

Universidade Federal de Juiz de Fora

Instituto de Ciências Exatas

Departamento de Física

Raphael Taligliatt de Oliveira

**IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE COLISÕES ATÔMICAS E
ESTUDOS DE EMISSÃO, FOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE ÍONS
POSITIVOS PROVENIENTES DA MISTURA DE Li_2CO_3 , SiO_2 E
 Al_2O_3**

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Souza Melo

Juiz de Fora, 2011

RAPHAEL TALIGLIATT DE OLIVEIRA

IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE COLISÕES ATÔMICAS E ESTUDOS DE EMISSÃO, FOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE ÍONS POSITIVOS PROVENIENTES DA MISTURA DE Li_2CO_3 , SiO_2 E Al_2O_3

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de pós – graduação em Física do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF - como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Souza Melo

Juiz de Fora, 2011

Raphael Taligliatt de Oliveira

IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE COLISÕES ATÔMICAS E ESTUDOS DE EMISSÃO, FOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE ÍONS POSITIVOS PROVENIENTES DA MISTURA DE Li_2CO_3 , SiO_2 E Al_2O_3

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de pós – graduação em Física do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF - como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em 29 de Julho de 2011

BANCA EXAMINADORA

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

Prof^ª. Dra. Giovana Trevisan Nogueira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Antônio Carlos Fontes dos Santos
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 2011

“Labor Improbis Omnia Vincit”

Virgilio, poeta clásico romano 70 aC – 19 aC

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson de Souza Melo, pela confiança depositada em mim ao me aceitar como membro da equipe do CACiS e ao me delegar importantes funções neste laboratório. Pela constante disposição em me ensinar e pelas inúmeras oportunidades de crescimento acadêmico.

Ao Prof. Dr. Fábio Zappa, que sempre se mostrou disposto a elucidar as minhas diversas dúvidas referente às dificuldades técnicas e conceituais. O Prof. Dr. Fabio Zappa foi elemento crucial na efetivação deste trabalho.

A Prof^ª. Dra. Maria Cristina Andreolli, com a qual tive oportunidade de estudar a Mecânica Quântica e Física Atômica e Molecular e que sempre se mostrou muito interessada no trabalho de nossa equipe.

Aos professores e a comissão de Pós Graduação da UFJF.

Aos demais professores do Departamento de Física da UFJF pela minha formação e conhecimentos adquiridos.

Ao secretário da Pós-Graduação Domingos Lopes pela eficiência e disposição em ajudar.

Aos órgãos financiadores do projeto, FAPEMIG e CAPES.

Ao amigo Thiago Mendes Rodrigues e demais colegas do CACiS, pela colaboração, conversas, apoio e amizade.

Ao Fernando Dilly Almeida da Oficina Mecânica, pela sua habilidade, disposição e boa vontade em nos ajudar.

Ao meu pai Luiz Carlos de Oliveira que sempre me ajudou em todas as intempéries da minha vida.

Ao meu avô Vicente de Oliveira (†) e minha avó Inês de Souza Oliveira que me acolheram em seu lar a fim de proporcionar melhores condições de estudo e trabalho para mim.

A Fernanda Thess Taroco e sua mãe Maria do Carmo Taroco, pelo amor, carinho, companheirismo e incentivo de todas as horas.

Ao Paulo Roberto Rezende, grande amigo que sempre esteve presente em momentos bons e ruins.

A Universidade Federal de Juiz de Fora.

Resumo

Com o objetivo de estabelecer uma linha de pesquisa experimental em Colisões Atômicas (estudo de colisões íon/átomo, molécula) e Física de Superfície (implantação de técnicas de análise de superfície através do impacto de íons) no Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora, está sendo construído um acelerador linear eletrostático de baixa energia. Esta máquina é composta basicamente por uma fonte termoiônica de íons positivos de Li, um estágio de extração e um estágio de aceleração dos mesmos. Neste trabalho, apresentaremos as características da fonte termoiônica, a montagem do circuito elétrico que permite a execução dos estágios de emissão e extração, a montagem dos sistemas de vácuo e detecção e as medições concernentes à emissão da fonte termoiônica, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica com o objetivo de encontrar a configuração que otimiza o funcionamento deste aparato.

