

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Mestrado em Física

Tiago Mendes Rodrigues

**ESTUDOS DA EMISSÃO, ACELERAÇÃO, FOCALIZAÇÃO E
DETECÇÃO DE UM FEIXE DE ÍONS POSITIVOS EMITIDOS POR
UMA MISTURA DE Li_2CO_3 , SiO_2 E Al_2O_3**

Juiz de Fora
2012

Tiago Mendes Rodrigues

Estudos da emissão, Aceleração, Focalização e Detecção de um Feixe de Íons Positivos Emitidos por uma Mistura de Li_2CO_3 , SiO_2 e Al_2O_3

Dissertação apresentada ao Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito para obtenção do grau de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Souza Melo

Juiz de Fora
2012

Tiago Mendes Rodrigues

**ESTUDOS DA EMISSÃO, ACELERAÇÃO, FOCALIZAÇÃO E
DETECÇÃO DE UM FEIXE DE ÍONS POSITIVOS EMITIDOS POR
UMA MISTURA DE Li_2CO_3 , SiO_2 E Al_2O_3**

Dissertação apresentada ao Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito para obtenção do grau de Mestre em Física.

Aprovada em 02 de julho de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilson de Souza Melo (orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcelo Martins Sant'Anna
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Maikel Yusat Ballester Furones
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 2012

“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original.”

Albert Einstein

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson de Souza Melo, por ter confiado a mim este trabalho e pela sua confiança e dedicação ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. Fabio Zappa, por toda a sua dedicação, disposição e paciência, tornando possível toda a execução deste trabalho e pela ajuda na realização das medidas e solução dos problemas que iam surgindo.

Aos professores da Pós-Graduação: Dr^a Maria Cristina Andreolli Lopes, Dr. Sidiney de Andrade Leonel e Dr. Pablo Zimmermann Coura.

Ao amigo Alberto Losqui, pelos conselhos, apoio e amizade que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao amigo Raphael Taligliatti de Oliveira, que deu início a esse projeto, pela sua dedicação, apoio e ensinamentos que tanto me ajudaram na realização deste trabalho.

Ao amigo Adriano de Oliveira Zangirolami que sempre se mostrou à disposição para elucidar minhas dúvidas e sempre disposto a ajudar no que fosse preciso.

Ao amigo Evandro Santos, pelo seu companheirismo e amizade ao longo dessa caminhada.

Aos demais amigos do laboratório: Weiller, Emerson, Mariana, Tiago e Gustavo.

Aos amigos da pós-graduação: Thiago, José Henrique, Felix, Alcides e Rodrigo, pelos inúmeros grupos de estudos de Mecânica Quântica III.

Aos colegas de sala: Baltazar, Wesley, Marcelo Alan e Lucas.

Aos demais colegas da pós-graduação.

Ao secretário da pós-graduação, Domingos Lopes.

Ao Técnico em Mecânica Fernando Dilly, que possibilitou a execução do projeto.

Aos demais professores do Departamento de Física.

Ao Departamento de Química da UFJF, por sempre estar à nossa disposição quando precisávamos.

À minha avó Conceição, por além de ser minha vó é também minha mãe. Por todo o seu carinho, dedicação que me fizeram ser o que sou hoje.

Às minhas tias Vanda, pela sua dedicação com a família, tia Vera, pelas orações, tia Salete e Rozeli.

Aos meus tios Sebastião Carlos, Joaquim, Ronaldo, Rozélio e Luis Otávio ao qual os tenho como irmãos.

A todos os meus primos e primas.

A minha mãe, Ana Maria, e minhas irmãs Luciana e Janaína.

Ao meu avô, José Rodrigues Machado, sempre presente, por tudo o que ele foi e pelo que representa em minha vida.

Aos meus amigos Conrado, Henrique Detoni, Henrique Porto, Cleber, Rodrigo, Francisco, Fabio, Beatriz, Daiane, Paulo Victor, Felipe, João Carlos, Leonardo, Messias, Marcos Paulo, Wilsinho e Frederico pela amizade e companheirismo ao longos desses anos.

Aos amigos de república, em especial ao Bruno, Fabricio, Humberto e Júnior.

À Prefeitura Municipal de Rochedo de Minas, por confiar na nossa educação, e em especial ao “Amarelinho” e seu motorista José Almir.

E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, foram responsáveis por essa conquista.

Resumo

A construção de um acelerador de baixa energia no Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora tem como objetivo estabelecer neste departamento uma linha de pesquisa experimental em Colisões Atômicas e Física de Superfície, ampliando o espectro de investigação teórico e experimental pois possibilitará a implantação de técnicas de análise de superfície por impacto de íons e estudo de colisões íon/átomo/molécula através da espectroscopia de massa. Uma máquina como esta é composta basicamente de uma fonte de íons, um estágio de aceleração e outro estágio de focalização do feixe. Durante esses estágios, os íons são submetidos a diferentes potenciais, que os acelera em direção à câmara de detecção, passando por um conjunto de lentes eletrostáticas para focalizar o feixe, otimizando o número de íons que são detectados. Estes íons detectados serão posteriormente utilizados em estudos de seções de choque e análise de superfícies.

Abstract

The construction of a low energy particle accelerator at the Physics Department of Federal University of Juiz de Fora has the aim of establishing at this department an experimental research line on atomic collisions and surface physics, increasing the theoretical and experimental investigation spectrum because it will enable the implantation of techniques in analysis of surface by impact of ions and the ion/atom/molecule study through mass spectroscopy. A machine like this one is basically composed by an ion source, an acceleration stage and another stage of beam focusing. During these stages, the ions are subjected to different potentials, that accelerates them towards the detection chamber, through a set of electrostatic lenses to focus the beam, optimizing the number of ions that are detected. These detected ions will be later used in studies of cross-sections and surface analysis studies.

Conteúdo

Resumo	vii
Abstract	viii
Introdução	1
1 Aceleradores de Partículas	3
1.1 Introdução	3
1.2 História das Colisões Atômicas	5
1.3 Aceleradores Lineares	6
2 Ótica de Partículas Carregadas	8
2.1 Introdução	8
2.2 Comportamento de Partículas Carregadas em Campos Eletrostáticos	9
2.3 Definições e medidas das tensões das lentes	13
2.4 Ótica de partículas em campos axialmente simétricos	13
2.5 Geometria de Lentes	15
2.5.1 Lentes com dois elementos	15
2.5.2 Lentes com três elementos	16
2.6 Programas de Simulação	17
3 Fontes de Íons Positivos	18
3.1 Introdução	18
3.2 Fontes Termiônicas	19
3.3 Características da Substância Li- β -eucryptita	20
3.4 Preparação da Substância Emissiva	22
3.5 Descrição da Fonte Termiônica	25
3.6 Adaptação do Filamento Emissivo ao Sistema de Extração	29

CONTEÚDO

x

4	Montagem do Acelerador	31
4.1	Introdução	31
4.2	Componentes Eletrônicos e Mecânicos	33
4.2.1	Transformadores de Isolamento	33
4.3	Fontes de Tensão e de Corrente	37
4.4	<i>Racks</i>	40
4.5	Circuito Elétrico e Montagem dos Componentes Eletrônicos	44
4.6	Simulação, Construção e Montagem das Lentes Eletrostáticas	49
4.7	Montagem da Linha de Colisões	55
4.8	Circuito para o controle das tensões na lente	56
4.9	Circuito de Emissão/Extração e Leitura da Corrente de Emissão	58
5	Resultados	62
5.1	Procedimentos Pré-Operacionais	62
5.2	Estudo da Emissão da Fonte Termiônica	64
5.3	Detecção da Corrente Iônica	72
5.4	Estágio de Aceleração e Focalização das Lentes	75
6	Conclusões	82
A	Tabelas	85

Lista de Figuras

1.1	Princípio de operação de um acelerador linear [1]	6
1.2	Acelerador linear de 3 Km de comprimento de Stanford [1].	7
2.1	Partícula carregada em um campo elétrico estático não-uniforme [2]. .	10
2.2	Movimento de uma partícula carregada entre dois eletrodos de po- tenciais diferentes [3].	12
2.3	Analogia com lentes óticas.	13
2.4	Lente eletrostática consistindo de dois tubos cilindricos. a) repre- sentação esquemática, b) o potencial e sua segunda derivada, c) analo- gia com a ótica geométrica [3].	14
2.5	Lentes de 2, 3 e 4 elementos [3].	16
3.1	Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo ionização de su- perfície.	19
3.2	Corrente extraída em função da voltagem aplicada para diferentes temperaturas do filamento obtida por Lambert <i>et al.</i> [4].	21
3.3	(esq.) Parafuso utilizado para moldar a espiral no filamento; (dir) Filamento já em formato de espiral já preso à fonte e recoberto com zirconato de bário, pronto para receber a pasta com os reagentes. . .	25
3.4	Esquema e dimensões da estrutura interna da fonte de íons.	26
3.5	Foto da estrutura interna da fonte de íons.	27
3.6	Esquema do arranjo espacial do par de eletrodos cônicos responsável pela extração dos íons emitidos pelo filamento emissivo.	28
3.7	Cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termiônica (primeiro eletrodo do sistema de extração)	28

3.8	Cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termiônica (primeiro eletrodo do sistema de extração)	28
3.9	Cilindro metálico de conexão para a montagem do sistema de extração	29
3.10	Visão (a) expandida e (b) compacta da fonte de íons.	29
3.11	Visão (a) expandida e (b) compacta da fonte de íons.	30
4.1	Degraus de Potencial ao qual o feixe é submetido.	32
4.2	Diagrama elétrico dos estágios de emissão, extração e aceleração dos íons.	32
4.3	Diagrama Elétrico dos Estágios de Extração e Aceleração do Feixe.	34
4.4	Diagrama elétrico de um transformador de isolamento.	36
4.5	Diagrama de blocos de uma fonte de tensão reguladora [5].	38
4.6	Fontes de tensão para os estágios de (A) aceleração e de (B) extração; (C) Fonte de corrente para o aquecimento do filamento emissivo.	40
4.7	Vista lateral do <i>rack</i> externo com um dos transformadores de isolamento.	41
4.8	Vista do <i>rack</i> interno: sem as prateleiras (A); com as prateleiras (B).	41
4.9	Pés de <i>nylon</i> responsáveis pelo isolamento do <i>rack</i> externo.	42
4.10	Isolamento da fonte de corrente.	43
4.11	Arranjo dos equipamentos eletrônicos no <i>rack</i> interno.	44
4.12	Parte frontal do acelerador com os bastões de PVC para o ajuste das fontes.	45
4.13	Gaiola de proteção da Fonte de íons.	46
4.14	Detalhes das ligações elétricas no conector-barras envolvendo o transformador de isolamento, a fonte de tensão e a fonte de corrente no <i>rack</i> externo.	48
4.15	Prateleira superior do <i>rack</i> interno com o suporte para a fonte.	50
4.16	Primeira simulação das lentes utilizando-se o SIMION.	51
4.17	Segunda simulação das lentes utilizando-se o SIMION. Observe que o feixe continua divergindo ao longo da trajetória.	52
4.18	Simulação com lente de 3 elementos.	52
4.19	Simulação com lente de 2 elementos. Observe que o feixe não diverge ao longo do percurso.	52

4.20	Projeto de construção da lente eletrostática de dois elementos.	53
4.21	Montagem das lentes. (A) Adaptação da flange para os parafusos. (B) Parafusos conectados à flange com os isolantes de cerâmica. (C) Elementos da lente montados sobre os parafusos. (D) Montagem final da lente dentro da flange.	54
4.22	Esquema da montagem do acelerador com a discriminação dos com- ponentes.	55
4.23	Resitores funcionando como um divisor de tensão para as lentes. . . .	56
4.24	Circuito elétrico das tensões aplicadas às lentes.	57
4.25	Posições possíveis para o fio que alimenta a lente.	58
4.26	Circuito de emissão, extração e aceleração dos íons provenientes do filamento aquecido.	60
4.27	Sentido da corrente de emissão iônica e das correntes eletrônicas de- vidas ao aterramento dos lados esquerdo e direito do circuito.	61
5.1	Fonte com o filamento a ser inserido no acelerador.	63
5.2	Gráfico da corrente de emissão <i>versus</i> corrente de aquecimento para o Filamento 1.	66
5.3	Gráfico Corrente de Aquecimento \times Corrente de Emissão para o fila- mento 1.	67
5.4	Gráfico Corrente de Aquecimento \times Corrente de Emissão para o fila- mento 2.	68
5.5	Gráfico Potencial de Extração \times Corrente de Emissão para o fila- mento 2.	69
5.6	Gráfico Potencial de Extração \times Corrente de Emissão para o fila- mento 2 em escala logarítmica e o ajuste linear da reta.	70
5.7	Gráfico Potencial de Extração \times Corrente de Emissão para o fila- mento 2 e o ajuste da reta.	70
5.8	Gráfico da variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo para dois filamentos igualmente confeccionados e tensão de extração fixa em 1 kV [6].	71

5.9	Conexão elétrica entre o copo de Faraday e o picoamperímetro. O aterramento do picoamperímetro é feito na própria linha, como pode ser visto pelo fio verde conectado à flange.	73
5.10	Picoamperímetro juntamente com os medidores de pressão e a fonte 30 kV.	74
5.11	Gráfico da Corrente de aquecimento \times Corrente detectada para o filamento 1.	74
5.12	Gráfico da Corrente de aquecimento \times Corrente detectada para o filamento 2.	75
5.13	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada para o filamento 1.	76
5.14	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada para o filamento 2.	76
5.15	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada encontrada por [6].	77
5.16	Gráfico das correntes de emissão e corrente detectada \times potencial de extração para um potencial de aceleração de 15 kV.	77
5.17	Gráfico da corrente detectada \times potencial de aceleração.	78
5.18	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada e corrente de emissão para a posição 2.	79
5.19	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada e corrente de emissão para a posição 3.	80
5.20	Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada e corrente de emissão para a posição 4.	80
5.21	Gráfico da tensão de extração \times correntes detectadas com o divisor de tensão nas posições 2, 3 e 4.	81
6.1	Filamentos após a realização da medidas.	83

Introdução

Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma linha de colisões atômicas e ciência de superfícies que está sendo implantado no Laboratório de Colisões e Ciências de Superfícies do DF-UFJF.

Este projeto utilizará uma fonte termiônica de íons de lítio cujo funcionamento baseia-se na emissão de íons positivos a partir de um filamento de tungstênio (W) recoberto por uma mistura de Li_2CO_3 , SiO_2 e Al_2O_3 .

Neste trabalho, descreveremos o processo de confecção do filamento emissivo, responsável pela produção dos íons que serão acelerados e sua adaptação ao sistema de extração da fonte termiônica. Descreveremos todo o projeto, os componentes utilizados e todo o circuito elétrico que possibilita as etapas de emissão, extração e aceleração do feixe.

Estando a fonte em operação, é necessário um estudo de sua emissão, e da corrente que é detectada, comparando com resultados anteriores [6]. A corrente detectada está diretamente ligada às alterações na geometria dos sistemas de extração e aceleração dos íons. Descreveremos todas as medidas realizadas e os resultados obtidos relativos à emissão, extração, aceleração e focalização dos íons. Em seguida, será feito um estudo sobre a melhor configuração entre as voltagens de emissão e extração que otimizam o funcionamento do acelerador, de modo que o mesmo possa ser usado em experimentos que envolvam estudos de seções de choque envolvendo íons de Li^+ e alvos gasosos, bem como o estudo de análise de superfícies.

No Capítulo 1, apresentaremos um breve histórico sobre colisões atômicas e alguns tipos de aceleradores, dando ênfase ao acelerador eletrostático, o qual se baseia esse trabalho.

No Capítulo 2 descreveremos o comportamento de partículas carregadas submetidas aos efeitos de um campo elétrico estático e estudaremos o conceito de lente

eletrostática e sua analogia com as lentes óticas.

No Capítulo 3 descreveremos o funcionamento da fonte de íons utilizada na construção deste acelerador, todo o processo de fabricação da substância emissiva e sua adaptação à fonte.

O Capítulo 4 trata de toda a montagem do acelerador, desde o circuito elétrico até os componentes utilizados nos estágios de emissão, extração e detecção do feixe, bem como a construção da lente eletrostática responsável pela focalização do feixe.

No Capítulo 5 apresentaremos os resultados das medidas realizadas referentes aos processos ao qual os íons são submetidos e uma comparação com os resultados obtidos pelo acelerador sem o estágio de aceleração, isto é, referente ao trabalho [6].

Finalmente, no Capítulo 6, será apresentado um resumo das conclusões sobre as medidas e discussões realizadas.

Capítulo 1

Aceleradores de Partículas

1.1 Introdução

As partículas e a radiação podem ser detectadas apenas através de suas interações com a matéria. Através da realização de colisões atômicas entre partículas subatômicas, aceleradas até uma certa velocidade e colidi-las com um determinado alvo, que pode ser átomos, moléculas ou superfícies sólidas ou líquidas [7] nos permitem obter muitas informações a respeito das propriedades tanto das partículas projétil quanto das partículas alvo [8]. Sendo assim, o uso de aparelhos que aceleram partículas para os estudos de colisões é de fundamental importância.

Os aceleradores de partículas são equipamentos que fornecem energia a feixes de partículas subatômicas eletricamente carregadas acelerando-as a velocidades altas, geralmente superiores a 1/1000 da velocidade da luz, c . Para que sejam atingidas estas velocidades, que em alguns casos chegam quase na velocidade da luz, as partículas sofrem a ação de forças eletromagnéticas, com arranjos que diferem bastante entre os diversos tipos de aceleradores.

As partículas são aceleradas para que possamos conhecê-las melhor e um dos meios de fazer isso é colidi-las em altas velocidades com outras partículas (átomos, fótons, elétrons, moléculas, etc) ou com sólidos e usarmos essas colisões para conhecer melhor os “alvos”, por exemplo, obtendo a composição química de objetos sólidos. Grande parte das informações que temos sobre os átomos e sobre as moléculas vem dessas colisões, feitas de forma controlada. Foram experiências usando aceleradores que nos permitiram a compreensão que temos dos átomos e das

substâncias que nos rodeiam, fornecendo as bases da Mecânica Quântica no início do século passado. Nessas experiências, um átomo (em geral ionizado positiva ou negativamente) ou um elétron é acelerado até uma velocidade alta e colide com um “alvo”, que pode ser um outro átomo, uma molécula, um objeto sólido, a superfície de um líquido, etc.

Os detalhes dos objetos que podem ser vistos (resolvidos) são dados pelo comprimento de onda da radiação. Para penetrarmos no interior dos átomos e das moléculas, é necessário o uso de uma radiação cujo comprimento de onda seja muito menor que as dimensões atômicas.

Em 1923, Louis-Victor de Broglie anunciou que os elétrons apresentavam características tanto ondulatórias como corpusculares. Sendo assim, ele acreditou que as partículas se comportavam como ondas cujo comprimento estaria associado ao comportamento ondulatório da “partícula” com sua massa referida mediante a equação

$$\lambda = \frac{h}{P} \quad (1.1)$$

onde P representa o módulo do vetor quantidade de movimento que no caso não-relativístico é dado por $P = mv$ e h é a constante de Planck, dada por $h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

Então o comprimento de onda de de Broglie associado de uma partícula de sondagem, em vez do comprimento de onda “macroscópico” define o tamanho mínimo do objeto que possa ser resolvido. O comprimento de onda de de Broglie é inversamente proporcional ao momento da partícula.

Devido a disposição geométrica dos campos eletromagnéticos responsáveis pela aceleração das partículas, basicamente são classificados em dois tipos: lineares e cíclicos. Os aceleradores lineares fazem a partícula seguir uma trajetória reta onde a energia final obtida é proporcional à soma das diferenças de potencial geradas a partir dos mecanismos de aceleração dispostos ao longo da trajetória. Além dos aceleradores lineares existem os aceleradores cíclicos. Estes são construídos para promover a trajetória curvada das partículas pela ação dos campos magnéticos em espiral ou circular. Este tipo de acelerador força a partícula a passar diversas vezes pelos sistemas de aceleração. A energia final das partículas depende da amplitude da diferença de potencial aplicada e do número de voltas que estas dão no dispositivo.

1.2 História das Colisões Atômicas

Nos primeiros aceleradores, as partículas eram aceleradas por uma alta voltagem aplicada entre um catodo e um anodo (os eletrodos). Estes eram chamados de tubos de raios catódicos e foram concebidos no final do século XIX. Usando tubos de raios catódicos, os raios-X foram descobertos em 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen que ganhou o primeiro prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta. Em 1896 Joseph John Thomson investigou a natureza dos raios catódicos onde descobriu-se que estes eram carregados e que possuíam uma razão carga-massa precisa. Esta descoberta da primeira partícula elementar, o elétron, marcou uma nova era, a era eletrônica que data de meados de 1896. Thomson foi laureado com o prêmio Nobel em 1906 pelo trabalho relacionado a esta descoberta. O acelerador mais comum nos dias de hoje é o tubo de raios catódicos que é usado em aparelhos de TV mais antigos e monitores de computador, embora já estejam sendo substituídos pelos modelos de LCD ou LED devido à baixa dos preços e pelo consumo menor de energia. No tubo, um feixe de elétrons, após ser acelerado a uma energia máxima de cerca de 30.000 eV, é varrido ao longo de uma tela que emite luz quando atingida por estes elétrons.

Os diferentes tipos de aceleradores foram inventados durante um intervalo de tempo de cerca de quatro décadas. Por volta de 1920, o primeiro acelerador de partículas de alta voltagem formado por dois eletrodos colocados dentro de um recipiente em vácuo tinha uma queda de potencial da ordem de 100 kV e foi concebido por John Douglas Cockcroft e Ernest Thomas Sinton Walton. Mais tarde nesta mesma década foi sugerido o uso de potenciais variáveis no tempo ao longo de uma série de *gaps*. Esta sugestão de acelerar partículas de uma forma repetida inspirou Ernest Orlando Lawrence a trabalhar num novo conceito para aceleração de partículas. No ciclotron inventado por ele, as partículas circulam num campo magnético e passam através do mesmo *gap* acelerador várias vezes. Ao invés de uma voltagem DC, uma voltagem de alta frequência é aplicada entre o *gap* de modo que as partículas são aceleradas ao longo de uma trajetória espiral de uma maneira repetitiva. Depois da invenção do princípio de estabilização de fase em meados de 1940, dois novos tipos de aceleradores foram concebidos: o acelerador linear e o síncrotron. No acelerador linear, os *gaps* são colocados ao longo de uma linha reta. No síncrotron, o campo magnético é aumentado durante a aceleração de modo que as partículas se movem

em anéis de órbita constante. Nestes aceleradores, as partículas são aceleradas de uma maneira repetitiva e a energia é limitada pelo tamanho no acelerador e não pela voltagem máxima que pode ser alcançada por ele.

1.3 Aceleradores Lineares

Em 1924, Swede G. Ising sugeriu que a energia máxima poderia ser aumentada substituindo um simples *gap* com uma voltagem DC por uma linha reta constituída de vários eletrodos cilíndricos ocos com voltagens pulsadas, como ilustra a Fig. (1.1). O norueguês Rolf Widerøe percebeu que, se a fase da voltagem alternada mudasse

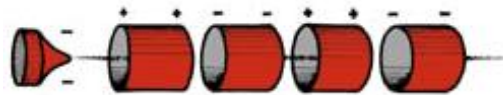


Figura 1.1: Princípio de operação de um acelerador linear [1]

de 180 graus durante a trajetória da partícula entre os *gaps*, a partícula poderia ganhar energia em cada *gap*. Baseado nessa ideia, ele construiu um acelerador de três estágios para íons de sódio. Nasceu, então, a ideia do acelerador linear. As partículas eram aceleradas em pequenos *gaps* e entre os *gaps* elas se moviam dentro de eletrodos cilíndricos blindados. Um versão aprimorada de um acelerador linear foi concebida anos depois por Luis Walter Alvarez que gerou a voltagem AC de uma forma diferente: ondas de rádio frequência estacionárias dentro de cavidades cilíndricas. Estas chamadas Estruturas de Alvarez ainda são utilizadas para aceleração de íons. Alvarez ganhou o Nobel em 1968 pela suas contribuições decisivas à física de partículas elementares. A Fig. (1.3) ilustra o acelerador linear de Stanford.



Figura 1.2: Acelerador linear de 3 Km de comprimento de Stanford [1].

Capítulo 2

Ótica de Partículas Carregadas

2.1 Introdução

Como vimos no Capítulo 1, um acelerador linear é um tipo de acelerador no qual as partículas são aceleradas de modo a seguir uma trajetória retilínea. Esta aceleração é obtida através da disposição de um determinado número de eletrodos em linha reta (Veja Fig. (1.1)) de tal forma que as partículas carregadas, provenientes de uma fonte, recebam sucessivos incrementos de energia à medida que elas avançam na linha.

Na construção de um acelerador, é necessário o controle do feixe de partículas carregadas. Esse controle pode ser feito com o auxílio de lentes. As lentes possuem uma ação focalizadora que maximiza a eficiência de transmissão do sistema de transporte. Lentes podem ser constituídas de campos elétricos e/ou magnéticos. Na construção deste acelerador trataremos apenas de lentes eletrostáticas. Elas são apropriadas para várias aplicações, são fáceis de construir e operar. A faixa de velocidades das partículas que trataremos aqui é da ordem de alguns keV, e efeitos relativísticos serão desprezados. A equação diferencial que descreve a deflexão de partículas carregadas por campos puramente eletrostáticos não inclui nem a massa nem a carga da partícula. Assim, com as voltagem e polaridade apropriadas, um sistema eletrostático de lentes pode igualmente ser utilizado para qualquer partícula, independente da sua carga e massa. Os íons são mais pesados do que elétrons, então viajarão muito mais lentamente do que os elétrons, mas seguirão as mesmas trajetórias.

