_e em plasma de argônio produzido no sistema IIIP feitas com o uso da SFLNR resultaram para uma pressão de $7,0 \times 10^{-4}$ mbar, uma densidade de $3,3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, e para a pressão de $4,6 \times 10^{-4}$ mbar, uma densidade de $2,0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Comparando estas medidas de densidade com medidas feitas anteriormente utilizando sondas de Langmuir percebemos que nossas medidas estão coerentes, e demonstra a confiabilidade do sistema.

O uso do método da comparação dos fluxos de fótons na linha 6708 Å para determinação da densidade do plasma tem como principal vantagem a sua simplicidade. O procedimento da medida não exige cuidados especiais, o efeito do desalinhamento do sistema experimental, tanto óptico quanto do

perfil do feixe são cancelados quando a razão N_{vp}/N_{vg} é medido. Nenhuma medida absoluta da emissão do fluxo de fótons é necessária.

A partir das medidas de densidade do plasma de argônio no sistema IIIP utilizando a SFLNR e espectroscopia, apresentada neste trabalho de tese, demonstramos que esta técnica de diagnóstico é possível e prática para medidas de densidade n_e com resolução espacial em plasmas tecnológicos e abre a perspectiva de novas aplicações nesta área, principalmente na determinação de perfis de densidade da bainha do plasma nas regiões próximas à amostras pulsadas com alta tensão, ou em plasma de potencial flutuante elevado onde o uso de sondas eletrostáticas não são as mais adequadas.

3. Back, D. L., NRL "Plasma Technology", Nat. Washington, Naval Research Laboratory, 1983, 30p.
4. Bannister, R. et al. Proc. of 1983 Conf. on Plasma Phys. (Singapore)
5. Drell, P. "Interactions of Electrons and Ion Optics", Academic Press, pp. 120-121 (New York, 1979).
6. Edwards, Lawrence Edward. "The use of electron beam technology in the development of electron beam sources and accelerators" United Kingdom, British High Voltage Institute, 1983, 10p.
7. Hiler, Y., Elmer, W. "The electron beam of matter - an interdisciplinary review physics of plasmas", Oxford Univ. Press, 1984, 400p.
8. Fomst, I. R., "Physics of a laboratory gas of electron", Nat. Acropolis, México, Revista Mexicana F. Fis. 1983, 20p.
9. Frank-Einstein, U. G., "Plasma and the development of matter", 1982.

Referências Bibliográficas

1. Berni, L. A. "*Espalhamento Thonson no toroide compacto TC-1*" Campinas, 1996, 108p. Tese (Doutorado em Ciências), Inst. de Física, Unicamp.
2. Berni, L. A. et al. "*Experimental results of a dc glow discharge source with controlled plasma floating potential for plasma immersion ion implantation*" J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (UK. 2000) 1592-1595,
3. Book, D. L., NRL "*Plasma Formulary*", 1.ed. Washington, Naval Research laboratory, 1983, 20p.
4. Brandenburg, R. et al. Proc. of 1998 Int. Conf. on Plasma Phys. (In press)
5. Dahl, P. "*Introduction to electron and ion optics*". Academic Press. pp. 120-121 (New York, 1973)
6. Edwards, Instruction Manual, "*Auto 306 accessories: EB3 Multihearth Electron Beam Source and accessories*" United Kingdom, Edwards High Vacuum International, 1993, 111p.
7. Elizer, Y., Elizer, S. "*The fourth state of matter – an introduction to the physics of plasma*", Bristol and Philadelphia, Adan Hilger, 1989, 300p.
8. Forrest, I. B., "*Plasma en el laboratorio y en el cosmos*"; 1.ed. en español, México, Reverte Mexicana S. A., 1968, 175p.
9. Frank-Kamenetskii, D. A., "*Plasma: the Fourth State of Matter*", 1982.