Palavras – chave: Física Atômica. Acelerador. Colisões.

Abstract

In order to establish an experimental research line on Atomic Collisions (study of ion/atom, molecule scattering) and Surface Physics (implantation of techniques of surface analysis by impact of ions) at the Physics Department of the Federal University of Juiz de Fora, we are building an electrostatic linear accelerator of low energy. This apparatus is basically composed by a thermionic ion source of Li positive ions, an extraction stage and an acceleration stage of them. In this work, we will present the thermionic source characteristics, the electric circuit set up which allows the performance of emission, extraction and acceleration stages, the vacuum and detection systems set up and the measurements concerning thermionic source emission, extracted beam focalization and ion current detection, in order to find the configuration which optimizes the functionality of this apparatus.

Keywords: Atomic Physics. Accelerator. Collisions.

Lista de Ilustrações

2.1	Partícula carregada em campo elétrico estático não uniforme.....	6
2.2	Efeito de focalização produzido por um arranjo particular de lentes ópticas sobre um feixe de luz monocromático.....	9
2.3	Simulação do efeito de focalização produzido por uma lente eletrostática sobre um feixe de partículas carregadas.....	9
3.1	Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo impacto eletrônico.....	11
3.2	Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo ionização de superfície.....	11
3.3	Compostos preparados e testados por Blewett e Jones em ordem decrescente de emissividade.....	12
3.4	Corrente extraída versus voltagem aplicada para diferentes temperaturas do filamento emissivo obtida por Lambert et al.....	13
3.5	Esquema e dimensões da estrutura interna da fonte de íons.....	17
3.6	Foto da estrutura interna da fonte de íons.....	17
3.7	Esquema do arranjo espacial do par de eletrodos cônicos responsável pela extração dos íons emitidos pelo filamento emissivo.....	18
3.8	Cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termoiônica (primeiro eletrodo do sistema de extração).....	18
3.9	Vista (a) superior e (b) lateral da estrutura metálica que contém o segundo eletrodo do sistema de extração.....	19
3.10	Cilindro metálico de conexão para a montagem do sistema de extração.....	19
3.11	Visão (a) expandida e (b) compacta da fonte de íons.....	19
3.12	Porção superior do filamento emissivo localizado imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração.....	20
3.13	Porção superior do filamento emissivo localizado um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração.....	21
4.1	Circuito elétrico de estabelecimento da corrente elétrica para o aquecimento do filamento emissivo e das diferenças de potencial associadas aos estágios de extração e aceleração dos íons.....	22
4.2	Diferenças de potencial às quais os íons estão submetidos nos processos de extração e aceleração.....	23

4.3	Esquema típico de um transformador.....	24
4.4	Esquema de um transformador de isolamento e sua representação em diagramas de circuitos elétricos.....	26
4.5	Transformadores de isolamento A e B utilizados no acelerador.....	27
4.6	Diagrama de blocos de uma fonte de tensão regulada.....	27
4.7	Fontes de tensão para os estágios de (a) aceleração, (b) extração e (c) fonte de corrente para o aquecimento do filamento emissivo.....	29
4.8	Rack interno.....	31
4.9	Detalhes do isolamento do rack interno.....	31
4.10	Rack externo.....	32
4.11	Cilindros de PVC para os ajustes de tensão e corrente.....	32
4.12	Gaiola de proteção.....	32
4.13	Ligações elétricas envolvendo os transformadores de isolamento, o filtro de linha e a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.....	33
4.14	Detalhes das ligações elétricas no conector – barra envolvendo o transformador de isolamento B, a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e a fonte de corrente.....	34
4.15	Ligações elétricas envolvendo o transformador de isolamento B, a fonte de tensão de 0 - 6,5 kV e a fonte de corrente no interior do rack interno.....	35
4.16	Teste inicial de verificação do funcionamento da fonte de corrente.....	37
4.17	Fontes de tensão e de corrente em funcionamento.....	38
4.18	Visão panorâmica dos racks interno e externo, do rack comercial de 19 polegadas e dos equipamentos eletrônicos.....	38
4.19	Circuito de emissão e extração dos íons positivamente carregados provenientes do filamento emissivo aquecido.....	40
4.20	Sentido da corrente de emissão iônica e das correntes eletrônicas devidas ao aterramento dos lados esquerdo e direito do circuito.....	41
5.1	Sistemas de vácuo e detecção.....	44
5.2	Estrutura constituída pela fonte termoiônica e pelos sistemas de vácuo e detecção...45	45
5.3	Flange construído para a adaptação da fonte termoiônica.....	45
5.4	Fonte termoiônica conectada à câmara de detecção.....	46
5.5	Flange para conexão da câmara de detecção ao sistema de vácuo.....	46