Em uma lente eletrostática, a distribuição de potenciais não pode ser geralmente expressa em termos de uma função exata, nem é possível deduzir matematicamente a trajetória do elétron mesmo que o campo tenha sido experimentalmente mapeado. Nestes casos, é útil introduzir a ideia de refração de um feixe de elétrons numa fronteira de potencial. Já sabemos de cursos elementares que o elétron se move na direção oposta ao campo elétrico. Vamos agora pensar em termos de linhas (ou superfícies) de potencial e discutir a deflexão de elétrons em termos de estágios sucessivos de refração quando passando de uma região equipotencial para outra. O campo na verdade pode variar de forma não abrupta, sem descontinuidades. Um meio com índice de refração que varia continuamente não é fácil de tratar, então é mais fácil trocá-lo por uma série de camadas com uma densidade crescente, como se faz quando tratamos refração na atmosfera.

2.2 Comportamento de Partículas Carregadas em Campos Eletrostáticos

Seja uma região na qual exista um campo elétrico $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ (campo vetorial). Suponha que $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ seja constante no tempo em todos os pontos onde ele seja definido. Podemos ter valores diferentes de $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ para pontos diferentes em relação à origem de um sistema de coordenadas pré-determinado. Uma partícula carregada positivamente, com carga elétrica q , ao ser colocada nesse campo elétrico no ponto representado pelo vetor posição \mathbf{r} , sofre uma força elétrica $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ dada por:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.1)$$

onde a força elétrica, em cada ponto do espaço onde o campo elétrico é definido, possui a mesma direção e o mesmo sentido do campo elétrico (uma vez que a carga da partícula é positiva; a força possuiria a mesma direção e sentido inverso se a partícula tivesse carga negativa).

Pela segunda lei de Newton, a força resultante $\mathbf{F}_{res}(\mathbf{r})$ sobre uma partícula está relacionada à sua massa m e a sua aceleração $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ da seguinte maneira:

$$\mathbf{F}_{res}(\mathbf{r}) = m\mathbf{a}(\mathbf{r}) \quad (2.2)$$

Sendo a força elétrica a única força atuante na partícula (desprezamos a força

de atração gravitacional pelo fato de estarmos tratando de partículas atômicas cuja massa é muito pequena), podemos reescrever a Eq. (2.1) como

$$m\mathbf{a}(\mathbf{r}) = q\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.3)$$

A força elétrica provoca um deslocamento acelerado da partícula carregada e realiza trabalho sobre ela. Esse trabalho realizado tem como efeito o aumento da energia cinética da partícula (segundo o Teorema Trabalho-Energia, o trabalho realizado por uma força qualquer sobre uma partícula é igual à variação da energia cinética da partícula entre a posição inicial e final [9]).

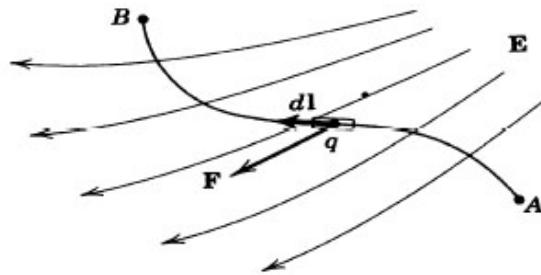


Figura 2.1: Partícula carregada em um campo elétrico estático não-uniforme [2].

Integrando-se a força elétrica sobre a distância percorrida pela carga (sobre os elementos diferenciais de deslocamento $d\mathbf{l}$, obtém-se o trabalho W realizado por ela

$$W = m \int_A^B \mathbf{a}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l}(\mathbf{r}) = q \int_A^B \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l}(\mathbf{r}) \quad (2.4)$$

Sendo $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ um campo vetorial conservativo, então $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ pode ser escrito como o negativo do campo gradiente de alguma função potencial $V(\mathbf{r})$ escalar

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla V(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

que, neste caso, é a função potencial elétrico [2]. Além disso, temos as seguintes relações cinemáticas para a aceleração $\mathbf{a}(\mathbf{r})$ e para a velocidade $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ associadas à

partícula

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}) = \frac{d\mathbf{v}(\mathbf{r})}{dt} \quad (2.6)$$

$$v(\mathbf{r}) = \frac{d\mathbf{l}(\mathbf{r})}{dt} \quad (2.7)$$

Substituindo (2.5) e (2.6) em (2.4), obtemos

$$W = \int_A^B \frac{d\mathbf{v}(\mathbf{r})}{dt} \cdot d\mathbf{l}(\mathbf{r}) = -q \int_A^B \nabla V(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l}(\mathbf{r}) \quad (2.8)$$

Com (2.7) e resolvendo a integral do lado direito da segunda igualdade, podemos escrever

$$W = m \int_A^B \mathbf{v}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{v}(\mathbf{r}) = -q(V_B - V_A) \quad (2.9)$$

$$W = \frac{1}{2}m(v_B^2 - v_A^2) = q(V_A - V_B) \quad (2.10)$$

onde v_B é o módulo da velocidade da partícula no ponto B , v_A é o módulo da velocidade da partícula no ponto A e $(V_A - V_B)$ é a diferença de potencial entre os pontos A e B .

Note que o aumento da energia cinética das partículas é proporcional à diferença de potencial a que elas estão submetidas. Sendo o potencial elétrico uma grandeza escalar, ao dispormos eletrodos em linha reta, a energia final das partículas será proporcional à soma das diferenças de potencial geradas a partir dos mecanismos de aceleração dispostos ao longo da trajetória.

O valor da diferença de potencial pode ser usado diretamente na medida do valor da energia final das partículas se utilizarmos a unidade elétron-volt (eV). 1 eV é definido como a energia ganha por uma partícula com carga elétrica elementar (o módulo do valor da carga de um elétron, isto é, $1,6 \times 10^{-19}$ C) ao ser acelerada através da diferença de potencial de 1 V [9].

O espaço entre qualquer eletrodo é então representado como preenchido por uma série de superfícies equipotenciais cuja distribuição de densidades pode ser ajustada de acordo com a precisão desejada. Suponha que um elétron de velocidade v_o se aproxime de uma equipotencial que divide dois meios de potenciais V_1 e V_2 . Os ângulos de incidência i e de refração são definidos, como em ótica, com respeito à

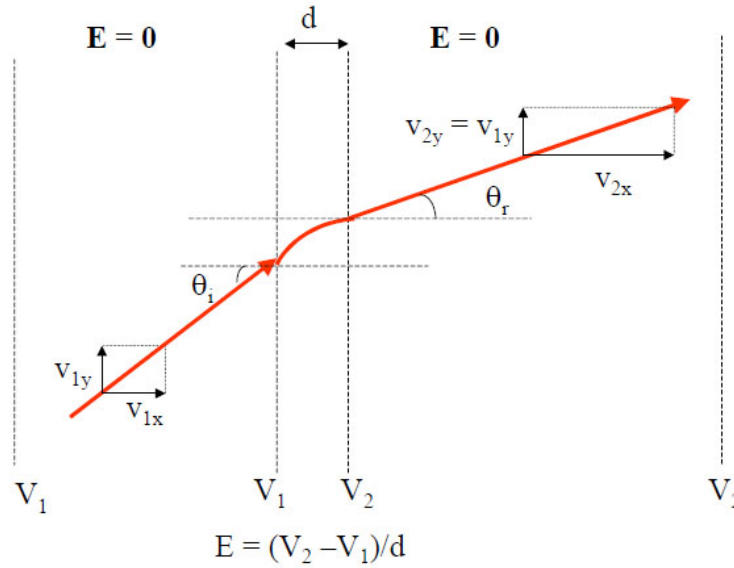


Figura 2.2: Movimento de uma partícula carregada entre dois eletrodos de potenciais diferentes [3].

perpendicular no ponto de incidência. Supondo que o elétron foi acelerado a partir do repouso,

$$q(V_1 - V_0) = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2.11)$$

Quando cruza a superfície equipotencial, a componente tangencial de sua velocidade ($v_o \sin \theta_i$) não mudará, mas a componente normal ($v_o \cos \theta_i$) mudará para $v_o \cos(\theta_r)$. Então

$$v_1 \sin \theta_i = v_2 \sin \theta_r \quad (2.12)$$

ou

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{V_1 - V_0}{V_2 - V_0}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.13)$$

onde n_1 e n_2 são definidos como índices de refração. Esta razão é constante para qualquer elétron (ou partícula carregada) e é análoga à lei de Snell para a refração ótica, conforme ilustra a Fig. (2.2)[3]. Uma analogia entre as lentes eletrostáticas e as óticas pode ser vista na Fig. (2.3).

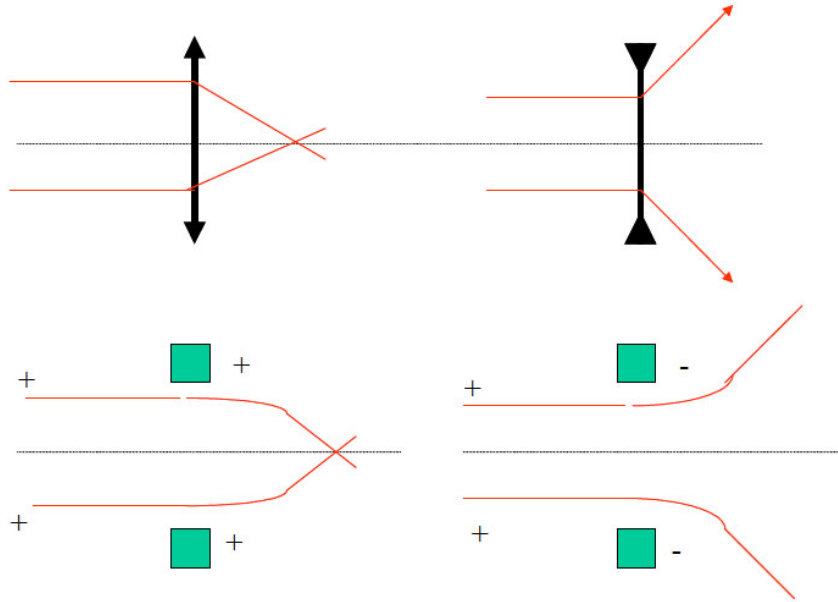


Figura 2.3: Analogia com lentes óticas.

2.3 Definições e medidas das tensões das lentes

É essencial que as tensões aplicadas V_1 , V_2 , etc... sejam medidas com respeito à uma referência correta que frequentemente não é zero. A referência correta é a energia cinética zero da partícula, ou seja, a referência é escolhida tal que a partícula terá energia cinética igual à qV quando está numa região de potencial V .

2.4 Ótica de partículas em campos axialmente simétricos

Na ausência de campos magnéticos, a equação do movimento de uma partícula carregada é escrita como

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = q \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = q \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = q \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.14)$$

Na ausência de fontes, a equação de Laplace pode ser escrita como

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.15)$$

De modo geral, não há solução analítica para a maioria dos casos, mas pode-se resolver numericamente. A maioria das lentes eletrostáticas são feitas por campos elétricos com simetria axial, obtidas por tubos ou aberturas cilíndricas.

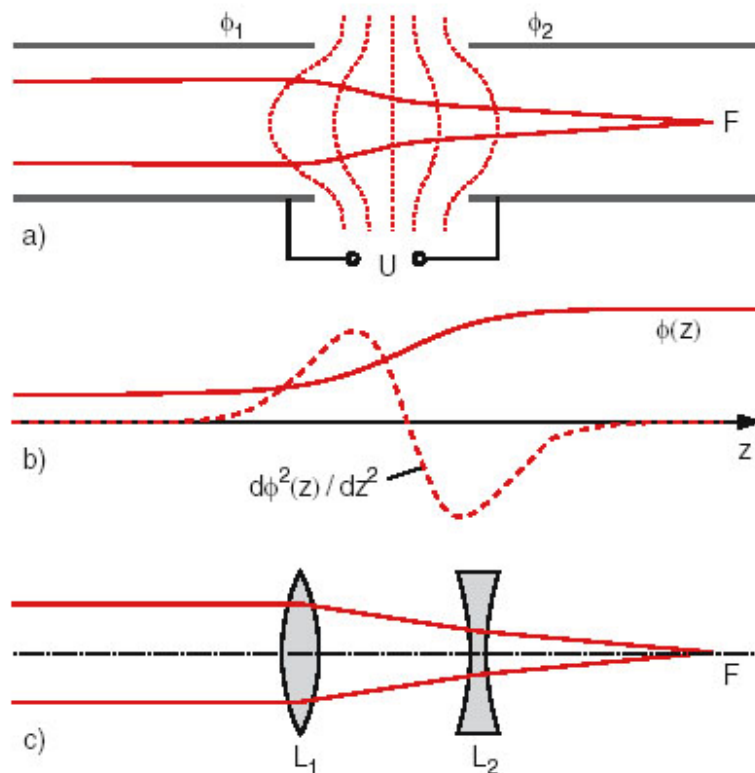


Figura 2.4: Lente eletrostática consistindo de dois tubos cilíndricos. a) representação esquemática, b) o potencial e sua segunda derivada, c) analogia com a ótica geométrica [3].

O sistema de coordenadas apropriado é o cilíndrico, r, z, ϕ . Como o sistema é axialmente simétrico, o potencial não depende do ângulo, mas somente de r e z . Para $r = 0$, a primeira derivada do potencial é nula, o que não acontece para

r diferente de zero. Ou seja, a força atua naquelas partículas que se movem fora do eixo de simetria da lente. Na Fig. (2.4), elétrons provenientes da esquerda são atraídos em direção ao eixo de simetria (note que a força é sempre perpendicular às linhas equipotenciais). Para $\phi_2 > \phi_1$, os elétrons são acelerados quando se movem do primeiro para o segundo tubo. Sua velocidade é maior no tubo da direita do que no da esquerda. Isto significa que o efeito divergente da direita é menor que o efeito focalizador da esquerda. O sistema funciona como uma lente focalizadora. Para $\phi_2 < \phi_1$, o sistema funciona como uma lente divergente.

2.5 Geometria de Lentes

Os dois tipos mais comuns de lentes eletrostática são as lentes cilíndricas e as lentes de abertura circular, cuja simetria cilíndrica é bem apropriada para feixes cilíndricos. As propriedades focais das lentes dependem do número de eletrodos que ela contém, além das dimensões e voltagens aplicadas. Lentes cilíndricas tendem a ser mais fortes e a produzir menos aberrações do que as de abertura circular. De modo geral, quanto mais eletrodos possuir uma lente, maior será o grau de controle sobre suas propriedades focais. Discutiremos aqui somente lentes cilíndricas, embora os mesmos princípios se apliquem a lentes de abertura circular. Uma figura das lentes com diferentes eletrodos é apresentada na Fig. (2.5).

2.5.1 Lentes com dois elementos

As lentes com dois eletrodos consistem de dois cilindros separados por uma distância, denominada *gap* (g), que possui o valor típico de $0,1 D$, onde D é o diâmetro da lente. O comprimento de cada um desses cilindros deve ser com esse diâmetro, de tal forma que o potencial axial possa alcançar o seu valor assintótico, isto é, onde não há efeitos de borda. Na prática isso significa que cada comprimento deva ser maior do que $1,5 D$. Os parâmetros focais da lente f_1 , f_2 , F_1 e F_2 dependem da razão das voltagens V_2/V_1 , que são aplicadas nesses eletrodos.

A desvantagem de uma lente de dois elementos é que, para uma posição do objeto fixa, a posição da imagem mudará se V_2/V_1 mudar. Nesse caso, o problema é resolvido com uma lente de três elementos.

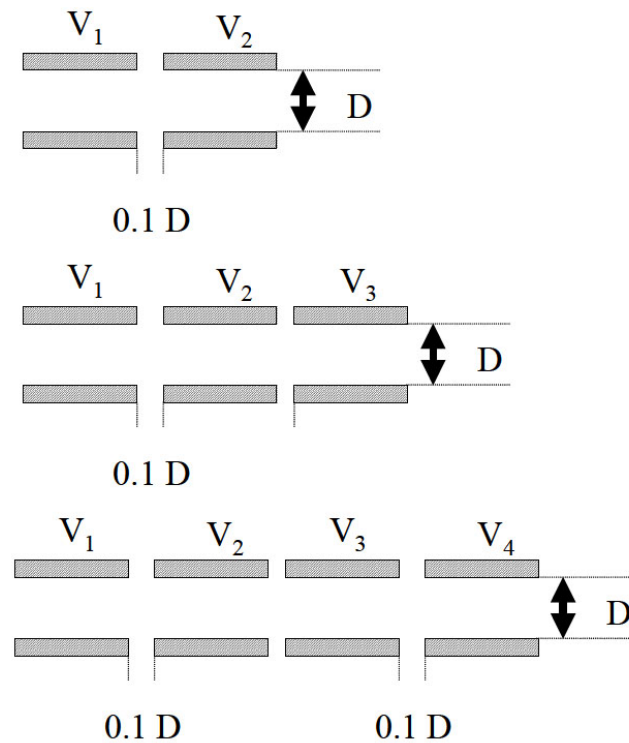


Figura 2.5: Lentes de 2, 3 e 4 elementos [3].

2.5.2 Lentes com três elementos

Nas lentes com três elementos o comprimento do elemento central é tipicamente $0,5$ ou $1,0 D$, sendo que o valor maior fornece uma faixa maior de razões entre as voltagens, ou seja, V_3/V_1 e V_2/V_1 , o que dá a esta lente uma propriedade muito útil: a razão V_3/V_1 pode ser variada mantendo fixas as distâncias do objeto e da imagem, simplesmente mudando a voltagem de focalização V_2/V_1 . Por causa desta propriedade estas lentes são às vezes chamadas de lentes *zoom*. Esta é uma propriedade muito importante porque na prática os objetos e as imagens, ou seja, fontes de partículas, detectores e analisadores de energia são frequentemente fixos. O valor V_3/V_1 pode ser maior, menor ou igual a unidade, quando esta lente recebe o nome de lente *einzel*, que é muito utilizada para focalização.

2.6 Programas de Simulação

No fim da década de 70, Don McGilvery (Latrobe University, Melbourne, Austrália) desenvolveu o software SIMION [10], o qual permite simular a geometria dos eletrodos, calcular as superfícies equipotenciais para várias configurações e determinar as trajetórias das partículas constituintes do feixe submetidas às respectivas distribuições de potencial. Neste programa, o espaço ocupado pelos eletrodos não é tratado como contínuo, mas como uma rede de pontos discretos. O potencial eletrostático em todos os pontos é obtido através de uma aproximação numérica da equação de Laplace que faz uso dos potenciais conhecidos nos pontos de contorno (método das diferenças finitas, no qual as derivadas em relação às coordenadas espaciais presentes na equação de Laplace são aproximadas por diferenças do tipo indicado na equação (2.15) nas malhas da região sob análise; V_0 é o potencial que se deseja obter e V_a e V_b são os potenciais nos pontos de contorno [11]).

O espaço entre os eletrodos é apresentado como preenchido por uma série de superfícies equipotenciais cuja distribuição de densidades pode ser ajustada de acordo com a precisão desejada. Este *software* permite a simulação de uma grande variedade de sistemas e atualmente é um dos programas mais amplamente utilizados para o estudo de lentes eletrostáticas devido à sua rapidez e exatidão [12]. Mais detalhes sobre a simulação e a construção das lentes para a construção do acelerador de que se trata este trabalho serão descritos no Capítulo 4.

Capítulo 3

Fontes de Íons Positivos

3.1 Introdução

O uso de aceleradores de partículas tem como objetivo obter informações sobre as propriedades das partículas projétil e principalmente das partículas alvo, sendo, para isso, realizada colisões entre ambas. A eficácia do experimento depende da intensidade do feixe produzido e de sua boa caracterização, isto é, das partículas projétil. Sendo assim, é de suma importância a escolha adequada do tipo de fonte a ser utilizada, baseada na sua aplicação, tendo em vista as espécies iônicas e os estados de carga desejados. Outros fatores que devem ser levados em conta no processo de escolha e no projeto da fonte de íons são o tempo de vida da fonte, a corrente iônica desejada e a facilidade de operação e manutenção desta fonte.

Uma fonte de íons é um dispositivo eletromagnético que é usado para criar partículas carregadas. Elas são usadas primeiramente para a formação de íons que serão utilizados em espectômetros de massa, aceleradores de partículas entre outros.

Em geral, as fontes de íons se dividem em três grandes categorias: aquelas destinadas à geração de íons positivos, aquela destinada à geração de íons negativos e um tipo altamente especializado de fonte que produz um feixe de íons polarizados. A fonte de íons positivos pode ainda ser subdividida em fontes especialmente destinadas para gerar íons de carga simples e aquelas para íons mais pesados.

Nos aceleradores de partículas uma fonte de íons cria uma feixe de partículas no início do dispositivo, isto é, na fonte. A tecnologia para criar fontes de íons depende fortemente do tipo de partícula que precisa ser gerada.

3.2 Fontes Termiônicas

Fontes termiônicas são fontes baseadas na emissão de íons através do aquecimento de uma substância a uma temperatura elevada. Este efeito é conhecido como *efeito termiônico*.

Ao ser aquecida, a substância emite íons. Estes íons podem então ser extraídos dessa fonte utilizando-se diferenças de potencial entre a fonte e eletrodos colocados próximos à fonte, criando assim uma diferença de potencial que acaba por acelerar estes íons. Uma fonte deste tipo está ilustrada na Fig.(3.1). Os detalhes sobre a aceleração dos íons serão descritos no próximo capítulo.

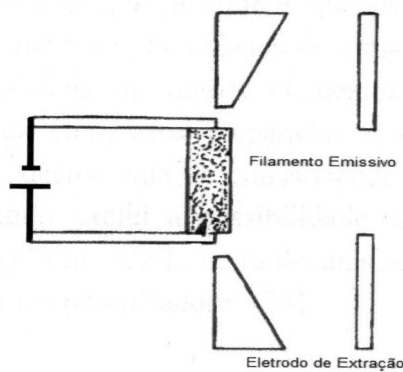


Figura 3.1: Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo ionização de superfície.

A eficiência de ionização da fonte pode ser alta ou baixa, dependendo da combinação entre o filamento e a substância emissiva. A otimização dessa eficiência é obtida através da combinação de filamentos que possuem um alto valor da função trabalho e de espécies atômicas de baixo valor potencial de ionização. Em última análise, a função trabalho do filamento deve exceder o potencial de ionização dos átomos ou moléculas envolvidos.

O acelerador eletrostático de que se trata este trabalho é alimentado por uma fonte de íons do tipo ionização de superfície, onde usaremos uma fonte termiônica de íons Li^+ . O princípio de funcionamento desta fonte é baseado na emissão de íons de

Li^+ a partir de um filamento de tungstênio (W) aquecido por uma corrente elétrica (efeito Joule) e recoberto por uma substância emissiva denominada Li- β -eucryptita ($\text{Li}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Neste capítulo apresentaremos as características desse composto e os motivos pela escolha deste tipo de fonte. Também serão descritos os reagentes químicos empregados na preparação do composto emissivo, os detalhes da preparação e a preparação do filamento de W, bem como o processo de aquecimento do filamento e o sistema de extração dos íons inseridos na fonte termiônica e a adaptação do filamento emissivo ao sistema de extração.

3.3 Características da Substância Li- β -eucryptita

O composto ternário Li- β -eucryptita ($\text{Li}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) pertence à classe dos alumino-silicatos alcalinos do tipo β -eucryptita ($\text{X}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), onde X pode ser qualquer um dos metais alcalinos terrosos, ou seja, Li, Na, K, Rb ou Cs. Ao ser aquecida, a substância emite íons X^+ . No nosso caso, como trabalhamos com o Li, temos íons Li^+ [13]. Hundlei [14] e Bainbridge [15] observaram que os alumino-silicatos alcalinos poderiam ser usados como fonte abundante de íons.

Blewett e Jones [16] mostraram que, dentre esses compostos, a variedade β -eucryptita possuía as melhores qualidades de emissão tais como emissão intensa e razoavelmente livre de íons de outros elementos. A tabela 3.1 apresenta uma comparação entre vários compostos preparados e testados por eles, os quais são apresentados em ordem decrescente de emissividade. Segundo estes pesquisadores, a quantidade de Li^+ emitido exclui a possibilidade de emissão apreciável de Li em quaisquer outras formas (átomos de Li ou moléculas de LiO) do filamento, fato que tem sido comprovado por outros pesquisadores [4].

Lambert *et al.* (1978) [4] utilizaram o composto em questão e concluíram que a intensidade máxima da corrente iônica extraída da fonte termiônica depende da voltagem de extração, da intensidade do aquecimento do filamento (o que pode ser verificado através do gráfico da Fig. (3.2) apresentado no artigo [4] e do tempo de vida do filamento emissivo (filamento e substância emissiva). Segundo este artigo, o tempo de vida médio desta fonte - para correntes com intensidades da ordem de centenas de μA - é de aproximadamente 250 horas se a fonte não for continuamente operada, e de aproximadamente 350 horas se a fonte for operada ininterruptamente

Li ₂ O	Al ₂ O ₂	SiO ₂
1	1	2 <i>Eucryptite</i>
1	1	4 <i>Spodumene</i>
1	1	6
2	1	5
3	1	3
1	0,12	1,6
1	0	1

Tabela 3.1: Compostos preparados e testados por Blewett e Jones em ordem decrescente de emissividade.

(o termo “tempo de vida médio” de uma fonte significa o tempo no qual a fonte consegue manter uma emissão iônica alta e constante).