10. Gomes, G. F. "*Modificação de superfície de aço inoxidável ABNT 304 por Implantação de Íons de Nitrogênio por Imersão em Plasma.*" Lorena, 2000, 287p. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais), Dep. Materiais, FANQUIL / UNESP.
11. Harting, E., Read, F. H. "*Eletrostatic Lenses*", pp.1-322, 1976.
12. Howatson, A. M. "*An Introduction to gas discharges*" 2.ed. Oxford, Pergaman Press, 244p, 1976.
13. Holmes, A. J. T. "*Beam Transport. The Physics and Technology of Ion Sources*", pp. 59-63, (Edited by Ian G, Brown. Wiley. 1989).
14. Iguchi, H. et al. "*Space and Time-resolved Measurements of Plasma Density by Lithium Neutral Beam Probe in NBT-1M*". Rev. Sci. Instrum., 56, 1050 (1985)
15. Ito, Y. et al. "*Ion rotational velocity of a fiel-reversed configuration plasma measured by neutral beam probe spectroscopy.*", Physics of Fluids, 30(1); 168-174, Jan. 1987.
16. Ito, Y. et al. "*Measurements of ion temperature and drifts energy of hydrogen plasma by neutral beam probe spectroscopy.*" Journal of Applied Physics, 58: 1752-1758, Sept. 1985.
17. Ito, Y. et al. "*Spectroscopic measurements of plasma ion density by neutral beam probing.*" Japanese Journal of Applied Physics, 2, 981-986, June 1983.
18. Kadota, K. et al. "*Plasma Diagnostics By Beam Probing*"; Plasma Physics, Vol. 20 pp 1011-1023, 1978.

19. Kamada, Y. et al. "Development of a beam probing system for measurement of density, temperature, and magnetic field of RFP Plasma". *Review of Scientific Instruments*, 58(4):530-535, Apr. 1987.
20. Lomanaco, O., O. "Estudos espectroscópicos em um dispositivo de descarga pulsada do tipo Z-Pinch", Guaratinguetá, 1997, 87p. Dissertação (Mestrado Física - Física de Plasma), FEG, UNESP.
21. Miranda, A. D. "Diagnóstico de Plasmas de Alta e Baixa Temperatura", 45p. (Relatório Final de Iniciação Científica - PIBIC/CNPq) ITA/INPE. São José dos Campos, 2000.
22. Ogasawara, T.; Almendra, E. Rocha e; Silva, F. T. da; "Lítio metálico: o estado da arte de sua obtenção e perspectivas para o Brasil" *Rev. Metalurgia & Materiais*, PP 62-66, (1995). São Paulo - SP
23. Pierce, J. R.; "Theory and Design of Electron Beams". Van Nostrand, pp. 177-181, (1954). Toronto
24. Sasaki, S. et al. "Edge plasma density reconstruction for fast monoenergetic Lithium beam probing". *Rev. Sci. Instrum.*, 64. pp. 1699-1704 (1993).
25. Silva, R. R. da "Desenvolvimento de Fonte de Lítio para Diagnóstico de Plasmas". São José dos Campos, 1995, 98p. Dissertação (Mestrado em Física de Plasma), Dep. Física, ITA, (1995)
26. Ueda, M. et al. "A comparison of the Li^+ emission properties of pasty, liquid and glassy β -eucryptite ion sources", *J. Phys. D: Appl. Physics*, 30 pp. 2711-2716 (UK. 1997)

27. Ueda, M. et al. "*Measurements of the edge plasma density profile in CHS by fast neutral lithium beam probing*". J. Nucl. Mater., 196-198. pp. 923-927 (1992)
28. Ueda, M., Machida, M. "*Feixe Intenso de Partículas de Aplicação Múltiplas*"; INPE 4576-RPE/568, (1988)
29. West, P. W. et al "*Diagnostic instrument for the measurement of poloidal magnetic fields in tokamaks*". Rev. Sci. Instrum., 57. pp. 1552-1556 (1986)
30. Zoletnik, S. et al. Proc. of 1998 Int. Conf. on Plasma Phys. (In press)