5.6	Disco metálico para conexão do sensor do medidor de pressão Bayard – Alpert à câmara de detecção.....	47
5.7	Sensor do medidor Bayard – Alpert conectado à câmara de detecção.....	47
5.8	Esquema de uma bomba mecânica de palhetas rotativas.....	49
5.9	Esquema de funcionamento de uma bomba mecânica de palhetas rotativas.....	50
5.10	Bomba mecânica de palhetas rotativas utilizada no sistema de vácuo do acelerador..	50
5.11	Estrutura e funcionamento de uma bomba difusora.....	51
5.12	Esquema de bomba difusora fracionadora com acessórios de condensação.....	52
5.13	Bomba difusora fracionadora utilizada no sistema de vácuo do acelerador.....	53
5.14	Acessórios condensadores utilizados no sistema de vácuo do acelerador.....	54
5.15	Sensor do medidor de pressão Pirani.....	55
5.16	Sensor do medidor de pressão Bayard – Alpert.....	56
5.17	Escalas dos medidores Pirani e Bayard – Alpert.....	57
5.18	Flange com passador elétrico fixo e anteparo A conectado para os estudos de focalização do feixe e detecção da corrente iônica.....	58
5.19	Flange (a) de adaptação e conjunto (b) formado pelos dois flanges do sistema de detecção com o anteparo B conectado.....	58
5.20	Painéis (a) frontal e (b) traseiro do picoamperímetro utilizado na medição da corrente iônica detectada.....	59
5.21	Sistema de detecção conectado à porta direita da câmara de detecção.....	59
6.1	Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo para os filamentos 1 e 2 com tensão de extração fixa em 1 kV.....	63
6.2	Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica para o filamento 1 em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração	65
6.3	Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica para o filamento 2 em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração	65
6.4	Distribuição das superfícies equipotenciais para a geometria na qual a porção superior do filamento emissivo está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração.....	67

6.5	Distribuição das superfícies equipotenciais para a geometria na qual a porção superior do filamento emissivo está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração.....	67
6.6	Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para as configurações 1 e 2.....	70
6.7	Simulações para a particular geometria do sistema de extração com os seguintes valores de diferença de potencial aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração: a) 100 V, b) 1100 V, c) 3100 V, d) 5500 V.....	71
6.8	Mancha resultante do grande número de íons que colidiram com a periferia da abertura central do segundo eletrodo do sistema de extração.....	72
6.9	Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para a configuração 3.....	74
6.10	Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para a configuração 4.....	74
6.11	Simulações para a particular geometria do sistema de extração com os seguintes valores de diferença de potencial aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração: a) 110 V, b) 1100 V, c) 3100 V, d) 5500 V.....	75
6.12	Manchas (resultantes das colisões entre os íons positivos e o sistema de detecção) difundidas sobre os anteparos A e B utilizados e sobre a face interna do flange de adaptação.....	76
6.13	Aspecto físico da substância emissiva após a realização das medições.....	78

Lista de Tabelas

3.1	Compostos e massas atômicas e moleculares envolvidos na síntese do composto Li- β -eucryptite.....	15
4.1	Especificações dos filtros de linha utilizados.....	24
4.2	Dados técnicos da fonte de tensão de 30 kV.....	28
4.3	Dados técnicos da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.....	28
4.4	Dados técnicos da fonte de corrente.....	29
4.5	Resumo de todas as conexões elétricas realizadas.....	36
6.1	Correspondência entre corrente de aquecimento do filamento emissivo e corrente de emissão da fonte termoiônica para dois filamentos igualmente confeccionados e tensão de extração fixa em 1 kV.....	63