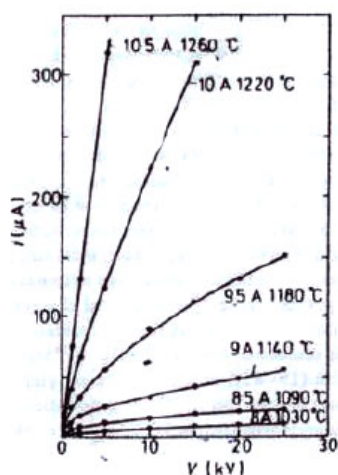


Figura 3.2: Corrente extraída em função da tensão aplicada para diferentes temperaturas do filamento obtida por Lambert *et al.* [4].

Ueda *et al.* (1997) [13] mostraram que a β -eucryptita na forma vítrea apresenta muitas vantagens em relação às formas líquida e pastosa. Neste rol de vantagens estão incluídas maiores intensidade de emissão, densidade de corrente, pureza do feixe, tempo de vida da fonte e facilidade de seu manuseio. Densidades de corrente

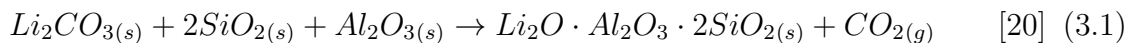
de 2 a 3 mA/cm² de Li⁺ têm sido alcançadas por estes e outros pesquisadores [17], [18].

Além disso, alguns trabalhos destacaram que os feixes iônicos obtidos do composto ternário Li-β-eucryptita estão livres de estados metaestáveis, o que é desejável em experimentos envolvendo colisões atômicas, uma vez que a presença de estados metaestáveis no feixe incidente frequentemente causa problemas relativos à determinação de secções de choque absolutas [19]. Entre as fontes baseadas na emissão termiônica deste composto, podemos citar os trabalhos de [17] e [19].

Em suma, para a obtenção de feixes de ions Li⁺, uma fonte termiônica cuja substância emissiva é o composto ternário Li-β-eucryptita na forma vítrea apresenta grandes vantagens em relação a outros tipos de fontes e a outros tipos de substância emissiva, tendo em vista sua aplicação em análise de superfícies e em colisões íon/átomo/molécula. Podemos destacar a alta e constante emissão de íons Li⁺ por longos períodos de tempo. Além disso, sua emissão é razoavelmente livre de outros elementos e livre de estados metaestáveis. Destacamos também o fato de que este tipo de fonte possuir um *design* compacto e não necessita de alimentação gasosa.

3.4 Preparação da Substância Emissiva

O composto ternário Li-β-eucryptita é formado a partir da mistura de carbonato de lítio (Li₂CO₃), óxido de alumínio (Al₂O₃) e sílica (SiO₂). Esses compostos químicos são misturados com água destilada e através do aquecimento dessa mistura até à sua temperatura de vitrificação (1450 °C), temos então o composto Li-β-eucryptita (Li₂O·2SiO₂·Al₂O₃) na forma vítrea. Isso é realizado de acordo com a reação química:



Como vimos no parágrafo anterior, a mistura dos reagentes deve atingir uma temperatura de 1450 °C, sendo assim o filamento de tungstênio o mais adequado para o uso da fonte devido ao seu elevado ponto de fusão, de cerca de 3310 °C. Uma outra característica importante para a escolha do tungstênio é o valor de sua

função trabalho, de cerca de 4,6 eV, enquanto que a do Li- β -eucryptita, no sentido de energia mínima necessária para emitir um íon Li^+ é de aproximadamente 3 eV.

Os seguintes procedimentos devem ser realizados a fim de se obter o filamento emissivo: primeiramente, o filamento de W deve ser coberto com uma pasta de Zirconato de Bário (BaZrO_3) para prevenir um ataque químico ao filamento [4]. A substância emissora é obtida em forma de pasta através da mistura dos reagentes (lado esquerdo da equação (2.1)) com água destilada. Esta pasta é fixada na parte superior do filamento de W . Este conjunto deve ser aquecido até sua temperatura de vitrificação de 1450 °C (o que pode ser feito via aquecimento elétrico (efeito Joule) ou através de um forno). Quando a temperatura de vitrificação é atingida, deve-se desligar o forno ou cessar a corrente de aquecimento. O rápido resfriamento produz uma melhor qualidade da superfície emissora. Ao término do processo de confecção do filamento emissivo, este pode ser armazenado sem condições especiais.

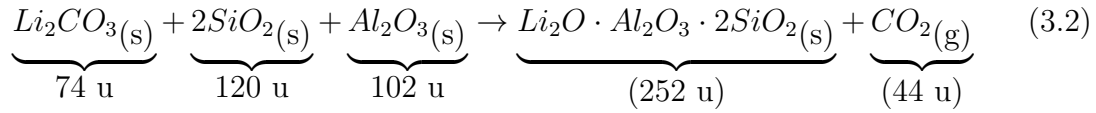
Porém, como o laboratório não possui nenhum equipamento que permita o controle exato da temperatura, a sintetização do composto Li- β -eucryptita não pôde ser feita de maneira eficaz. Sendo assim, optou-se por utilizar os reagentes o composto apenas como a mistura dos seus reagentes na proporção indicada na Eq. (reacao).

Conhecendo-se as massas atômicas dos elementos envolvidos, podemos obter a massa molecular dos compostos presentes na Eq. (3.1), tanto dos reagentes quanto dos produtos.

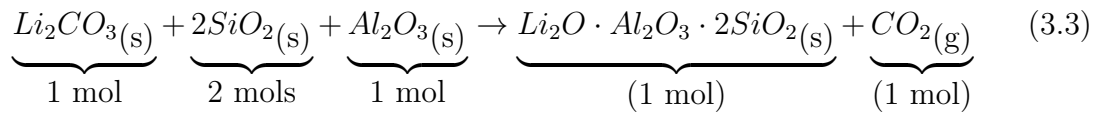
Composto	Massas Atômicas	Massas Moleculares
Li_2CO_3	Li \approx 7 u; C \approx 12 u; O \approx 16 u	74 u
SiO_2	Si \approx 28 u; O \approx 16 u	60 u
Al_2O_3	Al \approx 27 u; O \approx 16 u	102 u
$\text{Li}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	Li \approx 7 u; O \approx 16 u; Si \approx 28 u; Al \approx 27 u	252 u
CO_2	C \approx 12 u; O \approx 16 u	44 u

Tabela 3.2: Compostos e massas atômicas e moleculares envolvidas na síntese do composto Li- β -eucryptita [17].

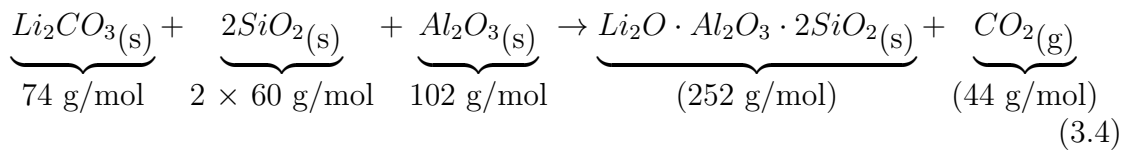
Assim, podemos escrever



Em termos das quantidades de mols, temos que

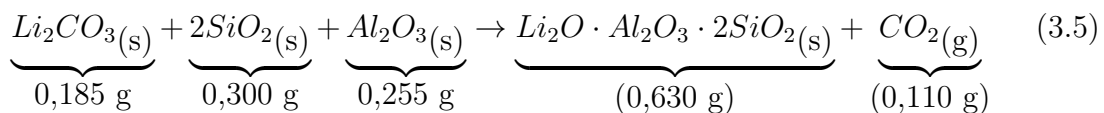


Em termos da massa molar, isto é, massa em gramas de 1 mol de uma substância, temos as seguintes quantidades



Portanto, uma mistura de 74 g de Li_2CO_3 , 120 g de SiO_2 e 102 g de Al_2O_3 formará 252 g do composto $Li\text{-}\beta\text{-eucryptita}$ com a eliminação de 44 g de CO_2 , uma vez atingida a temperatura de 1450 °C.

A Lei das Proporções Definidas, enunciadas por Proust (1754-1826), afirma que, na formação de um composto, seus constituintes combinam-se sempre nas mesmas proporções em massa, independentemente da origem ou do modo de preparação do composto [21]. Esta lei nos permite fazer uma redução na quantidade de reagentes da Eq. (3.1) numa quantidade adequada para a preparação do filamento emissivo, multiplicamos as massas molares pelo fator (1/400 mol), obtendo



Uma mistura dos reagentes Li_2CO_3 , SiO_2 e Al_2O_3 nas quantidades indicadas na Eq. (3.5) foi obtida em forma de pasta com a adição de água destilada. A pasta obtida foi fixada na parte superior de um filamento de tungstênio (W), que

foi coberto anteriormente por uma mistura de zirconato de bário (BaZrO_3) a fim de prevenir um ataque químico ao filamento de tungstênio.

O filamento de tungstênio utilizado é de alta pureza (99,95%) e possui um diâmetro de 0,5 mm e aproximadamente 7,0 cm de comprimento. A parte superior deste filamento foi forçada a tomar a forma de uma espira helicoidal, conforme ilustra a foto na Fig. (3.3).

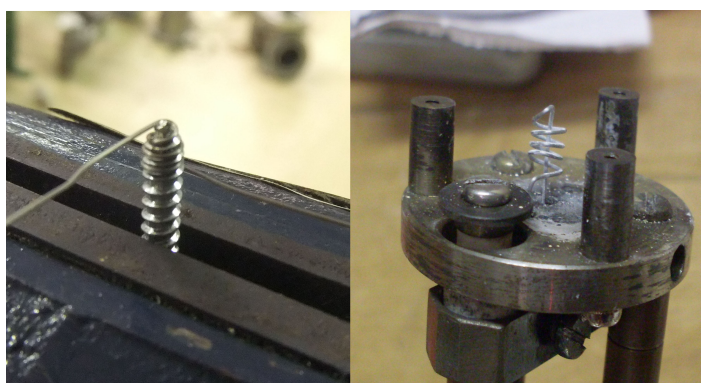


Figura 3.3: (esq.) Parafuso utilizado para moldar a espiral no filamento; (dir) Filamento já em formato de espiral já preso à fonte e recoberto com zirconato de bário, pronto para receber a pasta com os reagentes.

Após a sua preparação, o filamento emissivo pode ser caracterizado pelo valor de sua massa (0,609 g) e da área de sua superfície emissiva (aproximadamente 1 cm^2).

3.5 Descrição da Fonte Termiônica

Conforme explicamos no início deste capítulo, tanto o processo de produção dos íons por efeito termiônico como o processo de extração (eletrodos de extração) estão inseridos na estrutura de uma fonte termiônica.

A Fig. (3.4) apresenta o esquema e as dimensões da estrutura interna da fonte de íons. A parte inferior da estrutura interna desta fonte apresenta dois bornes que serão posteriormente conectados aos terminais de saída de uma fonte de cor-

rente elétrica. Esta fonte de corrente (cujo funcionamento básico será descrito no capítulo 4) é responsável pela passagem de corrente elétrica através do filamento emissivo e pelo conseqüente aquecimento deste via efeito Joule. (Como vimos no início deste capítulo, a energia transferida do filamento aquecido para o composto químico provoca a migração dos átomos envolvidos para a superfície do composto e a emissão destes na forma de íons).

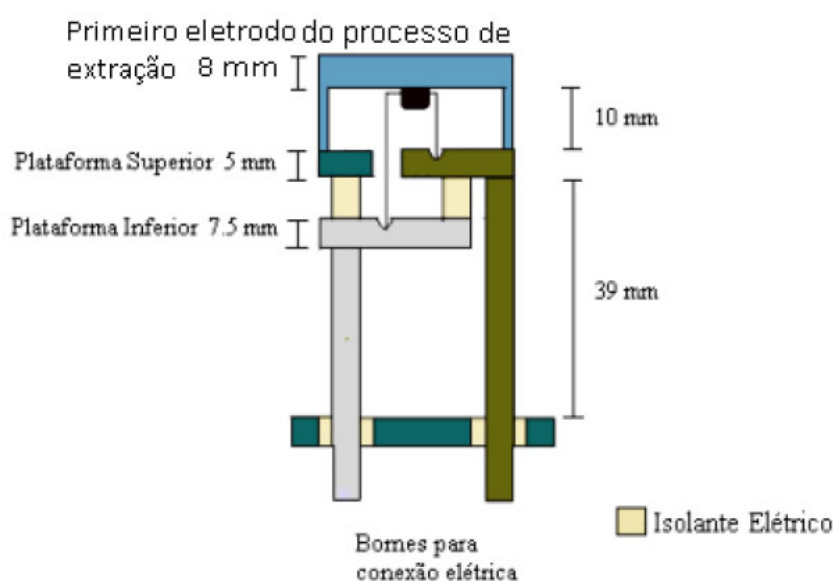


Figura 3.4: Esquema e dimensões da estrutura interna da fonte de íons.

Um dos bornes é conectado à plataforma inferior e o outro borne é conectado à plataforma superior. Uma das extremidades do filamento está em contato elétrico com a plataforma inferior e a outra extremidade do filamento está em contato elétrico com a plataforma superior. As duas plataformas (inferior e superior) estão isoladas eletricamente uma da outra; o que permite a circulação de corrente pelo filamento é o próprio filamento, pois este realiza o único contato elétrico entre as plataformas inferior e superior. A Fig. (3.5) apresenta uma foto da estrutura interna da fonte de íons esquematizada na Fig. (3.4).

O processo de extração dos íons emitidos a partir do aquecimento do filamento

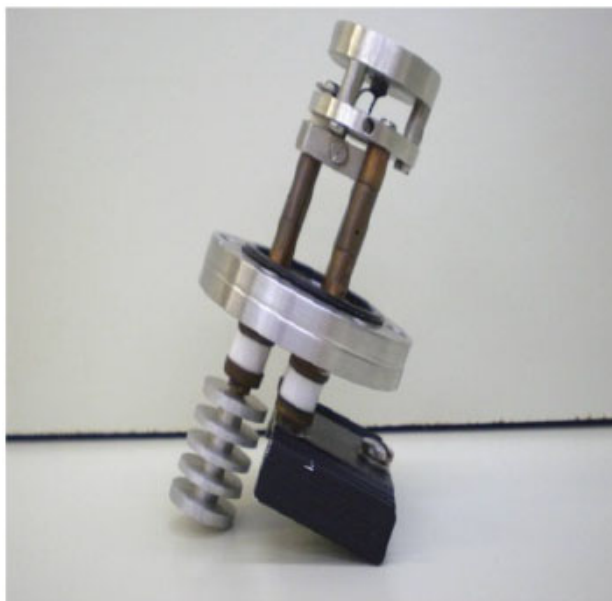


Figura 3.5: Foto da estrutura interna da fonte de íons.

emissivo é realizado através da disposição espacial de dois eletrodos entre os quais serão estabelecidos diversos valores de diferença de potencial. Estes dois eletrodos possuem formato cônico e cada um possui uma abertura central com um determinado valor diametral; o esquema da Fig. (3.6) apresenta o arranjo espacial, a distância intersticial e o diâmetro da abertura central de cada eletrodo pertencente ao sistema de extração.

O primeiro eletrodo do sistema de extração é constituído por um cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termiônica (veja Figs. (3.4), (3.5) e (3.7)).

O segundo eletrodo do sistema de extração é constituído por um cone metálico pertencente à estrutura metálica apresentada na Fig (3.8). Tanto a estrutura interna da fonte (a qual inclui o filamento emissivo e o primeiro eletrodo do sistema de extração) quanto a estrutura que suporta o segundo eletrodo do sistema de extração possuem flanges para conexão; o cilindro metálico mostrado na Fig. (3.9) realiza a conexão entre estas duas estruturas através de parafusos adequados.

Uma visão expandida da fonte de íons pode ser vista na Fig. (3.10) (a). A Fig. (3.10) (b) apresenta o conjunto montado (compacto, com aproximadamente 14

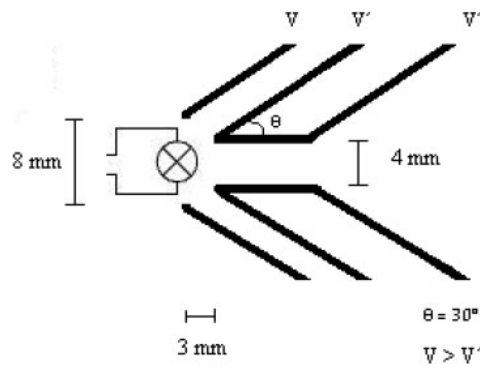


Figura 3.6: Esquema do arranjo espacial do par de eletrodos cônicos responsável pela extração dos íons emitidos pelo filamento emissivo.



Figura 3.7: Cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termiônica (primeiro eletrodo do sistema de extração)

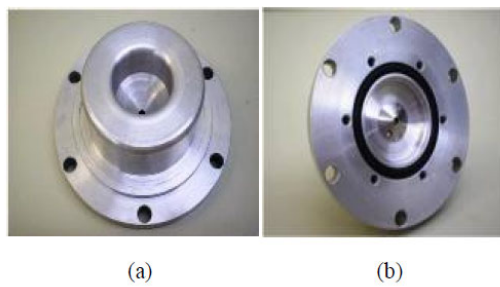


Figura 3.8: Cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termiônica (primeiro eletrodo do sistema de extração)



Figura 3.9: Cilindro metálico de conexão para a montagem do sistema de extração

cm de comprimento e 14 cm de diâmetro externo máximo), onde a estrutura interna da fonte está inserida no interior do cilindro conector, o qual fixa também o segundo eletrodo do sistema de extração.

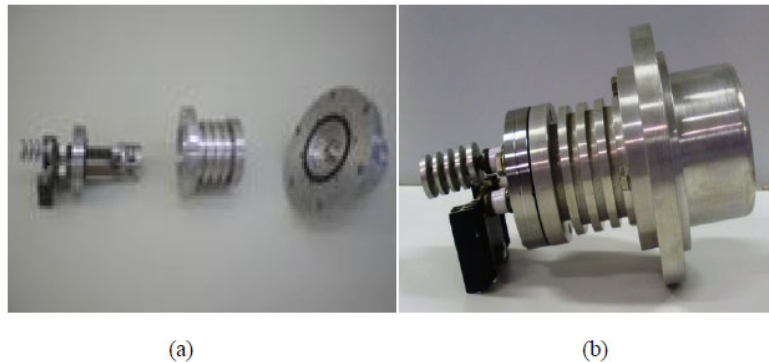


Figura 3.10: Visão (a) expandida e (b) compacta da fonte de íons.

3.6 Adaptação do Filamento Emissivo ao Sistema de Extração

Terminado o processo de confecção do filamento emissivo, este foi inserido na parte superior da estrutura interna da fonte de íons de tal maneira que uma das extremidades do filamento esteja em contato elétrico com a plataforma inferior

e a outra extremidade do filamento esteja em contato elétrico com a plataforma superior da estrutura interna da fonte de íons (conforme o esquema apresentado na Fig. (3.6)); o filamento é centrado na abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (conforme esquema apresentado na Fig. (3.11)).

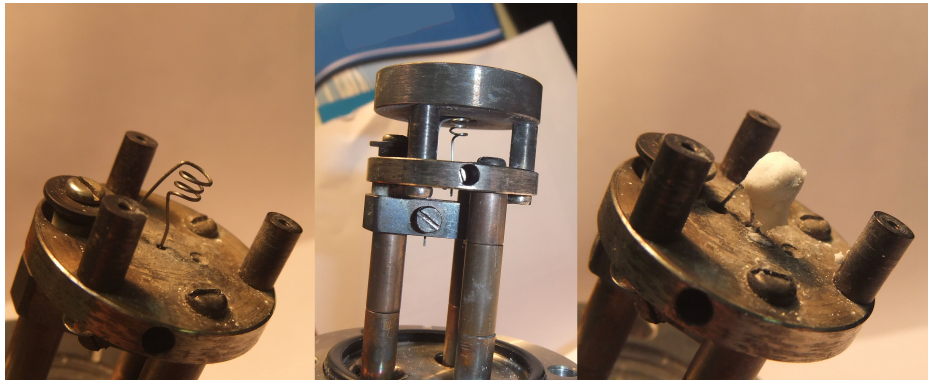


Figura 3.11: Visão (a) expandida e (b) compacta da fonte de íons.

Em [6], foi feito um estudo sobre qual seria a melhor posição da parte superior do filamento emissivo em relação à extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração. Após os primeiros testes de emissão, foram feitos testes utilizando-se a corrente detectada em função destas posições. Sendo assim, concluímos que essa corrente era máxima quando a parte superior do filamento está situada logo abaixo do primeiro eletrodo de extração.

Por esta razão, confeccionamos um filamento emissivo cuja porção superior está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (Fig. (3.11)).

Capítulo 4

Montagem do Acelerador

4.1 Introdução

Como vimos anteriormente, este trabalho visa a construção de um acelerador linear de baixa energia, constituído por uma fonte termiônica de íons positivos Li^+ seguido de um estágio de aceleração e um detector para a análise da corrente emitida pela fonte permitindo o estudo da emissão, do comportamento e das características da fonte. Neste capítulo descreveremos o circuito elétrico relativo aos estágios de emissão, extração e aceleração da fonte, explicando o funcionamento e o uso de cada componente.

Para isso utilizaremos a aceleração por degraus de potencial, conforme ilustra a figura 4.1.

O primeiro estágio é o de emissão, onde o filamento coberto pela substância emissiva é ligado a uma fonte de corrente cuja variação desta acarreta uma variação da temperatura do filamento, devido ao efeito joule, daí emissão termiônica, que faz com que íons sejam emitidos pela fonte. Em seguida, este íon passa pelo primeiro estágio de extração, onde é focalizado por uma lente eletrostática, e cujo potencial pode ser ajustado entre 0 e 6,5 kV entre o primeiro e o segundo eletrodo da fonte que extrai o íon emitido e o leva até o último e terceiro estágio, o estágio de aceleração. Neste estágio o íon é submetido a uma diferença de potencial de 30 kV, onde é acelerado até o detector. O diagrama elétrico do processo de aceleração pode ser visto esquematicamente na Fig. (4.2).

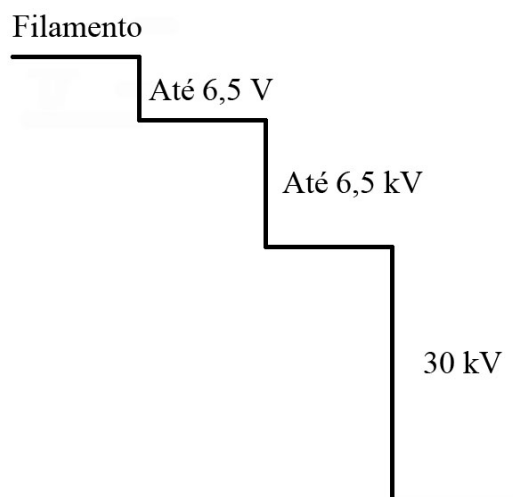


Figura 4.1: Degraus de Potencial ao qual o feixe é submetido.

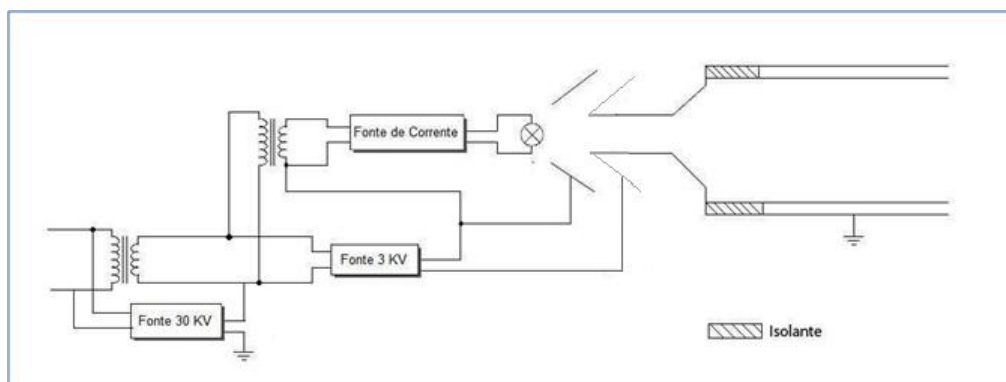


Figura 4.2: Diagrama elétrico dos estágios de emissão, extração e aceleração dos íons.

4.2 Componentes Eletrônicos e Mecânicos

Para obtermos as diferenças de potencial necessárias à emissão, extração e aceleração dos íons utilizaremos os componentes eletrônicos indicados na Fig. (4.2), a saber:

- Transformadores de isolamento;
- Fontes de Tensão;
- Fonte de Corrente.

Para realizarmos as conexões elétricas entre os equipamentos, é necessário:

- Filtros de Linha;
- Cabos e Conectores.

Por fim, para servir como suporte aos equipamentos eletrônicos citados e suportar a fonte de íons, utilizaremos:

- Rack interno como suporte para os componentes cujo potencial se encontra elevado em 30 kV em relação à terra;
- Rack externo como suporte para o rack interno e para o sistema de vácuo.

A seguir uma descrição detalhada de cada componente eletrônico e mecânico citado.

4.2.1 Transformadores de Isolamento

O transformador é um dispositivo constituído por duas bobinas, eletricamente isoladas, enroladas em torno de um mesmo núcleo de ferro doce (ferro quase puro) como mostra a Fig (4.3).

Uma corrente alternada produzida pela fonte (ϵ) no enrolamento primário, induz um fluxo magnético alternado \mathbf{B} no núcleo do ferro. Como o núcleo se estende atravessando o enrolamento secundário, este fluxo induzido também se estende através das espiras do secundário. Da lei da indução de Faraday, a fem induzida por

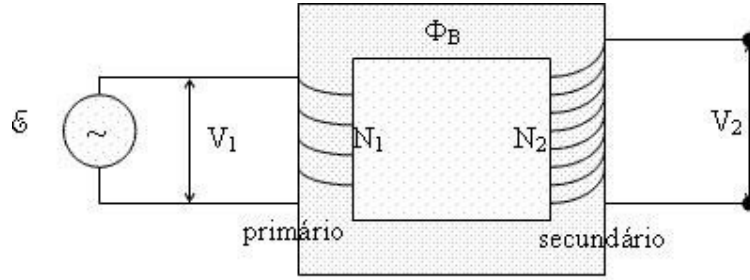


Figura 4.3: Diagrama Elétrico dos Estágios de Extração e Aceleração do Feixe.