Índice

1	Introdução	1
2	Comportamento de Partículas Carregadas em Campos Eletrostáticos	5
3	Fonte Termoiônica de Íons Positivos	10
3.1	Características da Substância Emissiva Li- β -eucryptite.....	12
3.2	A Confeção do Filamento Emissivo.....	14
3.3	Descrição da Fonte Termoiônica.....	16
3.4	Adaptação do Filamento Emissivo ao Sistema de Extração.....	20
4	Componentes Eletrônicos e Circuito de Emissão, Extração e Aceleração	22
4.1	Componentes Eletrônicos e Mecânicos.....	23
4.1.1	Filtros de Linha.....	23
4.1.2	Transformadores.....	24
4.1.3	Fontes de Tensão e de Corrente.....	27
4.1.4	Racks.....	29
4.2	Circuito Elétrico.....	33
4.3	Primeiros Testes de Funcionamento das Fontes e do Estabelecimento das Diferenças de Potencial.....	37
4.4	Circuito de Emissão/Extração e Leitura da Corrente de Emissão.....	39
5	Sistemas de Vácuo e Detecção do Feixe	42
5.1	Sistema de Vácuo e Câmara de Detecção.....	42
5.1.1	Bombas de Vácuo.....	48
5.1.1.1	Bomba Mecânica de Palhetas Rotativas (Duplo Estágio).....	48
5.1.1.2	Bomba Difusora Fracionadora e Acessórios.....	50
5.1.2	Medidores de Pressão.....	54
5.1.2.1	Medidor Pirani.....	55
5.1.2.2	Medidor Bayard – Alpert.....	56
5.2	Sistema de Detecção.....	57

5.3	Aspectos Gerais Concernentes ao Funcionamento do Sistema de Vácuo e à Obtenção de Valores de Pressão Pertencentes à Faixa de Alto Vácuo.....	60
6	Resultados e Discussões.....	61
6.1	Procedimentos de Pré – Operação.....	61
6.2	Emissão da Fonte Termoiônica.....	62
6.3	Focalização do Feixe Extraído e Detecção da Corrente Iônica.....	66
6.4	Análise dos Resultados e Discussões Correlatas.....	76
7	Conclusões.....	80
Apêndice A1 Modo de Operação do Sistema de Vácuo do Acelerador Linear Eletrostático.....		82
Bibliografia.....		85

Capítulo 1

Introdução

1.1. A Pesquisa Contemporânea em Colisões Atômicas

Realizar colisões atômicas consiste em acelerar feixes de partículas atômicas ou subatômicas até uma determinada velocidade e colidir esses feixes com um determinado alvo (átomos, moléculas, superfícies sólidas ou líquidas) [1]. Essas colisões, quando realizadas de maneira controlada, nos permitem obter muitas informações sobre as propriedades tanto das partículas projétil quanto das partículas alvo [2] - propriedades atômicas, composição química e estruturas eletrônicas e cristalinas de sólidos [3] - além de nos permitir determinar as interações envolvidas e os resultados finais do processo de colisão [1].

Estamos particularmente interessados em colisões envolvendo íons alcalinos como projéteis. Sua utilização é ampla e compreende diversos campos de interesse científico.

Feixes iônicos são largamente utilizados na análise e modificação de superfícies. Os processos inelásticos e reativos associados às colisões entre íons e superfícies (tais como troca de momento, troca de carga, perda de energia e reações íon-superfície), a instrumentação apropriada e o uso destas interações para análise e modificação de superfícies têm sido investigados com acurada pesquisa [4]. A técnica LEIS (Low-Energy Ion Scattering é uma técnica que consiste na análise da composição atômica da camada mais externa de uma superfície através do ‘backscattering’ de íons de baixa energia) é considerada uma poderosa ferramenta que está sendo aplicada a uma grande variedade de cristais, filmes finos e materiais semicondutores, cerâmicos e polímeros [5]. Particularmente, íons alcalinos (Li^+ e Na^+) de baixa energia são muito apropriados para análise de camadas externas de sólidos [6]. Estudos de reatividade e de propriedades eletrônicas da liga metálica α -Cu-Al através do impacto de Li^+ na faixa de energia entre 0,2 e 2 keV são apresentados em [7]. Recentemente, o aparecimento de atividade de ferroeletricidade em filmes finos de ZnO devido à implantação de Li^+ (que provoca a formação de dipolos elétricos locais responsáveis pelo

comportamento ferroelétrico do filme) com energias de 50, 100 e 200 keV também foi alvo de investigação [8].

Feixes de íons alcalinos também são utilizados no diagnóstico de plasmas e nas pesquisas relacionadas com fusão baseadas em confinamento de plasmas em alta temperatura. Quando um feixe é injetado dentro de um plasma, as partículas do feixe interagem com os íons, com os elétrons livres e com as partículas neutras que constituem o plasma. As partículas secundárias criadas no plasma e a emissão de luz gerada a partir destas colisões carregam informações que possibilitam a caracterização do plasma em questão. A natureza destas informações depende dos processos de colisão envolvidos (ionização, excitação, troca de carga ou espalhamento) [9]. Um sumário do uso de íons alcalinos (Li^+ , Na^+ , K^+ e Cs^+) no diagnóstico de plasmas e do desenvolvimento de fontes termiônicas adequadas é encontrado em [9] e [10].

Dentro deste contexto, a determinação de seções de choque referentes às colisões envolvendo íons alcalinos e alvos gasosos (através de espectroscopia de emissão e de espectrometria de massa) torna-se tarefa importante. Compilações de dados já disponíveis na literatura científica têm sido realizadas [11], mas ainda é notável a necessidade de grandes quantidades de dados sistemáticos associados aos diversos processos colisionais, aos diferentes estados de carga e diferentes faixas de energia. Além disso, estamos também interessados na implantação de técnicas de análise de superfície (dessorção através do bombardeio de íons alcalinos) e de modificação de superfícies através da implantação de íons alcalinos.

Pesquisas dessa natureza exigem a utilização de aceleradores de partículas. Os aceleradores de partículas eletricamente carregadas são constituídos, essencialmente, de uma fonte de partículas carregadas e de mecanismos de aceleração dessas partículas. As partículas são aceleradas por forças elétricas de uma forma direta (através de campos elétricos) ou de uma forma indireta (através de campos magnéticos variáveis no tempo) [12].

Este presente trabalho é o atestado de desenvolvimento do projeto Implantação de Uma Linha de Colisões Atômicas no Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora. Esse projeto consiste na construção de um acelerador eletrostático de partículas, do tipo linear e de baixa energia (30 – 36 keV). Num acelerador linear eletrostático, as partículas seguem uma trajetória retilínea e sua energia final é proporcional à soma das diferenças de potencial geradas a partir dos mecanismos de aceleração dispostos ao longo da trajetória.

Este projeto inclui a utilização de uma fonte termoiônica de íons de Lítio (Li) cedida como doação pelo Prof. Dr. M. B. Shah (Department of Pure and Applied Physics – The Queen’s University of Belfast). Seu funcionamento é baseado na emissão de íons positivos de Li a partir do aquecimento de um filamento de Tungstênio (W) recoberto por uma substância emissiva – o composto ternário Li- β -eucryptite $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ – na forma vítrea. No entanto, nesta etapa do trabalho, utilizamos como substância emissiva uma mistura dos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptita. Neste presente trabalho serão descritos detalhadamente o processo de confecção do filamento emissivo e sua posterior adaptação ao sistema de extração da fonte termoiônica. Descreveremos o projeto, os componentes e a construção do circuito elétrico que possibilitará a extração do feixe e a etapa de aceleração dos íons. Trataremos também dos detalhes da adaptação da fonte de íons à câmara de detecção e da construção dos sistemas de vácuo e detecção.

Estando a fonte de íons em operação, é necessário um estudo de sua emissão, das modificações nas propriedades de focalização do feixe extraído devido às modificações realizadas na geometria do sistema de extração e da detecção da corrente iônica. Neste trabalho, apresentaremos os resultados das medições realizadas concernentes às correntes de emissão e detecção obtidas em função da corrente de aquecimento do filamento e da voltagem de extração. Tais resultados serão analisados com a finalidade de encontramos quais as configurações mecânicas e elétricas que otimizam o funcionamento da fonte termoiônica e dos sistemas de extração e detecção.

A construção de um acelerador eletrostático linear de baixa energia coincide com a construção de um novo laboratório de pesquisa do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora – o Laboratório de Colisões Atômicas e Ciências de Superfície (CACiS). O nosso objetivo final é obter feixes adequados e bem caracterizados para a implantação de uma linha de pesquisa em colisões íon-átomo/molécula através da espectroscopia de emissão e espectrometria de massa e em análise de superfícies através de impacto de íons.