ϵ é a mesma, tanto para o primário quanto para o secundário. Além disso, a tensão V_1 entre as extremidades do primário é igual à fem induzida no primário, e a tensão V_2 entre as extremidades do secundário é igual à fem induzida no secundário.

A lei da indução de Faraday, elaborada por Michael Faraday em 1831, afirma que a corrente elétrica induzida em um circuito fechado por um campo magnético é proporcional ao número de linhas do fluxo que atravessa a área envolvida do circuito na unidade de tempo, isto é,

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (4.1)$$

Sendo \mathbf{E} o campo elétrico induzido, ds é um elemento infinitesimal do circuito e $d\Phi_B/dt$ é a variação do fluxo magnético. Uma maneira alternativa de se representar é na forma da derivada da função do campo magnético \mathbf{B} é

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

Portanto

$$V_i = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (4.3)$$

e a lei, expressa matematicamente na forma elaborada por Franz Ernst Neumann em 1845 em termos da força eletromotriz, é:

$$V_i = -\frac{\nabla \Phi}{\Delta t} \quad (4.4)$$

A lei de Faraday-Lenz enuncia que a força eletromotriz que é induzida em um circuito elétrico é igual à variação do fluxo magnético no circuito.

A contribuição fundamental de Heinrich Lenz foi a direção da força eletromotriz (o sinal negativo na fórmula). A corrente induzida no circuito é de fato gerada por um campo magnético, e a lei de Lenz afirma que o sentido da corrente é o oposto da variação do campo magnético que a gera.

Assim podemos escrever:

$$\epsilon = \frac{d\Phi_b}{dt} = \frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \quad (4.5)$$

portanto

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (4.6)$$

onde N_1 e N_2 são o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

Se $N_2 > N_1$, dizemos que o transformador é um transformador elevador porque ele eleva a tensão do primário V_1 para uma tensão mais alta V_2 . Analogamente, se $N_2 < N_1$, o dispositivo é um transformador abaixador.

Admitindo que o transformador seja ideal (não houver perdas de energia), a potência fornecida ao primário deve ser igual à fornecida pelo secundário, então chegamos a tal relação:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.7)$$

onde i_1 e i_2 são as correntes no primário e no secundário respectivamente. Quanto maior for a tensão no secundário, menor será a corrente. Por esta razão a transmissão de energia elétrica se faz em tensões elevadas, já em nossas residências, utilizamos tensões baixas por segurança.

Alguns Tipos de Transformadores

Se $N_1 < N_2$ temos que a voltagem no secundário é maior que no primário e dizemos que temos um transformador de alta (e se $N_1 \ll N_2$ temos um transformador de alta tensão). Se $N_1 > N_2$ temos um transformador de baixa, que utilizam virtualmente todos os aparelhos para transformar os 110 volts de linha em tensões compatíveis com os componentes eletrônicos. Um transformador ideal pode ser ligado ao contrário, invertendo os papéis de primário e secundário e, portanto, os adjetivos de baixa e alta.

Se $N_1 = N_2$ as voltagens primária e secundária são iguais e temos um transformador de isolamento. Os transformadores de isolamento são utilizados quando se deseja aterrar um ponto do circuito sem alterar a tensão de linha (é perigosíssimo e rigorosamente proibido aterrar um dos pontos da tomada). Em quase todo transformador os enrolamentos estão isolados eletricamente, o que permite que um dos pontos do secundário possa ser aterrado com segurança.

A figura 4.4 mostra um diagrama esquemático de um transformador de isolamento.

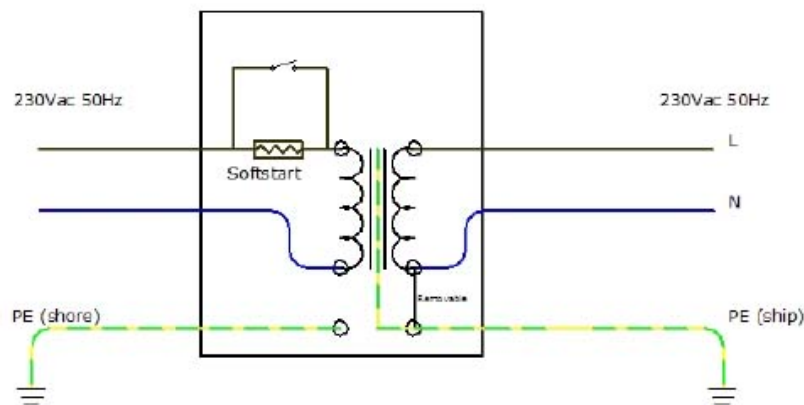


Figura 4.4: Diagrama elétrico de um transformador de isolamento.

Como vimos na Fig. 4.1, o potencial do acelerador será levantado duas vezes: A primeira, em 30 kV e a segunda, variável entre 0 e 6,5 kV. Logo, utilizaremos 2 transformadores de isolamento, conforme ilustra a Fig. (3.2).

O primeiro transformador será responsável por isolar o circuito da rede elétrica. Esse isolamento se torna necessário pois queremos levantar todo o circuito de aceleração em 30 kV.

Já o segundo transformador será responsável por uma elevação do potencial de extração dos íons, isolando a segunda parte do circuito, variável entre 0 e 6,5 kV.

4.3 Fontes de Tensão e de Corrente

Fontes de tensão e de corrente são fontes que fornecem os valores determinados de tensão ou de corrente independentemente da carga à qual forem ligadas retransmitindo-as com parâmetros estáveis a outros circuitos ou dispositivos eletrônicos.

Dentre os diversos tipos de fontes de tensão podemos destacar as que fornecem tensão alternada e as que fornecem tensão contínua. As de tensão alternadas são normalmente aquelas que geram tensão por meio de indutores, como um transformador de fio enrolado ou mesmo uma usina hidrelétrica. As de tensão contínua podem ser as que utilizam processos químicos, como as baterias de carro e pilhas, ou proveniente da retificação da tensão alternada, ou seja, conversão da tensão alternada em contínua por meio de componentes eletrônicos, os diodos. Uma fonte de tensão contínua permite o controle da voltagem de saída caracterizando-se pela estabilidade deste valor escolhido independente do circuito ou do dispositivo eletrônico ao qual a fonte está conectada.

Para que estas fontes forneçam uma voltagem contínua e de forma ajustável, elas são constituídas primeiramente por um circuito retificador de onda inteira, que retifica a onda da rede, transformando os ciclos inteiros em semicilos, através do uso de componentes eletrônicos como os diodos. Em seguida temos um circuito de filtragem, onde estes semiciclos são convertidos em uma voltagem de saída quase que contínua através do uso de capacitores. Por último, temos um circuito regulador que, devido à estabilidade da tensão de saída do circuito retificador com os filtros não ser muito satisfatória devido às variações da tensão de entrada e das oscilações devido ao processo de filtragem, melhoram a estabilidade da tensão de saída para que esta permaneça constante, independente de outras flutuações. Um diagrama esquemático é mostrado na Fig. (4.5).

As fontes de tensão possuem um limitador de corrente que impede o alcance de valores excessivos de corrente que podem provocar danos ao circuito conectado à sua saída e até mesmo ao próprio aparelho.

Da mesma forma uma fonte de corrente é um dispositivo elétrico ou eletrônico que mantém uma corrente elétrica constante entre seus terminais independente da tensão elétrica que tenha que impor entre os mesmos para estabelecer o valor nominal



Figura 4.5: Diagrama de blocos de uma fonte de tensão reguladora [5].

de sua corrente. Nestes termos uma fonte de corrente é um dispositivo utópico visto que não há fontes de corrente ou tensões capazes de manter suas correntes ou tensões nominais de forma independente dos dispositivos a elas conectados.

Já as fontes de tensão possuem um limitador de tensão que serve para que o circuito ou o dispositivo ligado à saída não receba tensões fora de uma determinada faixa de valores.

Na montagem deste acelerador usaremos duas fontes de tensão e uma de corrente. Uma das fontes de tensão será responsável pelo estágio de aceleração dos íons em 30 kV. Ela é responsável por elevar a diferença de potencial de todo o circuito do acelerador em 30 kV em relação à terra. Os dados relativos a essa fonte se encontram na tabela 4.1. Esta fonte foi desenvolvida pela Power Designs, Inc. do tipo High Voltage Regulated DC Power Supplies Model HV - 1579.

Tabela 4.1: Dados técnicos da Fonte de Tensão de 30 kV.

Tensão de entrada	110 V
Tensão de saída	10 kV a 30 kV (VC estabilizada)
Corrente máxima de saída	1 mA

A outra fonte de tensão será responsável pelo estágio de extração dos íons da fonte termiônica. Esta fonte será responsável em elevar o potencial da fonte de

corrente em até 6,5 kV em relação ao potencial dos demais equipamentos. Os dados relativos a essa fonte se encontram na tabela 4.2. Esta fonte foi desenvolvida pela Fug Elektronik GmbH, Inc. do tipo High Voltage Chopper Power Supplies (HCP) Model 14-6500.

Tabela 4.2: Dados técnicos da Fonte de Tensão de 6,5 kV.

Tensão de entrada	230 V \pm 10% (47 - 63 Hz)
Tensão de saída	Continuamente ajustável de 0 a 6,5 kV (VC estabilizada)
Corrente máxima de saída	2 mA
Potência máxima	14 W

Além dessas fontes de tensão, também utilizaremos uma fonte de corrente, que será responsável por fornecer a corrente elétrica necessário ao aquecimento do filamento e à consequente emissão do íon. Os dados relativos a essa fonte se encontram na tabela 4.3. Esta fonte também foi desenvolvida pela Fug Elektronik GmbH, Inc. cujo modelo é NTN 350-6,5.

Tabela 4.3: Dados técnicos da Fonte de Tensão de 6,5 kV.

Tensão de entrada	230 V \pm 10% (47 - 63 Hz)
Corrente de saída	Continuamente ajustável de 0 a 30 A (DC estabilizada)
Voltagem de saída	Variável entre 0 e 6,5 V
Potência máxima	350 W

As fotos das fontes se encontram na Figura 4.6.

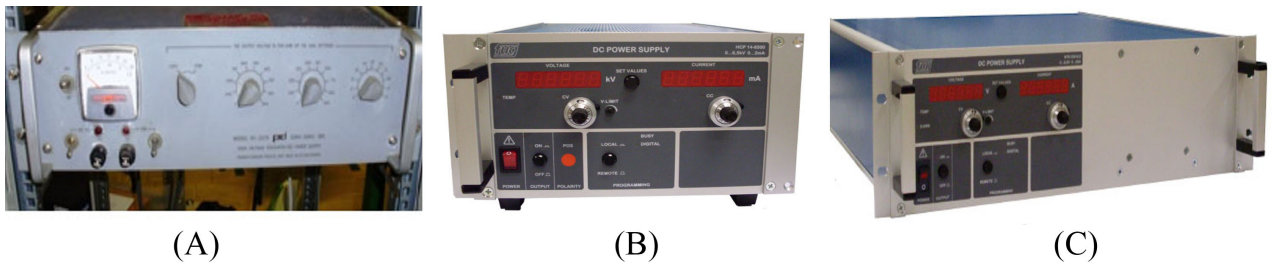


Figura 4.6: Fontes de tensão para os estágios de (A) aceleração e de (B) extração; (C) Fonte de corrente para o aquecimento do filamento emissivo.

4.4 Racks

Para servir de suporte para o acelerador, para as fontes de tensão (B) e de corrente (C) (Figs. 4.6) e para os transformadores, foram construídos na Oficina Mecânica do Departamento de Física dois *racks*: Um deles, que denominaremos por *rack interno* servirá de suporte para os componentes citados anteriormente, à exceção de um dos transformadores de isolamento, e um outro *rack*, que denominaremos de *rack externo*.

O *rack externo* servirá de suporte para o transformador de isolamento responsável em elevar em até 30 kV o potencial dos equipamentos eletrônicos e também servirá de apoio para o *rack interno*, que terá o seu potencial elevado. A estrutura de ambos os *racks* é de metalon.

Um fotografia do *rack externo* pode ser vista na Fig. (4.7).

Este *rack*, além de suportar um dos transformadores de isolamento, também serve de apoio para a bomba difusora e toda a linha de vácuo conectada à fonte termiônica. Este *rack* é aterrado para evitar que tenhamos um contato direto com a alta voltagem aplicada no acelerador.

Em relação ao *rack interno*, este possui três prateleiras, feitas de aço galvanizado, com espessura de 2 mm cada, que podem ser ajustadas horizontalmente (veja Fig. 4.8).

Como já vimos, para o estágio de aceleração é necessário que todo o equipamento eletrônico e o próprio acelerador tenham o seu potencial elevado em até 30 kV. Sendo assim, o transformador de isolamento, responsável pelo isolamento da rede elétrica do circuito, terá sua tensão de saída elevada em relação ao *rack externo*.



Figura 4.7: Vista lateral do *rack* externo com um dos transformadores de isolamento.

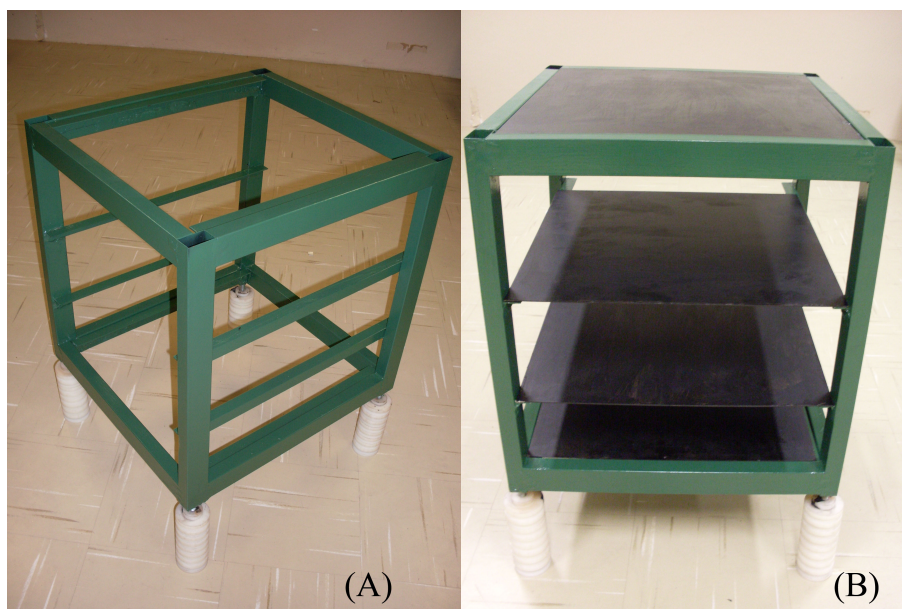


Figura 4.8: Vista do *rack* interno: sem as prateleiras (A); com as prateleiras (B).

Logo, o *rack* interno terá o seu potencial diferente em relação ao externo. Portanto, o isolamento deste *rack* é necessário e de extrema importância. Devido a este fato, foram confeccionados quatro pés de *nylon*, que é um material isolante constituído por fibras sintéticas de poliamida cuja rigidez dielétrica varia entre 30 e 50 kV/cm [22], impedindo que a tensão deste *rack* interno seja descarregada sobre o externo. Esses pés foram planejados levando-se em consideração tanto o isolamento elétrico quanto a capacidade de suportar o peso do *rack* interno. Uma foto de um dos pés pode ser vista na Fig. (4.9).



Figura 4.9: Pés de *nylon* responsáveis pelo isolamento do *rack* externo.

Devido a efeitos de condutividade elétrica superficial de isolantes sólidos, o acabamento final dos pés apresenta sulcos por toda a sua extensão. Este efeito está condicionado à existência de películas de poeira e umidade que porventura estejam encobrendo a superfície do isolante. Esta película formada por estas partículas comporta-se como um condutor de eletricidade de resistência R dada por

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.8)$$

onde ρ é a resistividade da película, L é o comprimento da película e A é a área da secção reta da película. Ao fazermos estes sulcos nos pés do *rack* estamos aumentando o comprimento L desta película e conseqüentemente aumentando sua resistência elétrica e melhorando o seu isolamento. Além disso, estes pés são ajustáveis de modo que o *rack* interno possa ser nivelado para cima ou para baixo mediante a rotação destes pés, que são afixados no *rack* por meio de parafusos (como pode ser visto na Fig. (4.9).

O *rack* interno também servirá de suporte para a fonte de corrente (veja Fig. 4.6(C)). Como vimos, além do potencial de aceleração ao qual o acelerador está submetido, há também o potencial de extração, feito pela fonte de tensão 0 - 6,5 kV (veja Fig. 4.6(B)). Sendo assim, a fonte de corrente estará em um potencial maior que o do *rack* interno; logo torna-se necessário isolar a fonte eletricamente do *rack* interno. Este isolamento é feito a partir de placas de *nylon* nas paredes laterais e na própria prateleira, evitando assim um contato direto da fonte de corrente com o *rack*. Uma foto desse isolamento pode ser vista na Fig. (4.10). A placa que se situa abaixo da fonte de corrente foi cortada em formato “V” de modo a permitir a ventilação da fonte.

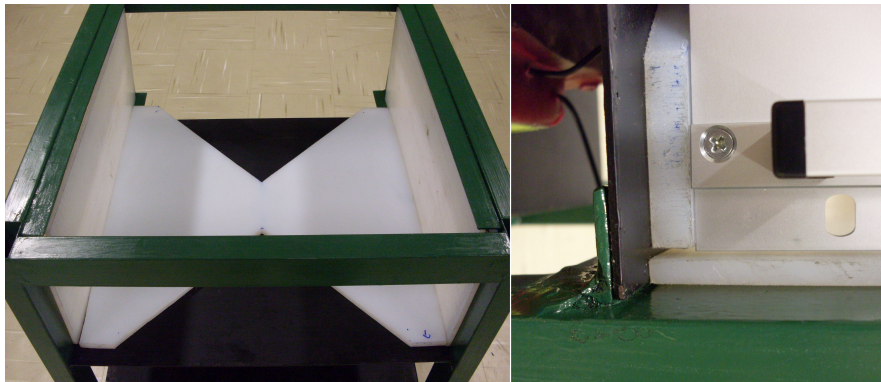


Figura 4.10: Isolamento da fonte de corrente.

4.5 Circuito Elétrico e Montagem dos Componentes Eletrônicos

O *rack* interno serve como suporte para os equipamentos eletrônicos. Estes estão dispostos nas prateleiras da seguinte forma:

Na primeira prateleira (de baixo para cima) fica o filtro de linha.

Na segunda prateleira ficam a fonte de tensão 0 - 6,5 kV, responsável pelo estágio de extração dos íons e o segundo transformador de isolamento, responsável em isolar o circuito da fonte de corrente, situada na terceira prateleira, e permitir a elevação do potencial dela em relação ao potencial do *rack* interno. Como a fonte irá sofrer uma variação no seu potencial em relação ao potencial do *rack* interno, foi feito o isolamento descrito na seção anterior. Uma foto desse arranjo pode ser vista na Fig. (4.11).

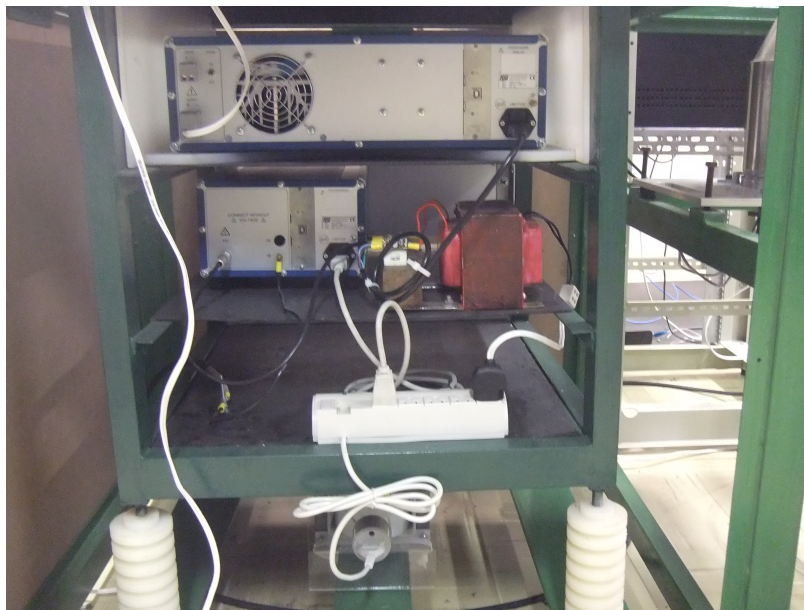


Figura 4.11: Arranjo dos equipamentos eletrônicos no *rack* interno.

As laterais do *rack* externo são cobertas por placas de eucatex, de forma a proteger o *rack* interno e evitar choques elétricos. Na placa da frente há uma abertura

onde foi colocada uma espécie de janela de acrílico permitindo a leitura dos *displays* das fontes de tensão e de corrente. Como as fontes são ajustadas manualmente, para evitar o toque diretamente nos botões das fontes, foram construídos cilindros de PVC que foram conectados aos botões da fonte e que atravessa o acrílico, permitindo os ajustes das fontes de forma segura. Uma foto da parte frontal do acelerador bem como os bastões de PVC se encontra na Figura 4.12.

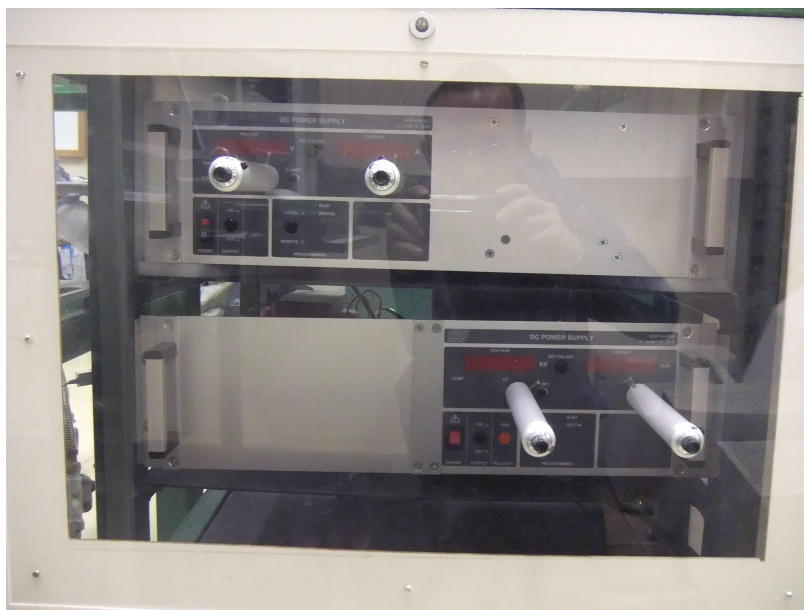


Figura 4.12: Parte frontal do acelerador com os bastões de PVC para o ajuste das fontes.

Na topo do *rack* fica a fonte de íons, ilustrada na Fig (3.5). Este suporte foi construído de tal forma que o feixe de íons fique a uma altura aproximada de 1,10 m acima do chão.

Para proteger a fonte de íons, que fica no topo do *rack* interno, foi construído uma estrutura de proteção, uma *Gaiola de Faraday*, que nos protege da alta tensão e a fonte termiônica contra choques mecânicos indesejáveis. Uma foto da gaiola pode ser vista na Fig. (4.13).

A entrada do transformador de isolamento de 30 kV está ligada à rede elétrica



Figura 4.13: Gaiola de proteção da Fonte de íons.

que nos fornece uma voltagem alternada de valor eficaz de 220 V através de um cabo condutor elétrico duplo com $2,5 \text{ mm}^2$ de área de secção reta, para uma corrente máxima de 21 A sem aquecimento excessivo. Este transformador possui um suporte de acrílico, onde se encontram duas tomadas, uma de entrada e outra de saída das voltagens do transformador, e se encontra alojado na parte inferior do *rack* externo. Uma foto deste transformador pôde ser vista na Fig. (4.7).

Na saída do transformador de 30 kV foi conectado um filtro de linha, responsável pela alimentação da fonte de tensão 0 - 6,5 kV e do transformador de isolamento da fonte de corrente, alimentado-os com tensão alternada de 220 V. As conexões entre o filtro de linha, o transformador e a fonte são descritas a seguir:

- A ligação entre o filtro de linha e a fonte de tensão 0 - 6,5 kV é feita através de um cabo próprio da fonte de tensão;
- A ligação entre o filtro de linha e o transformador de isolamento é feita através de um cabo condutor elétrico duplo de $2,5 \text{ mm}^2$ de área de secção reta que está ligado a um conector cerâmico bipolar. A este condutor estão ligados os cabos do enrolamento do transformador de isolamento.

Na terceira prateleira do *rack* encontra-se a fonte de corrente que alimenta o filamento emissivo e, conseqüentemente, é responsável pela emissão dos íons.

A fonte de tensão 0 - 6,5 kV levanta o potencial da fonte de corrente entre 0 e 6,5 kV em relação ao *rack* interno. Como explicado anteriormente, essa diferença de potencial, ao qual a fonte é submetida, é responsável pelo estágio de extração dos íons. Além disso, a fonte de corrente deve ser alimentada por uma tensão alternada de valor eficaz de 220 V. Esta tensão alternada de alimentação é fornecida pelo enrolamento secundário do transformador de isolamento, que não permite riscos à elevação do potencial da fonte. Sendo assim, tanto a saída do transformador de isolamento quanto a saída da fonte de tensão devem estar conectadas à entrada da fonte de corrente. Desta forma temos 220 V levantados entre 0 e 6,5 kV em relação ao potencial do *rack* interno.

Para efeturamos essas conexões, utilizamos um conector cerâmico em forma de barra que é suportado por um bloco de madeira, que também funciona como um material isolante. Este condutor permite que tanto a saída da fonte de tensão de 0 - 6,5 kV quanto a entrada da fonte de corrente sejam conectadas à saída do transformador de isolamento. De um lado do conector estão ligados os terminais do enrolamento secundário do transformador de isolamento e do outro lado do conector estão ligadas a saída da fonte de tensão e a entrada da fonte de corrente.

- a saída da fonte de tensão 0 - 6,5 kV é ligada ao conector-barra através de um cabo coaxial de 50Ω devido ao tipo de borne da fonte. Este cabo é constituído por um núcleo condutor e um dielétrico interno; este conjunto está no interior de uma malha metálica, permitindo uma blindagem com relação aos campos eletromagnéticos externos e que, por sua vez, está revestida por outro dielétrico.
- a entrada da fonte de corrente é ligada ao conector barra através de um cabo $3 \times 0,75 \text{ mm}^2$ (duas fases e uma terra). Este cabo é próprio da fonte (para uma corrente máxima de 10 A sem aquecimento excessivo).

Essas conexões podem ser vistas na Fig. (4.14).

Até o momento descrevemos apenas a elevação do potencial da fonte de corrente. No entanto, o estágio de aceleração requer que os íons provenientes do filamento emissivo experimentem uma queda de potencial de 30 kV em relação à terra.

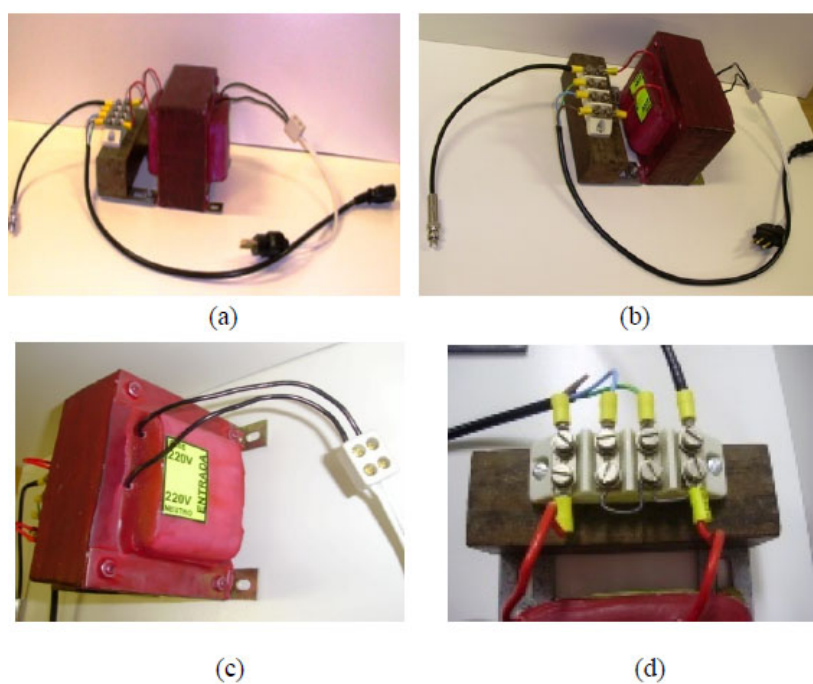


Figura 4.14: Detalhes das ligações elétricas no conector-barras envolvendo o transformador de isolamento, a fonte de tensão e a fonte de corrente no *rack* externo.

Para este fim temos a fonte de tensão de 30 kV, que está localizada num *rack* comercial de 19 polegadas, que fica próximo ao conjunto formado pelos *racks* externo e interno, mas que não possui qualquer dependência mecânica com este conjunto.

A fonte de tensão de 30 kV é ligada na rede elétrica convencional, que fornece uma voltagem eficaz de 110 V, através do cabo de alimentação da própria fonte. Observamos que todo o circuito descrito anteriormente está conectado à saída da fonte de tensão de 30 kV. Uma vez que o aterramento da fonte está situado na própria entrada (tomada da fonte conectada à rede elétrica), todo o circuito conectado à sua saída sofre uma elevação de potencial de 30 kV em relação à terra.

As placas de nylon localizadas no compartimento próprio da fonte de corrente (terceira prateleira) impedem que esta esteja em contato elétrico direto com o *rack* interno. Logo, a fonte de corrente não está elevada apenas 30 kV em relação à terra. Ela está elevada com um valor a mais entre 0 e 6,5 kV em relação à terra da fonte de tensão de 30 kV. Através de um cabo simples de 2,5 mm² de área de secção reta conectamos o terminal terra da fonte de 0 - 6,5 kV ao parafuso onde a saída da fonte de tensão de 30 kV está conectada. Agora, a fonte de corrente continua elevada entre 0 e 6,5 kV em relação à terra da fonte de tensão 0 - 6,5 kV. No entanto, o terra da fonte de 0 - 6,5 kV está elevado 30 kV em relação ao terra da rede elétrica convencional (0 V). Portanto, a diferença de potencial entre o filamento emissivo e a terra é de 36506,5 V, no caso da tensão máxima de saída, e esta diferença total apresenta os degraus de potencial representados na Fig. (4.1).

Todas as conexões elétricas realizadas estão resumidas na Tabela (5.2).

Por fim, na parte superior do *rack* interno, isto é, na última prateleira, foi construído um suporte para a fonte de íons. Este suporte possui parafusos como pés, de modo a permitir o ajuste da altura da fonte. Uma foto deste suporte juntamente com a fonte pode ser vista na Fig. (4.15).

4.6 Simulação, Construção e Montagem das Lentes Eletrostáticas

Para a construção das lentes temos que levar em consideração alguns fatores que são indispensáveis para garantir o bom funcionamento das mesmas, como, por exemplo, evitar sulcos que possam aprisionar ar dificultando o vácuo, utilizar

Equipamento	Entrada	Saída
Fonte de 30 kV	Rede elétrica	Parafuso do rack interno
Transformador de isolamento de 30 kV	Rede elétrica	Entrada da fonte de 0-6,5 kV
		Enrolamento primário do transformador de isolamento 0-6,5 kV
Fonte 0-6,5 kV	Enrolamento primário do transformador de isolamento de 30 kV Obs.: O terminal terra da fonte está ligado ao parafuso do <i>rack</i> interno	Entrada da fonte de corrente
Transformador de Isolamento 0-6,5 kV	Enrolamento secundário do transformador de isolamento 30 kV	Saída da fonte 0-6,5 kV
		Entrada da fonte de corrente
Fonte de corrente	Enrolamento secundário Transformador de isolamento 0-6,5 kV	Filamento emissivo
	Saída da fonte 0-6,5 kV	

Tabela 4.4: Resumo de todas as conexões elétricas.

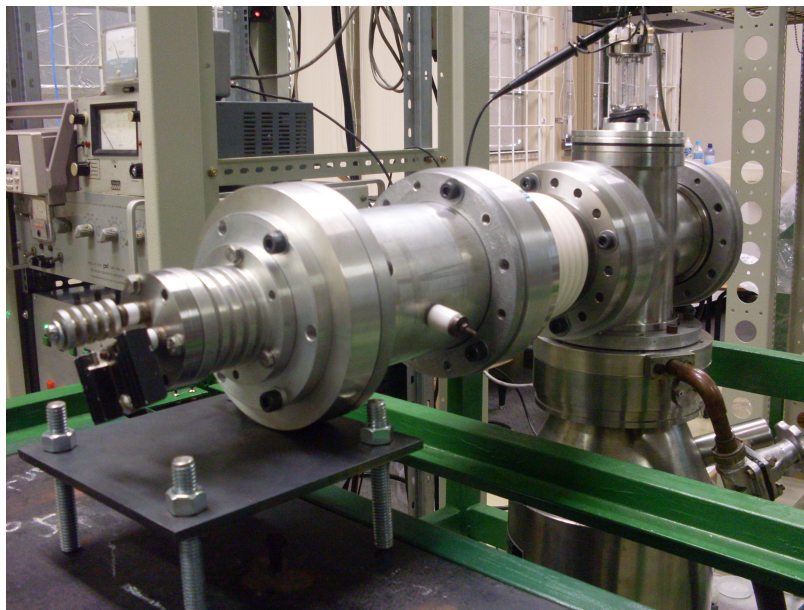


Figura 4.15: Prateleira superior do *rack* interno com o suporte para a fonte.

cerâmicas como isolantes, visto que as lentes ficarão em um potencial muito elevado

em relação à terra, entre outras considerações.

Para iniciarmos o processo de construção das lentes, foram feitas simulações com o *software* Simion [10], como descrito no Capítulo 3. Como vimos, este método o espaço ocupado pelos eletrodos não é tratado como contínuo, mas como uma rede de pontos discretos. O potencial de todos os pontos é obtido usando uma aproximação numérica da equação de Laplace, fazendo uso dos potenciais conhecidos nos pontos de contorno. A interpolação é utilizada para encontrar o potencial em qualquer ponto intermediário.

Foram feitas várias simulações, que são descritas a seguir.

O objetivo da fonte nessa linha de colisões atômica é o de fazer com que o feixe se mova paralelamente durante todo o processo de aceleração, isto é, não deixando que o mesmo se espalhe por dentro da câmara de vácuo.

Na primeira simulação, a fonte se encontra em um potencial de 33 kV, o tubo que a reveste em um potencial de 30 kV e mais a frente o tubo maior a um potencial 0 kV. Notamos que a abertura do feixe dos íons se deu de uma forma não satisfatória, se espalhando muito, pois o objetivo é que saiam o máximo em paralelo. Uma figura desta simulação é mostrada na Fig. (4.16).



Figura 4.16: Primeira simulação das lentes utilizando-se o SIMION.

Resolvemos, então, simular com anéis entre a fonte e o tubo maior, porém o resultado não foi satisfatório. Os anéis estavam em potenciais distintos seguindo um padrão de queda de 3 kV de um para o outro, sendo o primeiro a 27 kV e o último a 3 kV. Como observamos na figura (4.17), o resultado ainda não foi satisfatório.

Como podemos observar, as simulações feitas com anéis não nos trouxe bons resultados. Agora vamos fazer as simulações com três lentes, como segue a Fig. (4.18).

Inicialmente introduzimos entre a fonte e o tubo maior uma lente eletrostática

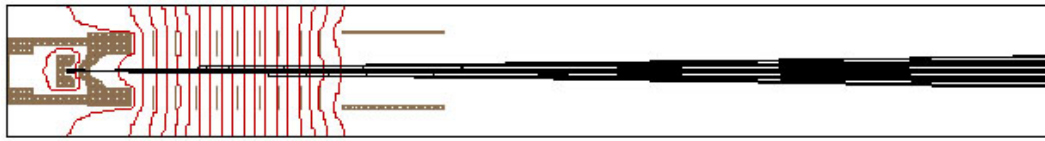


Figura 4.17: Segunda simulação das lentes utilizando-se o SIMION. Observe que o feixe continua divergindo ao longo da trajetória.

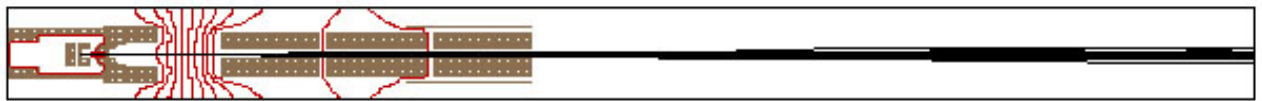


Figura 4.18: Simulação com lente de 3 elementos.

de três elementos, sendo que o do meio está a um potencial de 5 kV e as extremas aterradas. Porém, como podemos observar na Fig. (4.18), as três lentes não nos deram um bom resultado. Agora, simulamos a lente com dois elementos. Veja a Fig. (4.19).



Figura 4.19: Simulação com lente de 2 elementos. Observe que o feixe não diverge ao longo do percurso.

A primeira lente se encontra em um potencial de 32,5 kV, a segunda em um potencial de 30 kV e o tubo a 0 kV, onde observamos, agora, um bom resultado, o melhor encontrado em todas as simulações. Com as simulações realizadas, foi feito o desenho técnico da lente utilizando as dimensões dadas pelo próprio programa Simion.

Na análise das simulações que foram feitas pode-se observar que as dimensões das lentes não interferiam muito no alinhamento do feixe mas sim a distribuição de potencial. Essa conclusão foi tirada para a lente de dois elementos onde o tamanho

das lentes e os espaçamentos entre elas era alterado e obtivemos resultados bem parecidos. Os resultados se alteravam drasticamente apenas quando alterávamos a distribuição de potencial. A figura (4.20) mostra o desenho da lente, da forma como foi construída.

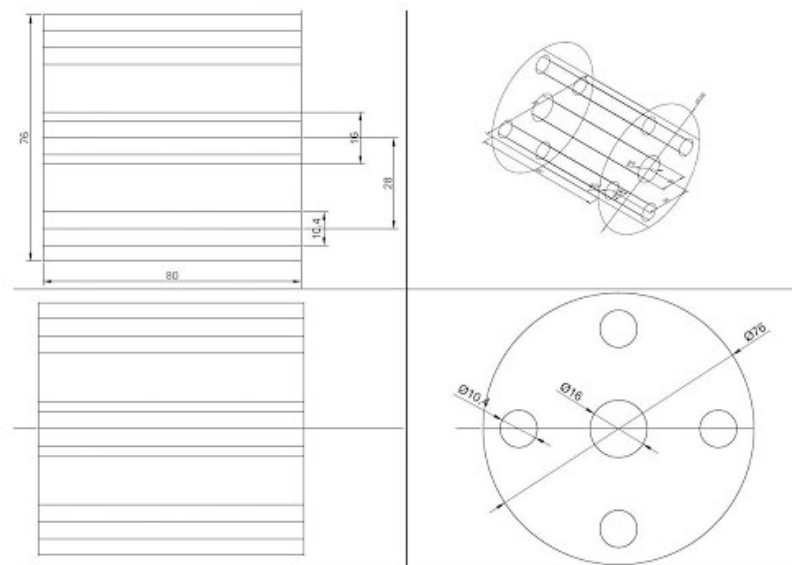


Figura 4.20: Projeto de construção da lente eletrostática de dois elementos.

Em seguida montamos a lente sobre uma das flanges, que foi adaptada para receber os parafusos que servirão de suporte às lentes. Estes parafusos foram encapsulados por tubos de cerâmica, que funcionam como isolantes visto que os elementos da lente se encontram em diferentes potenciais e as lentes foram colocadas sobre essa cerâmica sendo que entre um elemento e outro foi colocado um tubo de cerâmica de diâmetro maior, permitindo um espaçamento entre os elementos da lente. As fotos da lente e dos parafusos podem ser vistas na Fig. (4.21).

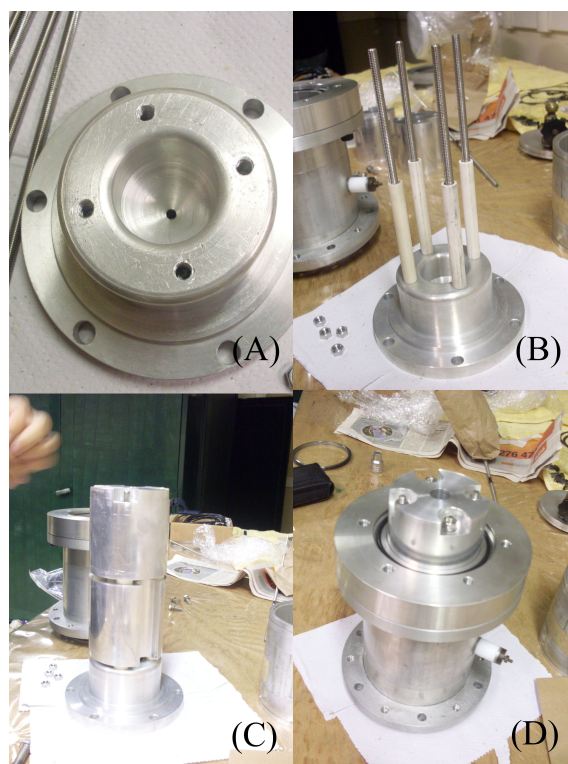


Figura 4.21: Montagem das lentes. (A) Adaptação da flange para os parafusos. (B) Parafusos conectados à flange com os isolantes de cerâmica. (C) Elementos da lente montados sobre os parafusos. (D) Montagem final da lente dentro da flange.

4.7 Montagem da Linha de Colisões

Como vimos nas seções anteriores, o íon produzido na fonte sofre uma aceleração devido a uma diferença de potencial de até 36,5 kV. Além disso, também há a diferença de potencial ao qual a lente é submetida e finalmente temos o copo de Faraday, onde o íon é detectado, que está aterrado. Sendo assim, torna-se necessário a inserção de um isolante na linha.

Uma foto da linha montada pode ser vista na Fig. (4.22).

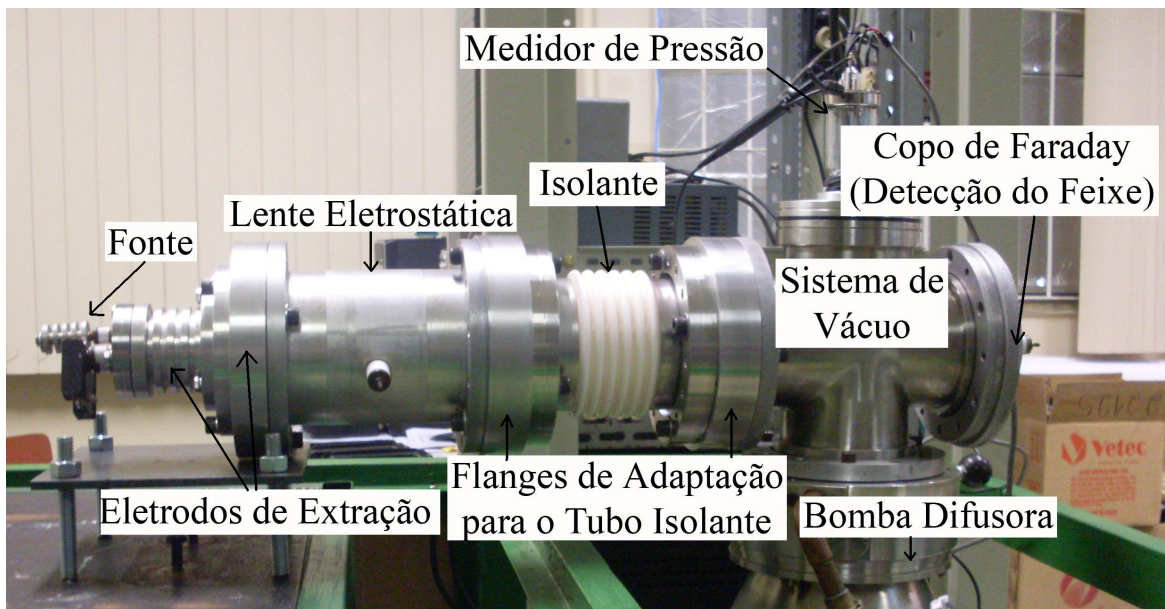


Figura 4.22: Esquema da montagem do acelerador com a discriminação dos componentes.

As flanges de adaptação foram necessárias devido a uma diferença entre o padrão dos furos do tubo isolante e o das flanges. Estas flanges também foram construídas na Oficina Mecânica do DF.

4.8 Circuito para o controle das tensões na lente

Como já vimos, toda linha de colisões será elevada em potencial que pode chegar a 36,5 kV. Numa primeira etapa, o *rack* interno juntamente com os seus componentes chegam a 30 kV enquanto que a fonte de corrente pode chegar a 36,6 kV, referente ao potencial do *rack* interno juntamente com o potencial de extração. Sendo assim, construímos um sistema, uma espécie de divisor de tensão, constituído de quatro resistores, cuja resistência é de 10 M Ω , onde o potencial da lente pode atingir um valor que varia entre o potencial da flange, variável entre 0 e 30 kV, e o potencial da fonte de corrente, que é o mesmo valor do potencial da flange somado com o potencial de extração. Uma foto desse sistema pode ser visto na Fig. (4.23), enquanto que o circuito elétrico responsável pela alimentação das lentes pode ser visto na Fig. (4.24).

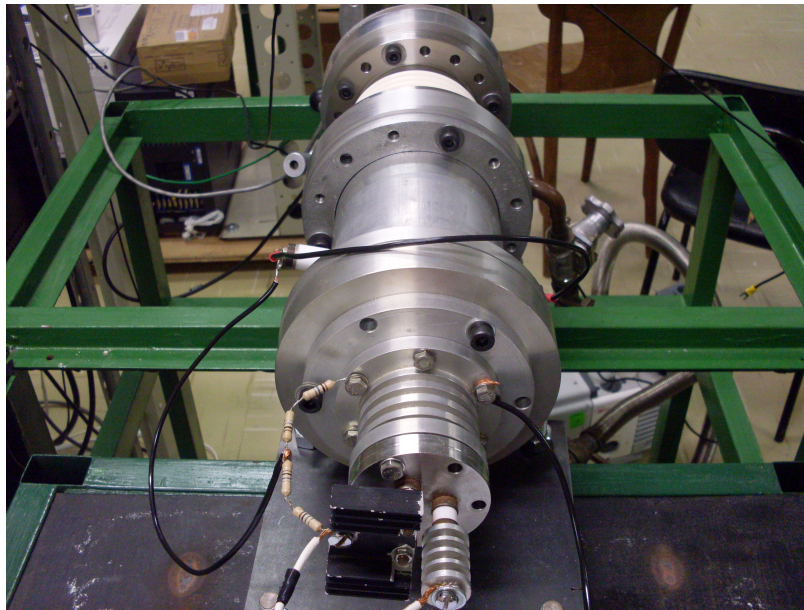


Figura 4.23: Resistores funcionando como um divisor de tensão para as lentes.

Note que o primeiro resistor se encontra conectado à flange, que está no potencial da fonte de tensão de 30 kV. O último se encontra conectado à fonte de

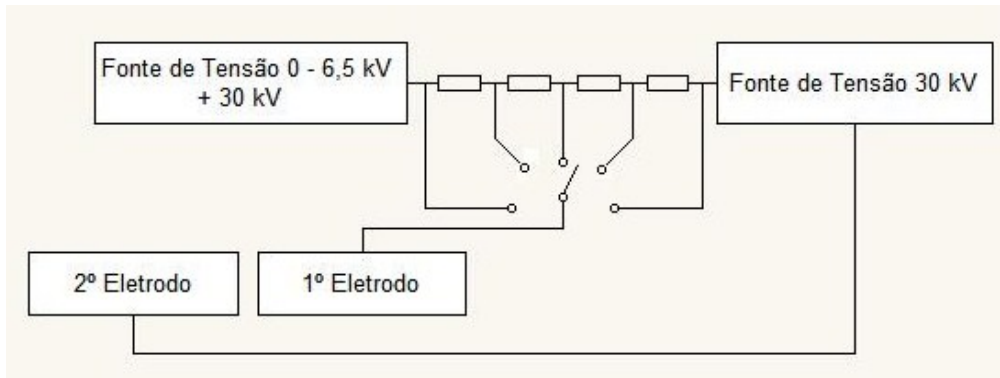


Figura 4.24: Circuito elétrico das tensões aplicadas às lentes.

corrente, onde o potencial chega a 6,5 kV a mais que o da flange. Desta forma, o potencial ao qual a lente está submetida é igual à diferença de potencial ao qual se encontra a flange, dado pela fonte de tensão de 30 kV mais uma proporção que dependerá em qual posição se encontra o fio ao qual é conectado às lentes.

Supondo-se que a fonte de tensão de 30 kV nos forneça uma diferença de potencial de 30 kV e a fonte de tensão de 6,5 kV um potencial de 6,0 kV, então para as diferentes configurações do fio que conecta as lentes, teremos as seguintes tensões, conforme ilustra a tabela (4.5). A posição das lentes é ilustrada na Fig. (4.25).

Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
30,0 kV	31,5 kV	33,0 kV	34,5 kV	36,0 kV

Tabela 4.5: Potencial ao qual a lente fica sujeita.

Em outras palavras, podemos dizer que o potencial ao qual a lente está sujeita, de acordo com a Fig. (4.25) são dados pela Tabela (4.6).

De acordo com a simulação feita na Seção 4.6, para atingirmos o potencial ideal para a lente, devemos manter a fonte de tensão de 30 kV no máximo e o potencial de extração em 5,0 kV e o divisor de tensão fornecendo 2,5 kV, isto é, o fio situado na Posição 3, conforme ilustraram as Figs. (4.23) e (4.25).

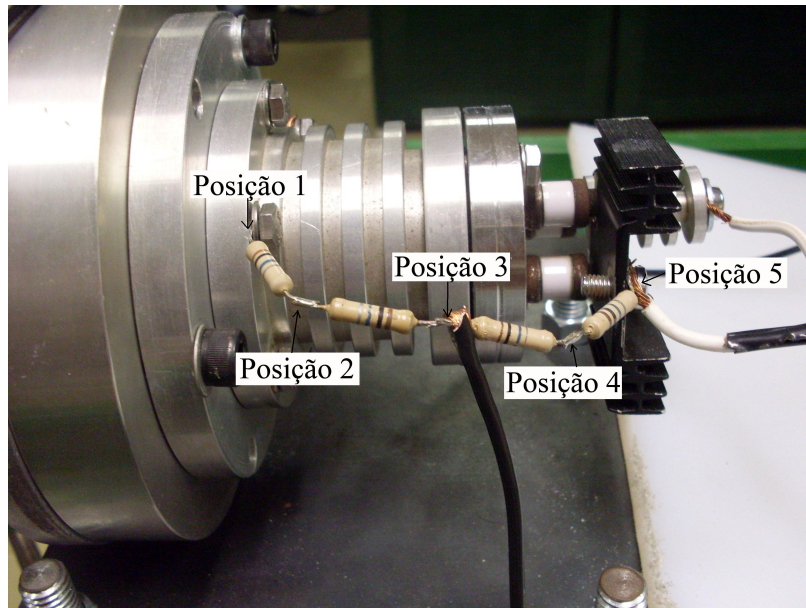


Figura 4.25: Posições possíveis para o fio que alimenta a lente.

Posição 1	Posição 2	Posição 3
Potencial da Fonte 30 kV + 0	Potencial da Fonte 30 kV + 0,25 Potencial de extração	Potencial da Fonte 30 kV + 0,50 Potencial de extração
Posição 4	Posição 5	
Potencial da Fonte 30 kV + 0,75 Potencial de extração	Potencial da Fonte 30 kV + Potencial de extração	

Tabela 4.6: Potencial ao qual a lente fica sujeita de acordo com os potenciais da Fonte de 30 kV e do Potencial de Extração.

4.9 Circuito de Emissão/Extração e Leitura da Corrente de Emissão

A fonte de 30 kV é responsável por elevar o potencial de todos os equipamentos do *rack* interno. Sendo assim, todos os equipamentos sofrem uma elevação no potencial dada por esta fonte. Como os íons são emitidos através do efeito termiônico, a fonte de corrente, cujo potencial está elevado em relação à terra, será responsável pelo aquecimento e consequente emissão do íon. Assim que o íon é emitido, ele passa pelo estágio de extração, onde é criada uma diferença de potencial entre ele e este

eletrodo, o potencial de extração, acelerando-o em direção à linha. Essa diferença de potencial é criada pela fonte de tensão 0 - 6,5 kV. Esta fonte de tensão se encontra no mesmo potencial dos demais equipamentos do *rack* interno, porém ela é responsável por elevar o potencial da fonte de corrente, fazendo com que o íon ao sair do filamento seja acelerado por esta diferença de potencial. Em seguida, após passar pelos eletrodos de extração e ser acelerado, os íons passam pela lente eletrostática, permitindo o alinhamento do feixe, como descrito anteriormente. O feixe ao sair das lentes passa pelo tubo isolante, atingindo a outra parte da linha, que se situa no potencial da terra. Nesse estágio, os íons sofrem uma aceleração devido à diferença de potencial criada pela fonte de 30 kV. Por fim, o íon colide com o copo de Faraday, onde então é detectado.

O circuito elétrico da Fig.(4.26) tem por finalidade o estabelecimento da corrente elétrica responsável pelo aquecimento do filamento emissivo, isto é, do estágio de emissão e das diferenças de potencial associadas ao estágio de extração dos íons positivamente carregados. Vamos supor que num determinado instante a fonte de corrente esteja mantendo uma diferença de potencial de 2,5 V para um determinado valor da corrente de aquecimento do filamento emissivo. Tanto o valor da corrente elétrica quanto o valor da voltagem são indicados nos *displays* da fonte de corrente. Além disso, um dos displays da fonte de tensão 0 - 6,5 kV indica um valor de 5,0 kV. E ainda, temos o valor da tensão da fonte de 30 kV, que vamos supor, seja 30 kV. O circuito elétrico da Fig.(4.26) mostra que, nessas condições, a fonte de corrente mantém uma diferença de potencial de 2,5 V entre o filamento emissivo e o eletrodo 1 e que a fonte de tensão 0 - 6,5 kV mantém uma diferença de potencial de 5 kV entre os eletrodos 1 e 2, sendo esta diferença de potencial responsável pelo estágio de extração dos íons provenientes do filamento emissivo. Em seguida, ao passar pelo eletrodo 2, ele ainda está a 30 kV acima do potencial da terra, sendo este potencial responsável pela aceleração do íon.

A Fig.(4.27) apresenta o mesmo circuito de emissão e extração apresentado na Fig.(4.26); note que tanto do lado esquerdo do circuito (quadrado azul) como o lado direito do circuito (quadrado marrom) estão aterrados. Este aterramento realiza o fechamento do circuito alimentado pela fonte de tensão de 30 kV. Devido à emissão de íons positivos, a substância emissiva (eletricamente neutra antes da emissão) torna-se negativamente carregada. A fim de que a substância emissiva

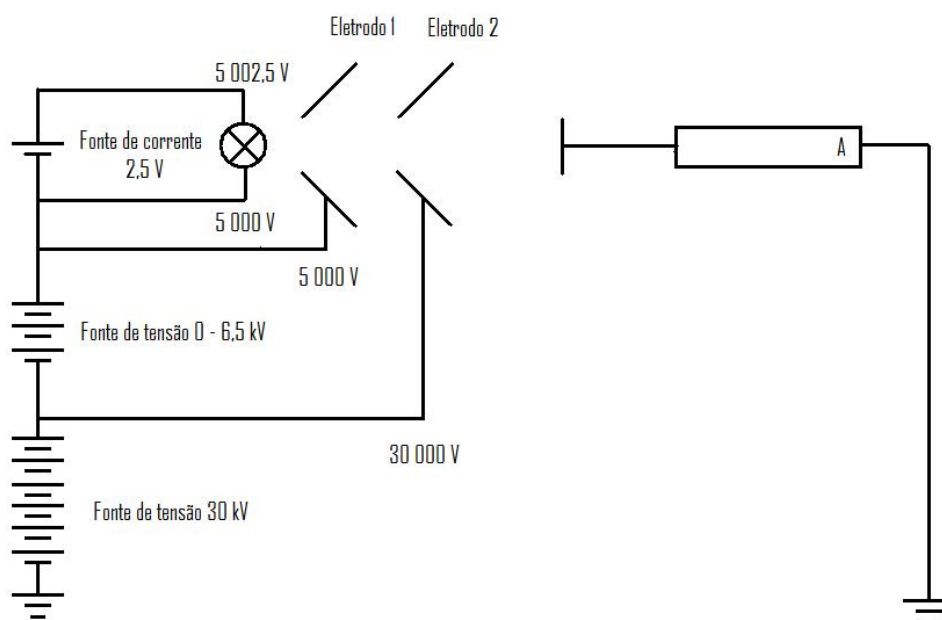


Figura 4.26: Circuito de emissão, extração e aceleração dos íons provenientes do filamento aquecido.

permaneça neutra [16], o excesso de cargas negativas deve ser descarregado desta mesma substância; o escoamento do excesso de partículas de carga negativa ocorre devido ao aterramento da fonte de 30 kV.

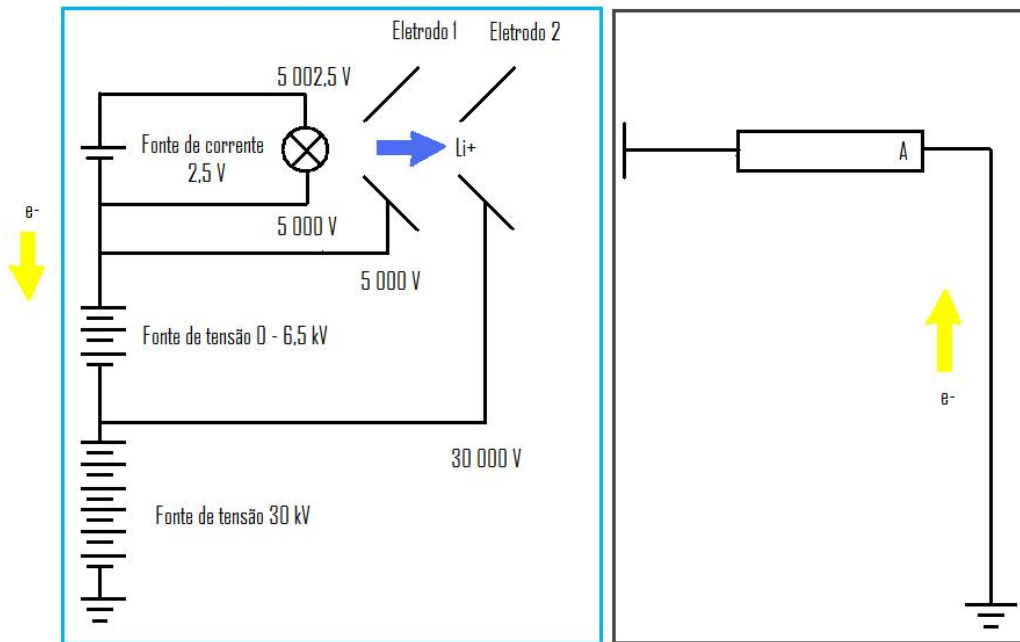


Figura 4.27: Sentido da corrente de emissão iônica e das correntes eletrônicas devidas ao aterramento dos lados esquerdo e direito do circuito.

O *display* associado ao limitador de corrente da fonte de tensão 0 - 6,5 kV indica a corrente eletrônica equivalente ao número de íons positivos que partiram do filamento emissivo por segundo. Supondo que todos os íons emitidos alcancem o detector, tanto o picoamperímetro quanto o *display* associado ao limitador de corrente indicarão o mesmo valor de corrente eletrônica (o qual possui o mesmo valor da corrente iônica) I_0 .

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo será descrita a coleta dos dados obtidos com o acelerador. Essas medidas são referentes à emissão da fonte termiônica, a focalização do feixe utilizando-se o conjunto de lentes eletrostáticas e a detecção da corrente iônica. Também serão apresentadas tabelas e gráficos referentes às medidas e por fim, com base nessa análise, encontrar a configuração mecânica que otimiza o funcionamento da fonte termiônica e dos sistemas de extração, aceleração e detecção.

Essa análise será realizada em duas etapas: A primeira consiste na execução dos procedimentos pré-operacionais que devem ser realizados após a inserção de um novo filamento no sistema, abrangendo os procedimentos de rotina que visam a preparação do filamento emissivo e do ambiente da câmara de detecção para a etapa operacional. A segunda etapa consiste na coleta dos dados, isto é, na realização das medidas referentes à emissão, aceleração, focalização e detecção do feixe.

Também estamos interessados em encontrar a configuração entre os potenciais de aceleração e extração que otimizam o funcionamento do acelerador. Várias medidas foram realizadas visando o melhor funcionamento do acelerador.

5.1 Procedimentos Pré-Operacionais

Esta etapa consiste na preparação do filamento emissivo, conforme consta a descrição no Capítulo 3. Após a preparação do filamento, o mesmo é colocado na fonte, conforme ilustra a figura (5.1).

Após inserido na câmara de detecção, liga-se as bombas de vácuo. Quando



Figura 5.1: Fonte com o filamento a ser inserido no acelerador.

o valor da pressão dentro da câmara de detecção chega ao valor de cerca de $1,5 \times 10^{-5} \text{ torr}$ a fonte de corrente é ligada e a intensidade da corrente de aquecimento é monitorada através do *display* correspondente da fonte. À medida que o valor da corrente é aumentado, observa-se um aumento da pressão devido à evaporação da água destilada utilizada na preparação da mistura que cobre o filamento e à dessorção provocada pelo aquecimento das tubulações do acelerador resultante da absorção da radiação térmica emitida pelo filamento.

Durante esse processo de preparação do filamento e do ambiente de vácuo no interior da câmara de detecção, cada aumento de uma unidade na intensidade da corrente de aquecimento do filamento só é feito após a pressão no interior da câmara de detecção atingir valores iguais ou menores que $1,5 \times 10^{-5} \text{ torr}$. O aumento na intensidade da corrente de aquecimento é realizado até que seja atingido o valor de 12 A , pois intensidades de correntes superiores a esse valor poderiam provocar danos permanentes no filamento devido ao seu aquecimento excessivo. Atingido esse valor de corrente, espera-se a estabilização do valor da pressão desejado, da ordem de 10^{-6} torr .

Este procedimento também é importante pois nos permite analisar as conexões mecânicas e elétricas da fonte termiônica. Caso o valor da pressão não diminua, podemos concluir que há algum vazamento nas tubulações ou se os valores da corrente não se alteram, há algum problema nas ligações da parte elétrica. A execução

de tais reparos implica na descompressão da câmara de detecção, na reparação das conexões elétricas e mecânicas da fonte termoiônica, na preparação e inserção de um novo filamento emissivo e novamente na criação do ambiente de vácuo adequado para a realização das medições desejadas.

Estes procedimentos de rotina devem ser realizados antes do início das medições relativas à emissão, aceleração, focalização do feixe e detecção da corrente iônica.

5.2 Estudo da Emissão da Fonte Termiônica

Antes de iniciar as medidas, devemos aguardar até que a pressão no interior da câmara atinja um valor razoável para que as medidas possam ser efetuadas. Este valor é da ordem de 10^{-6} torr. Atingido este valor, a fonte de corrente é desligada e aguardamos cerca de 30 minutos para que o filamento seja resfriado e fique pronto para a realização das medidas.

Após o resfriamento do filamento, a fonte de tensão 0 - 6,5 kV é ligada e mantemos uma tensão de extração de 1 kV constante durante toda a primeira parte das medidas. Em seguida, mantida essa corrente de extração, ligamos novamente a fonte de corrente e iniciamos as medidas da corrente de emissão em função da corrente de aquecimento. A medida da corrente de emissão é feita através da leitura do *display* associado ao limitador de corrente da fonte de tensão 0 - 6 kV. A tabela e (5.1) apresenta os resultados obtidos nestas medidas para um filamento preparado de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3. Cada valor da medida é obtido após um intervalo de tempo suficiente para que cada valor da corrente de emissão se estabilize durante um valor da corrente de aquecimento.

Nesse primeiro momento, vamos mostrar os dados obtidos referentes à emissão da fonte termiônica. Nessa parte não utilizaremos o estágio de aceleração dos íons, isto é, não utilizaremos a fonte de tensão de 30 kV. No trabalho anterior [6], o aluno Raphael Taligliatti fez essas mesmas medidas, porém, não foi considerado o estágio de aceleração e a utilização das lentes. Diferentemente da Fig. (4.22), em seu trabalho, a linha não dispunha das lentes nem do tubo isolante, isto é, o tamanho da linha de colisões era menor. Então o objetivo desta parte é reproduzir o mesmo procedimento feito por ele e comparar os resultados para verificar se haverá alguma

alteração com este aumento da linha de colisões, isto é, com a inserção das lentes e do tubo isolante. Realizando-se a coleta de dados de emissão *versus* corrente de aquecimento, temos os dados obtidos na Tabela (5.1).

Tabela 5.1: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1.

Corrente de Aquecimento (A)	Corrente de Emissão (μA)
1	16,3
2	14,5
3	12,5
4	11,4
5	10,8
6	8,6
7	5,1
8	-0,1
9	-0,2
10	0,3
11	1,5
12	2,8
13	4,3
14	5,8

Analisando os dados da Tabela (5.1) observamos que para alguns valores da corrente de aquecimento, o valor da corrente de emissão é *negativo*. Isso se deve ao fato de este valor estar associado ao erro da medida, isto é, referente ao erro de leitura da medida. Sendo assim, para contornarmos este erro, devemos pegar o menor valor da corrente de emissão, no caso, $-0,2 \mu\text{A}$ e somá-lo com os demais valores da corrente de emissão. Assim, não teremos mais os valores negativos e o menor valor da corrente de emissão seria $0 \mu\text{A}$, como esperado. Então, somando $0,2 \mu\text{A}$ à segunda coluna da Tabela (5.1), temos os novos valores, conforme ilustra a Tabela (5.2).

Todos os demais dados serão apresentados com os erros das medidas excluídos. Todas as demais tabelas podem ser encontradas no Apêndice A deste trabalho. O gráfico dos dados da Tabela (5.2) se encontra na Figura 5.2.

Analisando-se o gráfico da Figura (5.2), observa-se que os valores da intensi-

Corrente de Aquecimento (A)	Corrente de Emissão (μA)
1	16,5
2	14,7
3	12,7
4	11,6
5	11,0
6	8,8
7	5,3
8	0,1
9	0
10	0,5
11	1,7
12	3,0
13	4,5
14	6,0

Tabela 5.2: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1 excluindo-se o erro da medida.

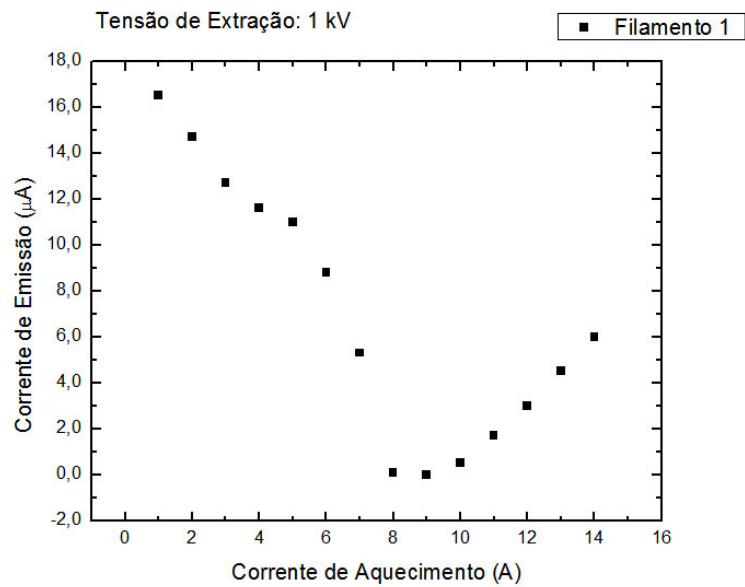


Figura 5.2: Gráfico da corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o Filamento 1.

dade da corrente de emissão se tornam confiáveis a partir da corrente de aquecimento de valor 10 A, uma vez que, para intensidades de corrente de aquecimento do filamento emissivo inferiores a 10 A, a leitura é prejudicada devido às limitações da leitura da própria fonte de tensão e a focalização do feixe.

Portanto, redesenhando o gráfico da Figura (5.2) a partir dos valores da corrente de aquecimento de 10 A, temos uma reta crescente dos valores de emissão para o aumento da corrente de aquecimento, conforme ilustra a Figura (5.3).

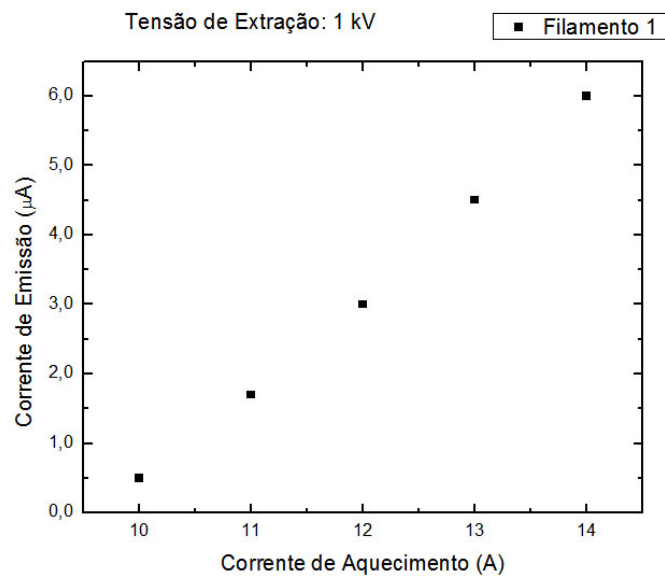


Figura 5.3: Gráfico Corrente de Aquecimento \times Corrente de Emissão para o filamento 1.

Pelo gráfico apresentado na Figura (5.3), observa-se que o crescimento da intensidade da corrente de emissão acompanha o crescimento da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo, como esperado [23]. Levando em consideração o fato de que desejamos evitar o aquecimento excessivo do filamento, o valor de corrente de aquecimento de 14 A é o que limita o funcionamento da fonte termiônica.

Repetimos o mesmo procedimento descrito anteriormente para outro filamento. Os dados se encontram na Tabela (A.1).

Nessa tabela, novamente vemos que os valores da corrente de emissão se tornam confiáveis a partir de 10 A. Desenhando o gráfico Aquecimento \times Emissão, temos o gráfico da Figura (5.4).

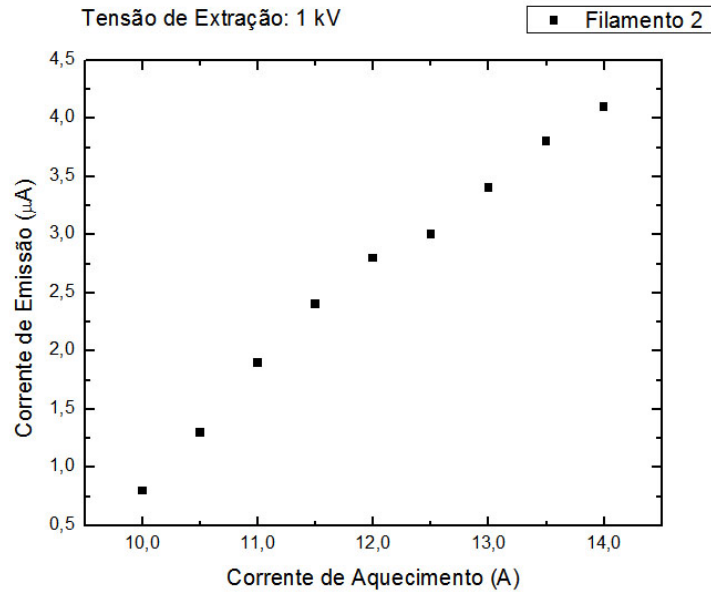


Figura 5.4: Gráfico Corrente de Aquecimento \times Corrente de Emissão para o filamento 2.

Após as medidas referentes à corrente de emissão em função da corrente de aquecimento, fixamos o valor da corrente, no caso em 12 A, e variamos o valor do potencial de extração. Os dados se encontram na Tabela (A.3).

O gráfico dos dados da Tabela A.3 encontra-se na Figura 5.5.

Pela análise do gráfico da Fig.(5.5), vemos que à medida que aumentamos o potencial de extração, maior é a corrente de emissão. Este comportamento é esperado pois, se aumentamos o valor do potencial de extração, mais íons serão extraídos do filamento emissivo.

A proporcionalidade entre a corrente de emissão máxima I que pode ser estabelecida entre dois eletrodos planos e paralelos no vácuo e a tensão de extração V estabelecida entre estes dois eletrodos é estabelecida pela lei de Child - Langmuir

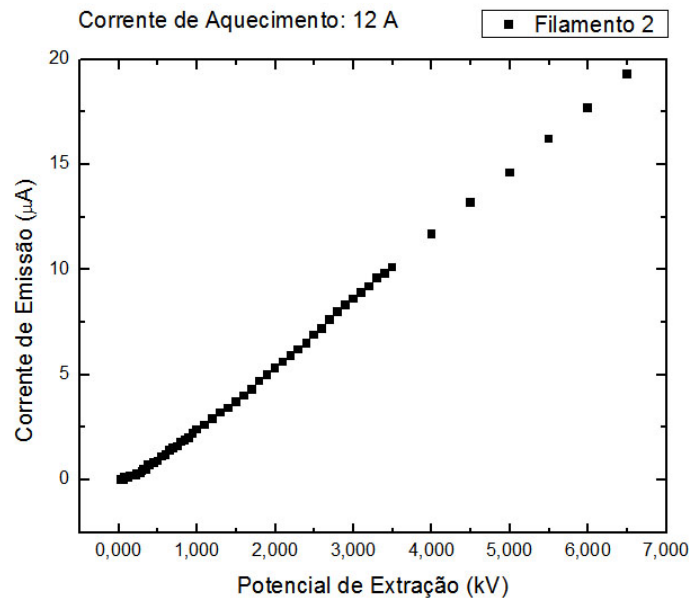


Figura 5.5: Gráfico Potencial de Extração × Corrente de Emissão para o filamento 2.

[13]:

$$I = kV^{\frac{3}{2}} \tag{5.1}$$

Esta lei se aplica, em aproximação, a eletrodos de diferentes geometrias [24]. Sendo assim, para verificarmos esta lei, vamos fazer o gráfico da Tabela (A.3) com as escalas em logarítmo, e não decimal, conforme ilustra a Figura (5.6). No mesmo gráfico, pode-se utilizar o recurso Fit Linear, do *software* Origin 7.0 para que este determine o coeficiente angular da reta por ele ajustada. O gráfico das medidas em escala logarítmica, bem como o valor o ajuste linear se encontram na Figura (5.6).

Pelo *software* Origin versão 7.0, o valor do coeficiente de V encontrado foi de:

$$1,30 \pm 0,01 \tag{5.2}$$

Da mesma forma já descrita no Capítulo 3, preparamos outro filamento de acordo com o método descrito e fizemos as mesmas medidas do Filamento 2. Os valores da corrente de emissão em função do potencial de extração, mantendo-se a corrente de aquecimento em 12 A, encontram-se na Tabela (A.4).

O gráfico, já em escala log-log, pode ser visto na Figura (5.7).

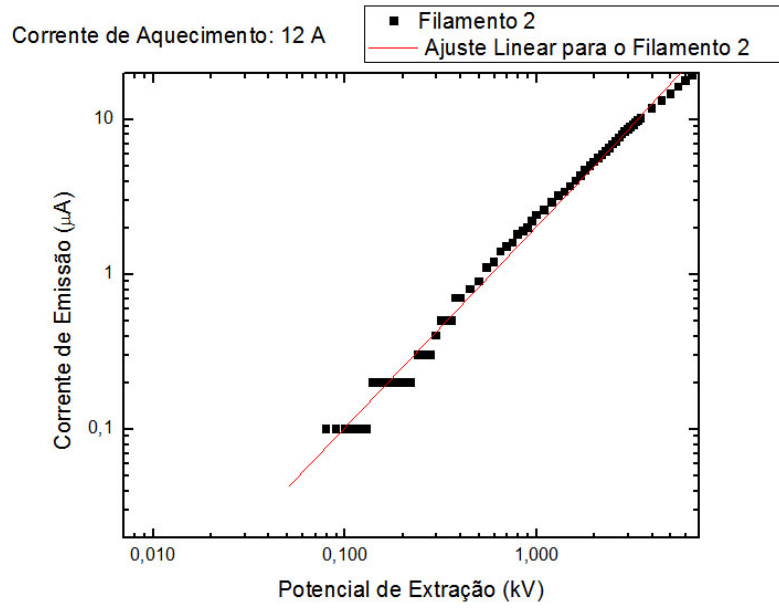


Figura 5.6: Gráfico Potencial de Extração \times Corrente de Emissão para o filamento 2 em escala logarítmica e o ajuste linear da reta.

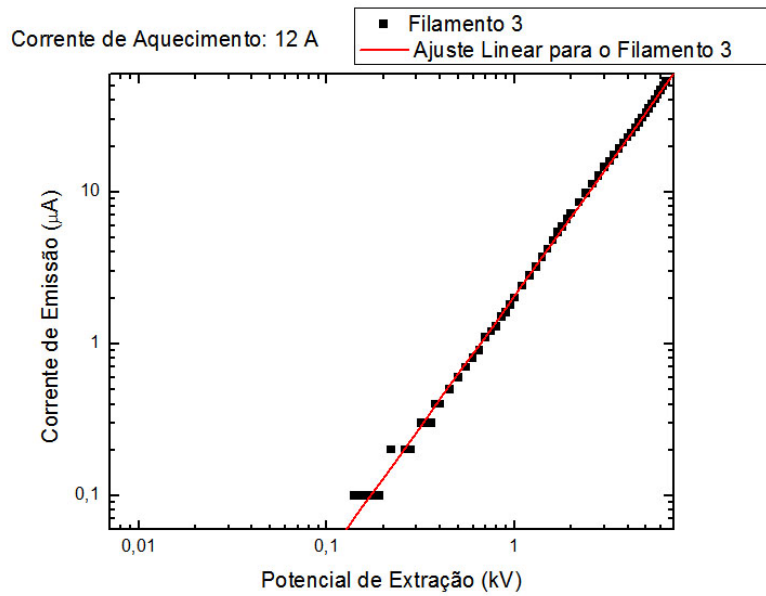


Figura 5.7: Gráfico Potencial de Extração \times Corrente de Emissão para o filamento 3 e o ajuste da reta.

De acordo com o ajuste linear feito pelo *software* Origin 7.0, o valor encontrado para o expoente de V é:

$$1,74 \pm 0,01$$

Comparando estes resultados com [6] vemos que os dados referentes à emissão da fonte termiônica são semelhantes em relação ao aumento da corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento, conforme ilustra a Fig. (5.8)

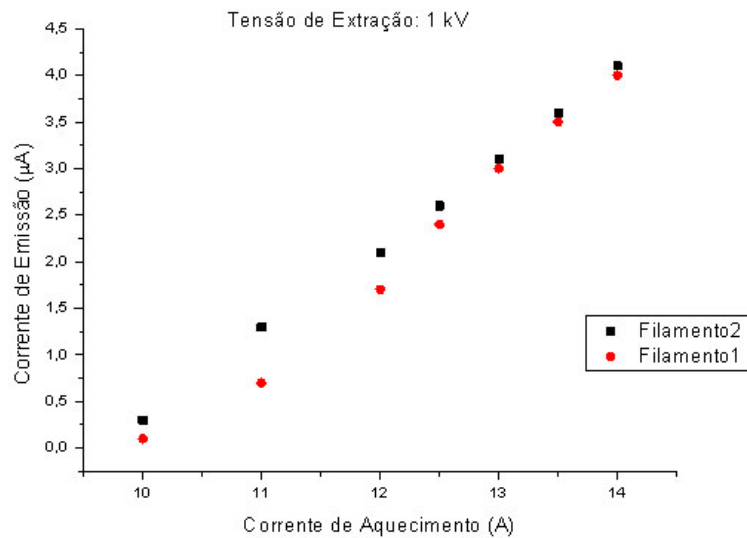


Figura 5.8: Gráfico da variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emisso para dois filamentos igualmente confeccionados e tensão de extração fixa em 1 kV [6].

Comparando-se os gráficos das Figs. (5.3) e (5.4) com o da Fig. (5.8), podemos verificar a repetição do padrão linear da variação da corrente de emissão com o aumento da corrente de aquecimento. Em outras palavras, podemos dizer que em relação à corrente de emissão, a inserção das lentes e do tubo não acarretou em alterações consideráveis nas medidas.

Em relação à variação da corrente de emissão *versus* potencial de extração, mantendo-se uma corrente de aquecimento fixa, temos que os valores encontrados em [6] foram de:

Para o filamento 1: $1,58 \pm 0,02$

Para o filamento 2: $1,54 \pm 0,02$

Portanto, podemos o tamanho da linha não influencia na corrente de emissão, isto é, quanto maior a corrente de aquecimento, maior será a corrente de emissão. Porém o mesmo não se aplica quando o potencial de extração é variado. A lei de Child-Langmuir é válida em [6], mas a mesma não foi verificada nesse trabalho. Uma das explicações está no fato de que neste trabalho a trajetória que o íon percorre desde a sua emissão na fonte até o detector ser maior e conseqüentemente durante o seu deslocamento no interior da linha, que nessa caso é maior que em [6], a deflexão do feixe é maior, não verificando, desta forma, a lei de Child-Langmuir. Essa correção será feita utilizando-se as lentes.

Agora será verificado o comportamento da corrente de emissão em função da tensão de aceleração.

5.3 Detecção da Corrente Iônica

A intensidade da corrente de emissão, para valores fixos de corrente de aquecimento e da tensão de extração, é muitas vezes maior que a intensidade da corrente iônica coletada pelo detector. Como explicado no Capítulo 2, a distribuição das superfícies equipotenciais, produzidas pelos campos eletrostáticos, na região entre os eletrodos carregados do sistema de extração modifica a trajetória das partículas eletricamente carregadas, acarretando em uma deflexão do feixe quando ele passa de uma região equipotencial para outra. A atuação das forças elétricas sobre as partículas carregadas determinam a abertura angular do feixe iônico, grandeza que interfere diretamente na detecção das partículas constituintes deste feixe. Assim, uma lente eletrostática pode possuir uma ação focalizadora, conforme descrito no Capítulo 2, de modo a otimizar a corrente detectada.

Para a análise da corrente detectada utilizamos um anteparo constituído de uma folha de forma circular de alumínio de 6,7 cm de diâmetro. Este anteparo de alumínio se encontra dentro da câmara, sendo este o copo de Faraday, responsável

pela coleta dos íons provenientes da fonte. Uma foto da conexão entre o copo de Faraday e o picoamperímetro, responsável pela leitura da corrente detectada, pode ser vista na foto da Fig. (5.9).

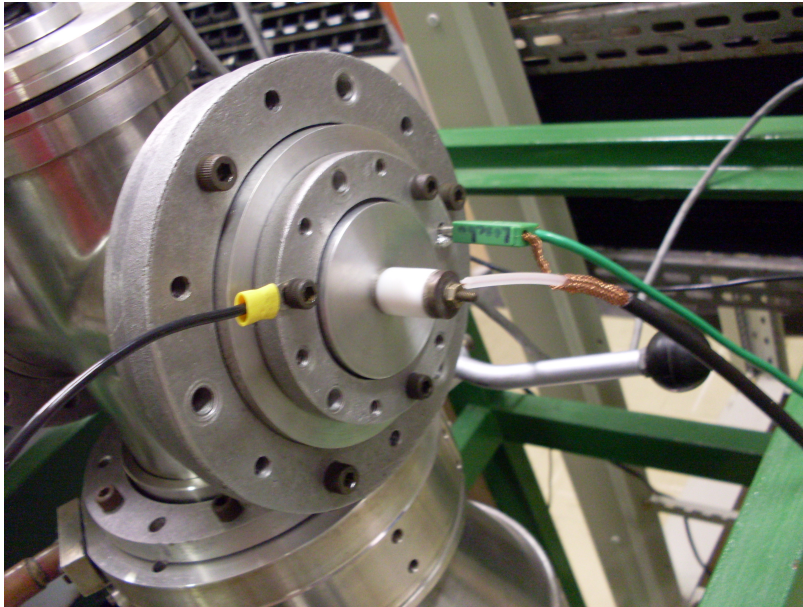


Figura 5.9: Conexão elétrica entre o copo de Faraday e o picoamperímetro. O aterramento do picoamperímetro é feito na própria linha, como pode ser visto pelo fio verde conectado à flange.

O picoamperímetro encontra-se num outro *rack*, de 19 polegadas, que também abriga a fonte de tensão de 30 kV e os medidores de pressão. Uma foto deste rack juntamente com estes equipamentos pode ser vista na Fig. (5.10).

Para o filamento 1, os dados referentes às medidas da corrente detectada em função da corrente de aquecimento podem ser vistos na Tabela (A.5). O gráfico referente a esses dados pode ser visto na Fig. (5.11).

Para o filamento 2, o gráfico pode ser visto na Fig. (5.13) enquanto que os dados relativos à corrente detectada em função da corrente de aquecimento podem ser vistos na Tabela (A.6).

Vamos fazer outra comparação com os resultados obtidos por [6], vamos fazer

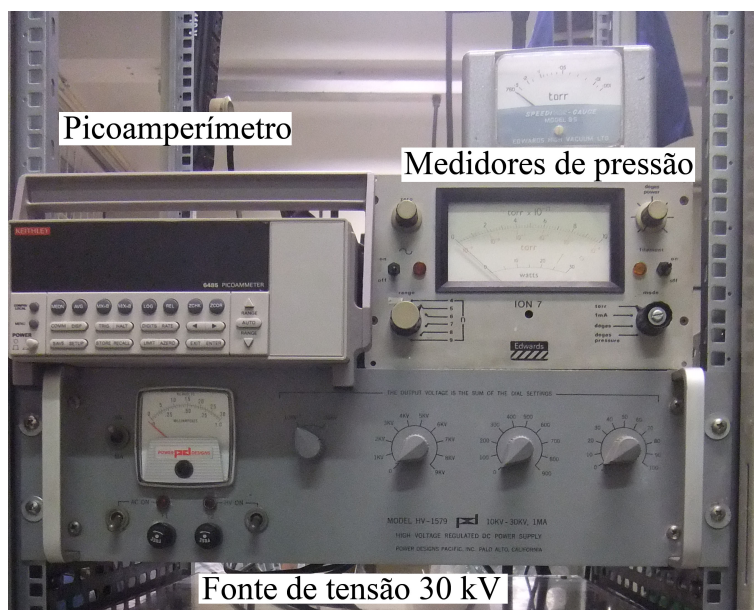


Figura 5.10: Picoamperímetro juntamente com os medidores de pressão e a fonte 30 kV.

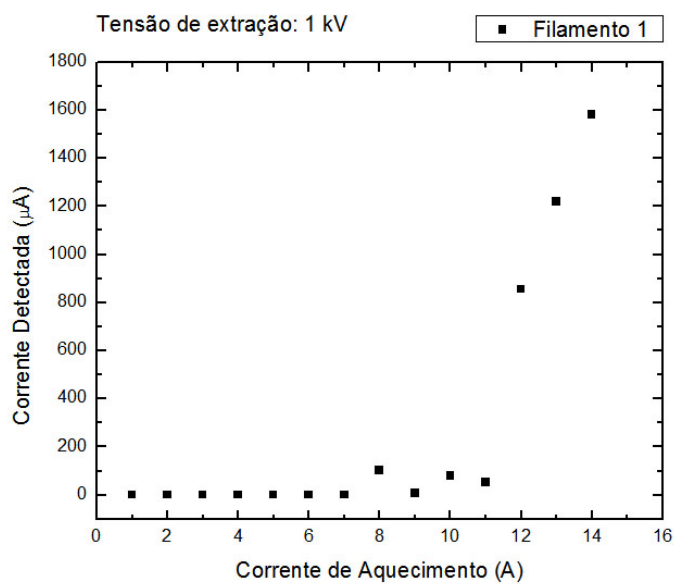


Figura 5.11: Gráfico da Corrente de aquecimento × Corrente detectada para o filamento 1.

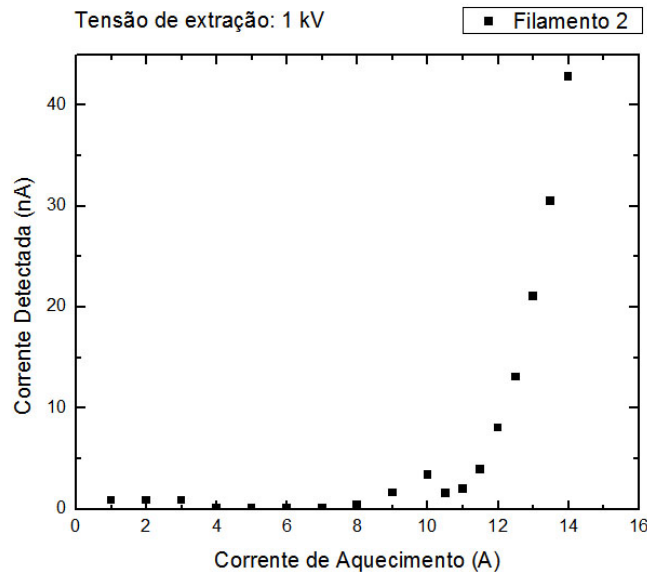


Figura 5.12: Gráfico da Corrente de aquecimento \times Corrente detectada para o filamento 2.

a análise da corrente detectada em função da tensão de extração. Para o filamento 1, os dados obtidos encontram-se na Tabela (A.7).

Repetindo-se o mesmo procedimento para o filamento 2, temos os dados da Tabela (A.8) e o gráfico da Fig. (5.14).

As curvas obtidas por [6] podem ser vistas na Fig. (5.15).

5.4 Estágio de Aceleração e Focalização das Lentes

Nesta seção, serão descritos os dados obtidos com a fonte de 30 kV. Como dito anteriormente, esta fonte é responsável pelo estágio de aceleração dos íons e por fornecer a tensão necessária às lentes.

Nessa primeira medida, a fonte de tensão 30 kV foi utilizada para a aceleração dos íons enquanto que as lentes não foram usadas para a realização das mesmas. Nesse momento, foi utilizada uma voltagem de aceleração de 15 kV. Os dados obtidos se encontram na Tabela A.9 enquanto que o gráfico está ilustrado na Fig.(5.16).

Pelo gráfico, observa-se que a corrente detectada é máxima quando o potencial de extração é de 0,350 kV. Através desses dados, temos uma certa melhora em relação

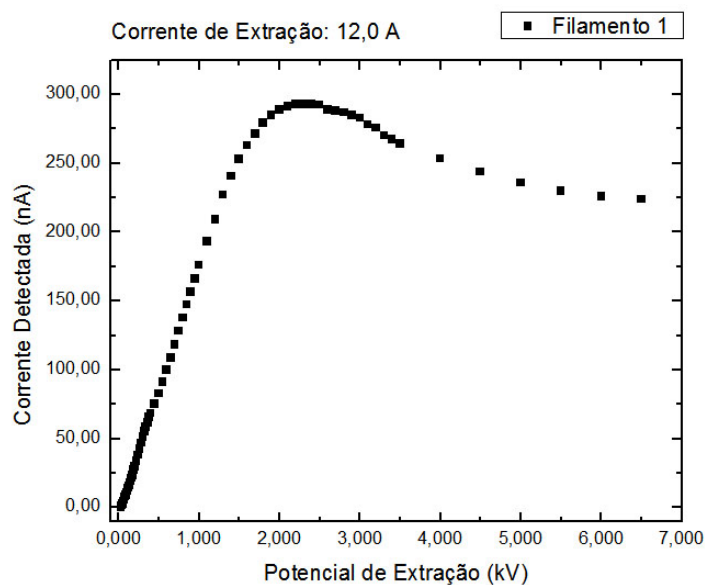


Figura 5.13: Gráfico da tensão de extração × corrente detectada para o filamento 1.

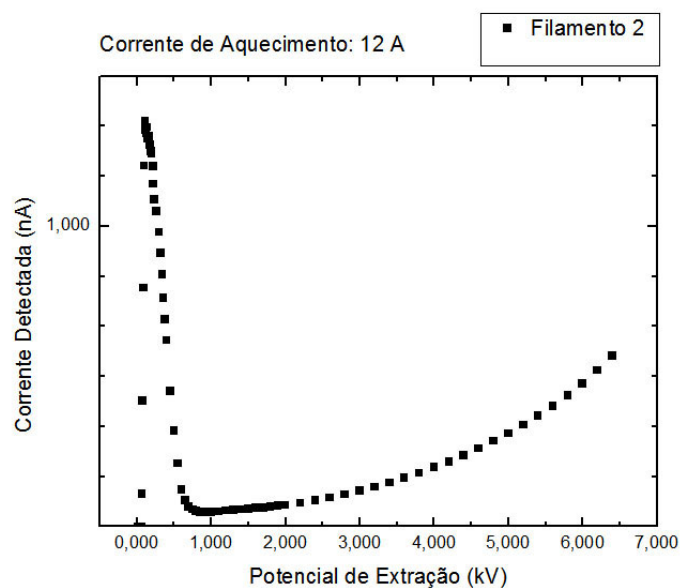


Figura 5.14: Gráfico da tensão de extração × corrente detectada para o filamento 2.

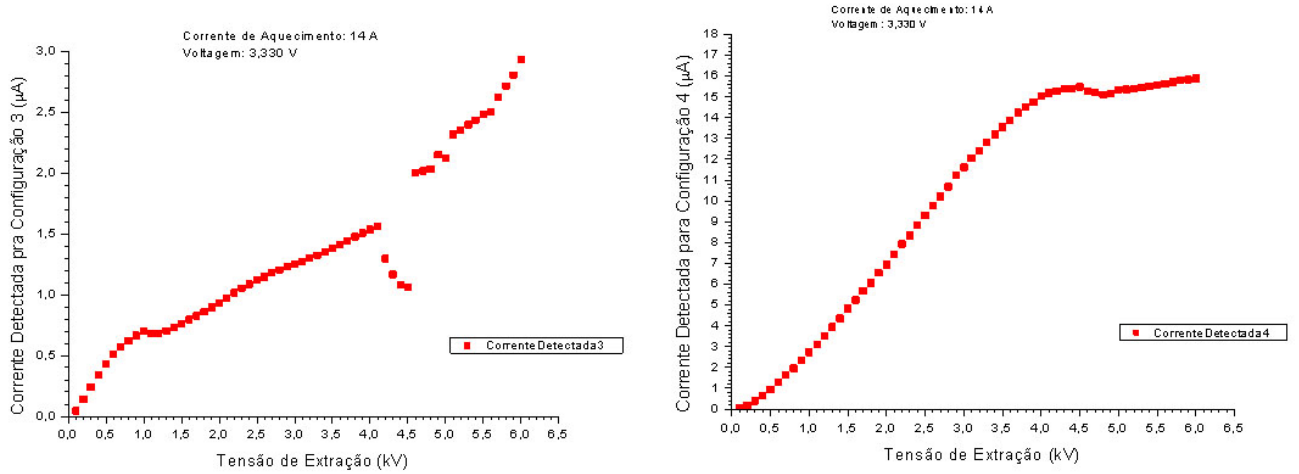


Figura 5.15: Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada encontrada por [6].

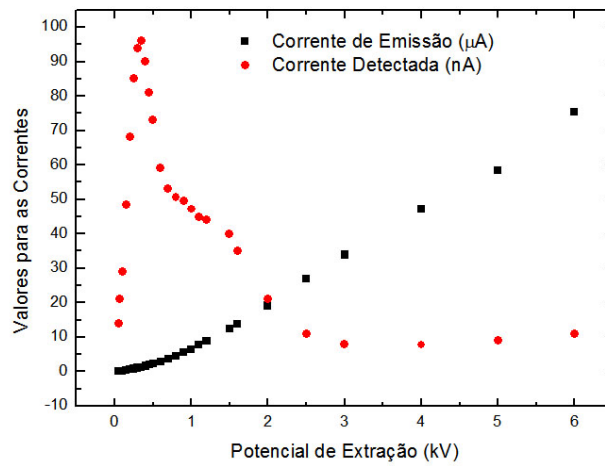


Figura 5.16: Gráfico das correntes de emissão e corrente detectada \times potencial de extração para um potencial de aceleração de 15 kV.

aos dados obtidos sem o estágio de aceleração, porém ainda não são satisfatórios.

Agora, fixando a tensão de extração em 1 kV e a corrente em 13,0 A, varia-se o potencial de aceleração entre 15 kV e 30 kV. Durante toda a medida, a corrente de emissão se manteve fixa em 6,0 μA . Os dados se encontram na Tabela (A.10).

Agora vamos repetir os dados da Tabela (A.9) para uma tensão de aceleração de 30 kV. Os dados se encontram na Tabela (A.11). O gráfico referente aos dados dessa tabela se encontra na Fig. (5.17).

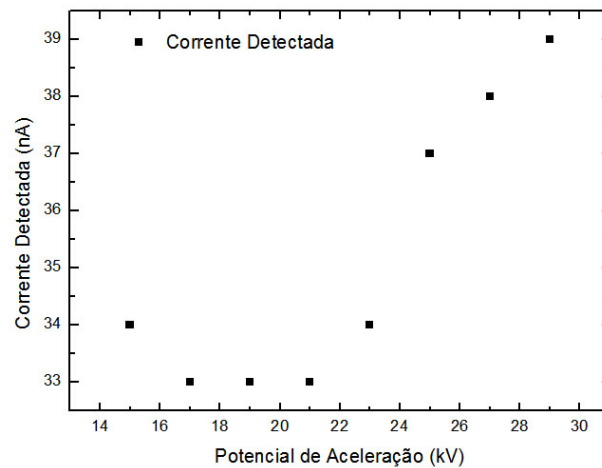


Figura 5.17: Gráfico da corrente detectada \times potencial de aceleração.

Durante a realização das medidas da Tabela (A.11), alguns problemas foram detectados quando era a tensão de aceleração de 30 kV era usada. O *rack* externo não estava devidamente aterrado, o que acarretou no carregamento elétrico do mesmo. Devido a esta falta de aterramento, o *rack* externo descarregava no interno, o que era perigoso para a realização das medidas.

Para a verificação da focalização das lentes, vamos mostrar os dados referentes ao divisor de tensão delas nas diferentes posições, conforme ilustra a Fig. (4.25). Para isso, não será utilizada a fonte 30 kV, devido ao problema já citado anteriormente, e também ao fato de estarmos interessados apenas na variação da corrente detectada em função da voltagem aplicada às lentes.

Como visto na Fig. (4.25), existem 5 posições possíveis para o divisor de tensão. No caso da posição 1, temos que as lentes estão aterradas na fonte, isto é, a tensão aplicada às lentes é a mesma tensão aplicada ao filamento. Como não estamos utilizando a fonte de tensão 30 kV, todos os dados obtidos na seção anterior correspondem ao divisor de tensão estar na posição 1.

Agora realizando as medidas referentes ao divisor de tensão na Posição 2 (Fig. (4.25)). Esta posição significa que a tensão fornecida para a lente é de 25% do valor da tensão de extração ao qual o filamento está submetido. Os dados se encontram na Tabela (A.12). A corrente de aquecimento do filamento foi de 13,0 A durante as medidas.

O gráfico comparativo entre as correntes de emissão e a detectada pode ser visto na Fig. (5.18)

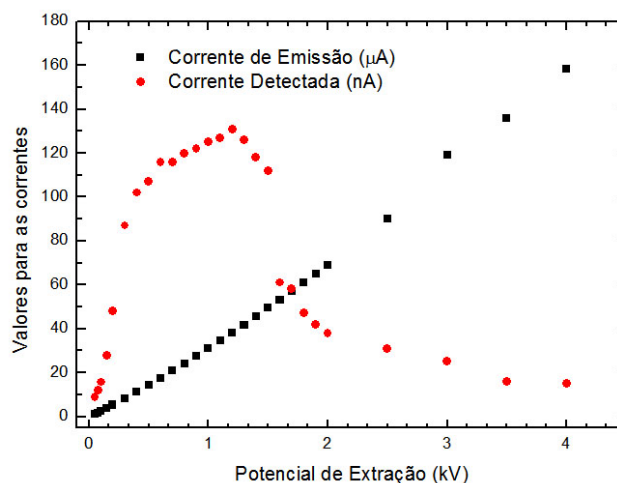


Figura 5.18: Gráfico da tensão de extração × corrente detectada e corrente de emissão para a posição 2.

Agora, repetindo as medidas feitas para o divisor na Posição 1 e reposicionando-o na Posição 3, temos dados se da Tabela (A.14) e cujo gráfico comparativo se encontra na Fig. (5.19).

Podemos observar a partir deste gráfico, que o máximo da corrente detectada é maior com o divisor de tensão na posição 3, isto é, com a tensão aplicada às lentes

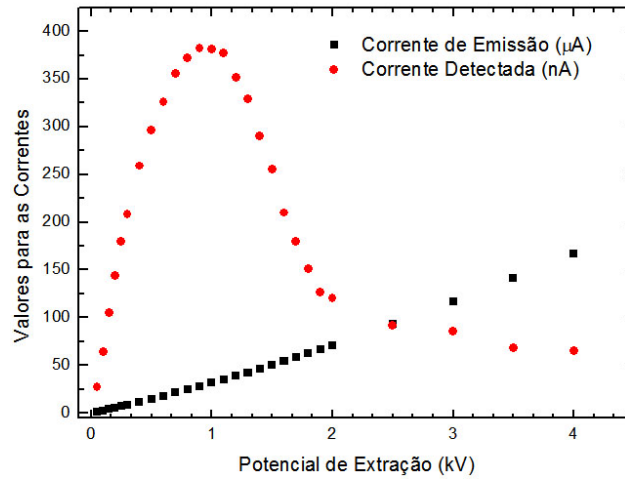


Figura 5.19: Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada e corrente de emissão para a posição 3.

como sendo a metade do valor da tensão de extração, em relação à posição 2.

E, finalmente, o divisor de tensão na posição 4, isto é, a tensão aplicada nas lentes como sendo 75% do valor do potencial de extração aplicado ao filamento. Os dados se encontram na Tabela (A.14) e o gráfico na Fig. (5.20).

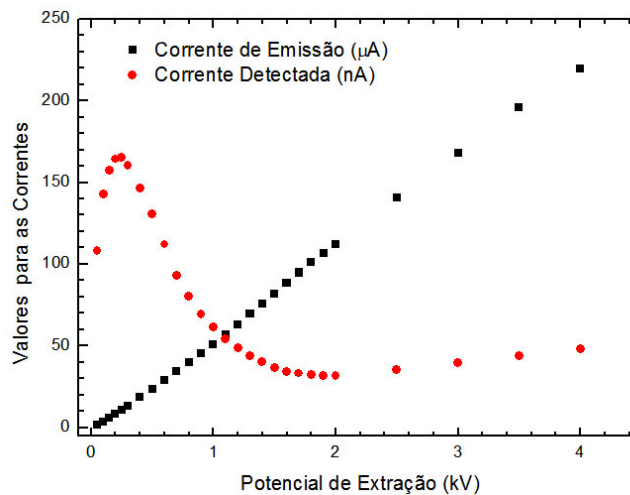


Figura 5.20: Gráfico da tensão de extração \times corrente detectada e corrente de emissão para a posição 4.

Podemos observar que, neste caso, a corrente detectada máxima assume valores bem menores que aqueles com o divisor na posição 3 e valores ligeiramente maiores que os encontrados com o divisor na posição 2.

Para um efeito ilustrativo maior, vamos comparar apenas os valores das correntes detectadas para o divisor de tensão nas posições 2, 3 e 4. O gráfico encontra-se ilustrado na Fig. (5.21).

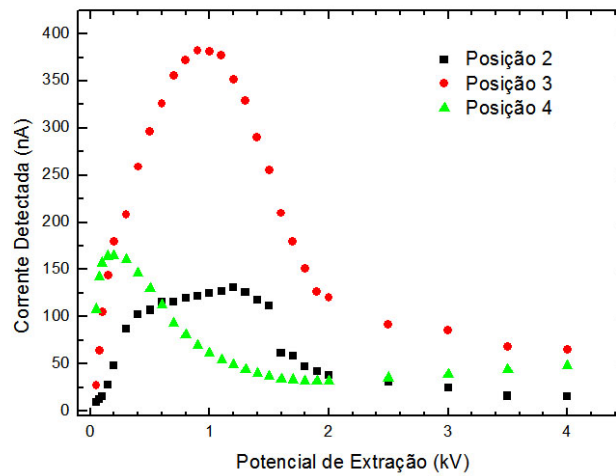


Figura 5.21: Gráfico da tensão de extração \times correntes detectadas com o divisor de tensão nas posições 2, 3 e 4.

Com base no Gráfico da Fig. (5.21), verificamos que a corrente detectada é máxima quando a tensão aplicada às lentes é igual à metade da tensão de extração, o que concorda com a simulação feita com o *software* Simion, feita na Seção 4.6.

Portanto, pode-se dizer que a otimização do acelerador é feita com a tensão de aceleração de 30 kV, a tensão de extração de 5,0 kV e o divisor de tensão das lentes na posição 3.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho descrevemos a etapa da construção do acelerador, que servirá como o aparelho responsável por grande parte da pesquisa realizada no Laboratório de Colisões Atômicas e Ciência de Superfície do DF-UFJF.

Nesta etapa, mostramos a construção do acelerador e todo o mecanismo de emissão, extração, aceleração e focalização dos íons durante todo o processo, desde a emissão no filamento até a detecção.

A mistura formada pelos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptita é capaz de emitir correntes iônicas de intensidade suficiente para os estudos de determinação das seções de choque entre os elementos citados, porém, tais intensidades são insuficientes para os estudos de análises de superfícies. Para isso, seria necessário sintetizar a substância, o que neste momento não foi possível realizar devido aos problemas já citados. Um outro problema encontrado foi o fato de que, após realizarmos as medidas, desligávamos a fonte de corrente e após realizar as alterações necessárias no acelerador para podermos realizar as novas medidas, o filamento se comportava de uma maneira um pouco diferente do que nas medidas anteriores. Para amenizar esse problema estaria no fato de fazermos as alterações no acelerador para as novas medidas com a fonte ligada. Porém, devido às altas tensões utilizadas, isso foi inviável.

Algumas fotos dos filamentos após a realização das medidas podem ser encontradas na Fig. (6.1).

Através desta podemos observar que não há um padrão para a mistura após a realização das medidas. Isso é devido a vários fatores, entre eles, a corrente



Figura 6.1: Filamentos após a realização da medidas.

de aquecimento máxima e o tempo em que essa corrente máxima é aplicada ao filamento. Se tivéssemos conseguido sintetizar a β -eucryptita, talvez não tivéssemos esse problema.

Em relação à emissão da fonte, observamos que à medida que aumentávamos a corrente de aquecimento, a corrente de emissão também aumentava. Este comportamento era esperado, pois quanto maior a corrente de aquecimento, maior é a quantidade de íons emitidos via efeito joule. Porém, tomamos o devido cuidado para não deixar o filamento ser aquecido acima de um certo valor para não danificá-lo. Se utilizássemos um valor muito alto para a corrente, danificando o filamento, certamente não obteríamos nenhum valor de corrente confiável. Para esse estudo, os valores utilizados máximos foram entre 12 A e 14 A. Além deste valor, que foi usado apenas para o estudo da corrente de emissão versus corrente de aquecimento, utilizamos o valor de 12 A para a medida da corrente de emissão versus potencial de extração. Como essas medidas eram mais longas, optamos por utilizar uma corrente de aquecimento menor para que o filamento sofresse o menor dano possível, pois mesmo para valores baixos, o dano do filamento devido ao aquecimento é inevitável.

O circuito elétrico projetado para a realização dos estágios de emissão, extração e aceleração mostrou ser eficaz na execução destes estágios. Porém, devido à alta tensão aplicada ao estágio de aceleração e a falta do aterramento do *rack*

externo, a utilização da tensão máxima para este estágio não foi realizada na forma devida, o que também acarretou numa tensão aplicada às lentes inferior à necessária para o seu funcionamento máximo. Essa tensão, porém, não impediu o estudo da variação da tensão aplicada a elas, permitindo a análise do feixe detectado em função da extração aplicada às lentes.

Em relação ao estudo de focalização das lentes, vimos que com base nas simulações feitas, obtivemos um valor máximo da corrente detectada quando a tensão aplicada às lentes era de metade do valor da tensão de extração, como esperado. Porém, como ainda havia o problema de aterramento, não pudemos observar se realmente o valor da tensão de aceleração de 30 kV acarretaria numa corrente detectada máxima, o que esperamos ser resolvido o mais breve possível.

Em comparação ao trabalho [6], pudemos observar uma alteração significativa em relação à ótica do feixe. Neste trabalho, verificou-se a lei de Child-Langmuir [13], pois neste trabalho não foi considerado o estágio de aceleração e consequentemente o caminho do feixe era menor. Quando colocamos as lentes e o tubo isolante, aumentando o tamanho do acelerador, aumentamos também o percurso percorrido pelo íon. Esse acréscimo na linha acarretou numa divergência maior do feixe em relação a [6]. Porém, essa divergência mostrou ser corrigida com o uso das lentes.

Portanto, vemos que este acelerador já está quase pronto para entrar em total operação, pois a partir deste trabalho encontramos a configuração que otimiza o seu funcionamento. Este acelerador entrando em operação ampliará a linha experimental em Física Atômica no DF-UFJF. Os problemas encontrados durante a realização deste trabalho empenham um esforço que demanda um pouco de tempo, e serão solucionados em breve.

Apêndice A

Tabelas

Neste apêndice encontram-se as tabelas das medidas obtidas com o acelerador.

Tabela A.1: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1 excluindo-se o erro da medida.

Corrente de Aquecimento (A)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente de Emissão (μA) excluído o erro da medida
1,0	0,6	1,0
2,0	0,7	1,1
3,0	0,7	1,1
4,0	0,7	1,1
5,0	0,4	0,8
6,0	0,1	0,5
7,0	-0,4	0
8,0	-0,4	0
9,0	-0,1	0,3
10,0	0,4	0,8
10,5	0,9	1,3
11,0	1,5	1,9
11,5	2,0	2,4
12,0	2,4	2,8
12,5	2,6	3,0
13,0	3,0	3,4
13,5	3,4	3,8
14,0	3,7	4,1

Tabela A.2: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)
0,030	-0,6	0,850	1,3
0,040	-0,6	0,900	1,4
0,050	-0,6	0,950	1,6
0,060	-0,6	1,000	1,8
0,070	-0,6	1,100	2,0
0,080	-0,5	1,200	2,3
0,090	-0,5	1,300	2,6
0,100	-0,5	1,400	2,8
0,110	-0,5	1,500	3,1
0,120	-0,5	1,600	3,4
0,130	-0,5	1,700	3,7
0,140	-0,4	1,800	4,1
0,150	-1,4	1,900	4,4
0,160	-0,4	2,000	4,7
0,170	-0,4	2,100	5,0
0,180	-0,4	2,200	5,3
0,190	-0,4	2,300	5,6
0,200	-0,4	2,400	5,9
0,220	-0,4	2,500	6,3
0,240	-0,3	2,600	6,6
0,260	-0,3	2,700	7,0
0,280	-0,3	2,800	7,4
0,300	-0,2	2,900	7,7
0,320	-0,1	3,000	8,0
0,340	-0,1	3,100	8,3
0,360	-0,1	3,200	8,6
0,380	0,1	3,300	9,0
0,400	0,1	3,400	9,2
0,450	0,2	3,500	9,5
0,500	0,3	4,000	11,1
0,550	0,5	4,500	12,6
0,600	0,6	5,000	14,0
0,650	0,8	5,500	15,6
0,700	0,9	6,000	17,1
0,750	1,0	6,500	18,7
0,800	1,2		

Tabela A.3: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1 excluindo-se o erro da medida.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)
0,030	0	0,850	1,9
0,040	0	0,900	2,0
0,050	0	0,950	2,2
0,060	0	1,000	2,4
0,070	0	1,100	2,6
0,080	0,1	1,200	2,9
0,090	0,1	1,300	3,2
0,100	0,1	1,400	3,4
0,110	0,1	1,500	3,7
0,120	0,1	1,600	4,0
0,130	0,1	1,700	4,3
0,140	0,2	1,800	4,7
0,150	0,2	1,900	5,0
0,160	0,2	2,000	5,3
0,170	0,2	2,100	5,6
0,180	0,2	2,200	5,9
0,190	0,2	2,300	6,2
0,200	0,2	2,400	6,5
0,220	0,2	2,500	6,9
0,240	0,3	2,600	7,2
0,260	0,3	2,700	7,6
0,280	0,3	2,800	8,0
0,300	0,4	2,900	8,3
0,320	0,5	3,000	8,6
0,340	0,5	3,100	8,9
0,360	0,5	3,200	9,2
0,380	0,7	3,300	9,6
0,400	0,7	3,400	9,8
0,450	0,8	3,500	10,1
0,500	0,9	4,000	11,7
0,550	1,1	4,500	13,2
0,600	1,2	5,000	14,6
0,650	1,4	5,500	16,2
0,700	1,5	6,000	17,7
0,750	1,6	6,500	19,3
0,800	1,8		

Tabela A.4: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 3 excluindo-se o erro da medida.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente de Emissão (μA) excluído o erro	Potencial de Extração	Corrente de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA) excluído o erro
0,010	-0,5	0	0,800	0,8	1,3
0,020	-0,5	0	0,850	1,0	1,5
0,030	-0,5	0	0,900	1,1	1,6
0,040	-0,5	0	0,950	1,3	1,8
0,050	-0,5	0	1,000	1,5	2,0
0,060	-0,5	0	1,100	1,9	2,4
0,070	-0,5	0	1,200	2,3	2,8
0,080	-0,5	0	1,300	2,7	3,2
0,090	-0,5	0	1,400	3,2	3,7
0,100	-0,5	0	1,500	3,7	4,2
0,110	-0,5	0	1,600	4,3	4,8
0,120	-0,5	0	1,700	4,9	5,4
0,130	-0,5	0	1,800	5,4	5,9
0,140	-0,4	0,1	1,900	6,1	6,6
0,150	-0,4	0,1	2,000	6,7	7,2
0,160	-0,4	0,1	2,200	8,0	8,5
0,170	-0,4	0,1	2,400	9,3	9,8
0,180	-0,4	0,1	2,600	10,8	11,3
0,190	-0,4	0,1	2,800	12,3	12,8
0,200	-0,4	0,1	3,000	14,0	14,5
0,220	-0,3	0,1	3,200	15,4	15,9
0,240	-0,4	0,1	3,400	17,1	17,6
0,260	-0,3	0,2	3,600	18,8	19,3
0,280	-0,3	0,2	3,800	20,5	21,0
0,300	-0,3	0,2	4,000	22,3	22,8
0,320	-0,2	0,3	4,200	23,9	24,4
0,340	-0,2	0,3	4,400	25,9	26,4
0,360	-0,2	0,3	4,600	27,9	28,4
0,380	-0,1	0,4	4,800	30,1	30,6
0,400	-0,1	0,4	5,000	32,4	32,9
0,450	0	0,5	5,200	34,8	35,3
0,500	0,1	0,6	5,400	37,4	37,9
0,550	0,2	0,7	5,600	40,2	40,7
0,600	0,3	0,8	5,800	43,1	43,6
0,650	0,4	0,9	6,000	46,1	46,6
0,700	0,6	1,0	6,200	49,3	49,8
0,750	0,7	1,2	6,400	52,6	53,1

Tabela A.5: Corrente detectada *versus* corrente de aquecimento para o filamento 1.

Corrente de Aquecimento (A)	Corrente de Emissão (μA)
1	0,70
2	0,63
3	0,60
4	0,60
5	0,70
6	0,75
7	0,75
8	101,40
9	7,70
10	81,03
11	51,86
12	855,20
13	1219,17
14	6,0

Tabela A.6: Corrente detectada *versus* corrente de aquecimento para o filamento 2.

Corrente de Aquecimento (A)	Corrente de Detectada (nA)
1,0	0,90
2,0	0,90
3,0	0,90
4,0	0,11
5,0	0,12
6,0	0,13
7,0	0,14
8,0	0,46
9,0	1,63
10,0	3,40
10,5	1,62
11,0	2,00
11,5	3,91
12,0	8,07
12,5	13,1
13,0	21,1
13,5	30,5
14,0	42,8

Tabela A.7: Tensão de extração *versus* tensão de extração para o filamento 1.

Potencial de Extração (kV)	Corrente Detectada (nA)	Potencial de Extração (kV)	Corrente Detectada (nA)
0,030	0,50	0,850	147,30
0,040	1,49	0,900	156,60
0,050	2,76	0,950	165,90
0,060	4,38	1,000	176,00
0,070	6,00	1,100	193,00
0,080	7,73	1,200	209,10
0,090	9,11	1,300	227,20
0,100	10,98	1,400	240,70
0,110	12,35	1,500	253,10
0,120	14,18	1,600	263,00
0,130	15,83	1,700	271,50
0,140	17,74	1,800	279,40
0,150	19,24	1,900	285,00
0,160	21,49	2,000	289,00
0,170	23,35	2,100	291,30
0,180	25,26	2,200	293,00
0,190	27,55	2,300	293,00
0,200	29,70	2,400	293,00
0,220	33,70	2,500	292,50
0,240	38,09	2,600	289,00
0,260	42,55	2,700	288,30
0,280	46,90	2,800	287,00
0,300	51,30	2,900	285,00
0,320	55,05	3,000	283,00
0,340	58,52	3,100	278,30
0,360	61,92	3,200	275,90
0,380	65,37	3,300	270,30
0,400	68,32	3,400	267,30
0,450	75,29	3,500	264,00
0,500	82,69	4,000	253,30
0,550	91,21	4,500	244,00
0,600	99,76	5,000	236,00
0,650	108,93	5,500	230,00
0,700	118,04	6,000	226,00
0,750	128,26	6,500	224,00
0,800	137,75		

Tabela A.8: Corrente de aquecimento *versus* tensão de extração para o filamento 2.

Potencial de Extração (kV)	Corrente Detectada (nA)	Potencial de Extração	Corrente Detectada (nA)
0,010	0	0,800	0,051
0,020	0	0,850	0,048
0,030	0	0,900	0,046
0,040	0	0,950	0,046
0,050	0	1,000	0,047
0,060	0	1,100	0,049
0,070	0,109	1,200	0,052
0,080	0,418	1,300	0,055
0,090	0,794	1,400	0,057
0,100	1,201	1,500	0,059
0,110	1,350	1,600	0,061
0,120	1,320	1,700	0,062
0,130	1,310	1,800	0,065
0,140	1,330	1,900	0,068
0,150	1,290	2,000	0,071
0,160	1,300	2,200	0,078
0,170	1,290	2,400	0,086
0,180	1,270	2,600	0,096
0,190	1,250	2,800	0,1106
0,200	1,240	3,000	0,119
0,220	1,200	3,200	0,131
0,240	1,140	3,400	0,145
0,260	1,090	3,600	0,161
0,280	1,050	3,800	0,178
0,300	0,980	4,000	0,196
0,320	0,910	4,200	0,215
0,340	0,840	4,400	0,236
0,360	0,760	4,600	0,259
0,380	0,690	4,800	0,285
0,400	0,620	5,000	0,309
0,450	0,450	5,200	0,338
0,500	0,318	5,400	0,369
0,550	0,210	5,600	0,401
0,600	0,123	5,800	0,437
0,650	0,086	6,000	0,475
0,700	0,066	6,200	0,520
0,750	0,057	6,400	0,567

Tabela A.9: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 3 excluindo-se o erro da medida.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente detetctada (nA)
0,050	0,3	14,0
0,070	-0,3	21,0
0,100	-0,1	29,0
0,150	0,1	48,5
0,200	0,3	68,0
0,250	0,5	85,0
0,300	0,8	94,0
0,350	1,0	96,0
0,400	1,3	90,0
0,450	1,6	81,0
0,500	1,9	73,0
0,600	2,6	59,0
0,700	3,4	53,0
0,800	4,2	50,5
0,900	5,3	49,5
1,000	6,2	47,2
1,100	7,4	45,0
1,200	8,6	44,0
1,500	12,2	40,0
1,600	13,5	35,0
2,000	18,8	21,0
2,500	26,6	10,8
3,000	33,6	8,0
4,000	47,0	7,8
5,000	58,0	9,0
6,000	75,0	10,9

Tabela A.10: Corrente detectada *versus* tensão de aceleração.

Tensão de aceleração (kV)	Corrente de Detectada (nA)
15	34
17	33
19	33
21	33
23	34
25	37
27	38
29	39

Tabela A.11: Corrente de emissão *versus* corrente de aquecimento para o filamento 3 excluindo-se o erro da medida.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente detectada (nA)
0,050	-0,3	17,8
0,070	-0,2	28,0
0,100	-0,1	37,0
0,150	0,1	59,0
0,200	0,3	82,0
0,250	0,5	102
0,300	0,8	112
0,350	1,0	112
0,400	1,3	106
0,450	1,5	92,0
0,500	1,9	80,0
0,600	2,6	70,0
0,700	3,3	62,0
0,800	4,2	52,0
0,900	5,1	46,0
1,000	6,1	43,0
1,500	12,0	38,0
2,000	18,0	35,0
3,000	32,0	25,0
4,000	47,0	10,0
5,000	61,5	9,5
6,000	78,0	12,0

Tabela A.12: Corrente detectada em função da tensão de extração com o divisor de tensão na Posição 2.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente detectada (nA)
0,050	1,0	8,9
0,075	1,8	12,0
0,100	2,4	15,7
0,150	3,9	28,0
0,200	5,3	48,0
0,300	8,3	87,0
0,400	11,4	102,0
0,500	14,4	107,0
0,600	17,6	116,0
0,700	20,8	116,0
0,800	24,2	120,0
0,900	27,5	122,0
1,000	31,0	125,0
1,100	34,6	127,0
1,200	38,1	131,0
1,300	41,8	126,0
1,400	45,6	118,0
1,500	49,6	112,0
1,600	53,1	61,0
1,700	57,0	58,0
1,800	61,0	47,0
1,900	65,0	42,0
2,000	69,0	38,0
2,500	90,1	31,0
3,000	119,0	25,0
3,500	135,8	16,0
4,000	158,3	15,0

Tabela A.13: Corrente detectada em função da tensão de extração com o divisor de tensão na Posição 3.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente detectada (nA)
0,050	1,1	27,6
0,100	2,5	64,0
0,150	3,9	105,0
0,200	5,4	144,0
0,250	6,9	180,0
0,300	8,5	208,0
0,400	11,5	259,0
0,500	14,5	296,0
0,600	17,8	326,0
0,700	21,1	356,0
0,800	24,5	372,0
0,900	27,9	382,0
1,000	31,6	381,0
1,100	35,1	377,0
1,200	38,9	352,0
1,300	42,5	329,0
1,400	46,3	290,0
1,500	50,1	255,0
1,600	54,3	210,0
1,700	58,5	180,0
1,800	62,1	151,0
1,900	66,5	126,0
2,000	70,7	120,0
2,500	93,0	92,0
3,000	116,6	85,0
3,500	141,1	68,0
4,000	167,1	65,0

Tabela A.14: Corrente detectada em função da tensão de extração com o divisor de tensão na Posição 4.

Potencial de Extração (kV)	Corrente de Emissão (μA)	Corrente detectada (nA)
0,050	1,6	108,1
0,100	3,6	142,7
0,150	5,8	157,1
0,200	8,1	164,3
0,250	10,5	165,0
0,300	13,0	160,4
0,400	18,4	146,1
0,500	23,6	130,4
0,600	29,0	112,1
0,700	34,4	93,0
0,800	39,9	80,4
0,900	45,4	69,5
1,000	50,9	61,3
1,100	57,0	54,3
1,200	62,8	48,8
1,300	69,5	43,7
1,400	75,6	40,1
1,500	81,9	36,6
1,600	88,5	34,2
1,700	94,8	32,2
1,800	101,0	32,1
1,900	106,9	31,7
2,000	112,0	31,7
2,500	140,5	35,3
3,000	167,7	39,3
3,500	195,6	43,1
4,000	219,8	48,1

Bibliografia

- [1] Nobel Prize. Accelerators and nobel laureates. 2012.
- [2] J. D. Jackson. *Classical Eletrodynamics*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [3] A. C. F. Santos. *Ótica de Partículas Carregadas*, 2008.
- [4] J. P. Buchet M. Lambert, J. P. Thomas. Adaptation of an alkali metal ion source on a low-energy vdg-type electrostatic accelerator. *Inst. Conf. Ser. 38, Chapter 2*, 1978.
- [5] S. G. S. Filho. *Eletrônica Experimental*. EPUSP, 1 edition, 1999.
- [6] R. O. Taligliatti. *Implantação de uma Linha de Colisões Atômicas e Estudos de Emissão, Focalização e Detecção de Íons Positivos Provenientes de uma Mistura de Carbonato de Lítio, Óxido de Alumínio e Sílica*. UFJF, 2011.
- [7] F. Laloë C. Cohen-Tannoudji, B. Diu. *Quantum Mechanics*. John Wiley & Sons, 1977.
- [8] D. Bohm. *Quantum Theory*. Dover Publication, INC, 1989.
- [9] H. M. Nussenzveig. *Curso de Física Básica, Vol. 1 e 3*. Edgar Blücher Ltda., 2008.
- [10] David A. Dahl. *Simion 3D Version 7.0 User's Manual*. Bechtel Bwxt Idaho, LLC, 2000.
- [11] C. V. Aquino N. P. A. Junior. *Eletromagnetismo I*. UNESP, 2005.
- [12] J. M. Pereira N. Ferreira R. R. Pinho A. C. F. Santos V. Ovalle, D. R. Otomar. *Eur. J. Physics*, 2008.

- [13] R. M. Oliveira H. Iguchi J. Fujita K. Kadota. M. Ueda, R. R. Silva. A comparison of the Li^+ -emission properties of pasty, liquid and glassy β -eucryptite ion sources. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 1927.
- [14] J. L. Hundlei. *Phys. Ver.* 30, 1927.
- [15] K. T. Bainbridge and J. Franklin. 1932.
- [16] J. P. Blewett and E. L. Jones. Filament sources of positive ions. *Physical Review A*, 1936.
- [17] H. Iguchi J. Fujita K. Kadota M. Ueda, R. R. Silva. *Fusion Engeneering Design*, 1997.
- [18] W. P. West D. M. THomas. *Review Scientific Instruments*, 1988.
- [19] H. Knopp S. Schippers A. Muller W. Shi, J. Jacobi. *XXIII International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions*, 2003.
- [20] G. D. Alton. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1993.
- [21] B. H. Mahan. *University Chemistry*. Addison-Wesley Publishing Inc., 2 edition, 1972.
- [22] W. Schmidt. *Materiais Elétricos*. Edgar Blücher Ltda., 3 edition, 2010.
- [23] J. P. Blewett and E. L. Jones. *Physical review a. Filament Sources of Positive Ions*, 1936.
- [24] *McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.