No capítulo 2 trataremos do comportamento de partículas carregadas submetidas aos efeitos de um campo elétrico estático.

No capítulo 3 vamos explicar o funcionamento de uma fonte de íons termoiônica, as características do composto ternário Li- β -eucryptita no papel de substância emissiva e os motivos que nos conduziram à escolha deste tipo de fonte; além disso,

descreveremos detalhadamente o processo de confecção do filamento emissivo e a adaptação deste ao eletrodo de extração.

No capítulo 4 vamos apresentar o circuito elétrico - desenvolvido e montado por nossa equipe - que possibilitará a execução dos estágios de emissão, extração e aceleração do feixe iônico. Explicaremos o funcionamento de cada componente elétrico/eletrônico e o porquê de sua utilização no circuito. Descreveremos com detalhe a montagem efetiva do circuito e os primeiros testes referentes ao isolamento elétrico, funcionamento dos aparelhos e qualidade das conexões elétricas.

No capítulo 5 vamos descrever a montagem e o funcionamento do sistema de vácuo, a adaptação da fonte termoiônica à câmara de detecção e a construção do sistema de detecção.

No capítulo 6 apresentaremos os resultados das medições realizadas concernentes à emissão da fonte termoiônica, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica e vamos analisar tais resultados com o objetivo de encontrar quais as configurações elétricas e mecânicas que otimizam o funcionamento da fonte de íons e dos sistemas de extração e detecção.

No capítulo 7, será apresentado um resumo de nossas conclusões sobre as medições e discussões realizadas.

Capítulo 2

Comportamento de Partículas Carregadas em Campos Eletrostáticos

Um acelerador linear é um tipo de acelerador no qual as partículas são aceleradas de modo a seguir uma trajetória retilínea. A aceleração é obtida através da disposição de um determinado número de eletrodos em linha reta de tal forma que as partículas carregadas, provenientes de uma fonte, recebam sucessivos incrementos de energia à medida que elas avançam na linha.

Em um acelerador eletrostático, as partículas eletricamente carregadas são extraídas e aceleradas por intermédio de campos eletrostáticos (campos elétricos não variáveis no tempo) que provocam diferenças de potencial constantes no espaço circunjacente ao filamento emissivo.

O estudo e a construção de um acelerador linear eletrostático baseiam-se na análise do comportamento de partículas carregadas submetidas aos efeitos de um campo elétrico estático. 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 predeterminado. 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 estivesse negativamente carregada).

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

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

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 equação (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 [13]).

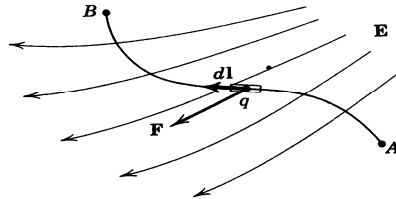


Figura 2.1 Partícula carregada em campo elétrico estático não uniforme [14]

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 [14]. 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

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

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

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

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

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 eletrônvolt. 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 de uma diferença de potencial de 1 V [13].

Nas fontes cuja produção de íons ocorre através do processo de ionização de superfície, a energia térmica transferida do filamento aquecido para o composto químico envolvido provoca a emissão de determinadas espécies iônicas (queira ver Capítulo 3). Devido à aquisição de energia térmica ($\sim 2 kT$ [15]), estes íons, após serem emitidos, apresentam velocidade inicial diferente de zero. A energia cinética inicial dos íons emitidos pode ser expressa em termos de uma diferença de potencial equivalente u_0 tal que

$$2kT = qu_0 \quad (2.11)$$

Assim, se o filamento emissivo de uma fonte termoiônica que emite íons Li^+ é aquecido a uma temperatura de 1000 K, a energia cinética inicial destes íons emitidos será de 0,17 eV; este valor é extremamente baixo se comparado às energias cinéticas adquiridas por íons Li^+ submetidos a valores de diferença de potencial da ordem de kV e pode ser desprezado. Portanto, se o filamento emissivo da fonte termoiônica emite íons Li^+ , os quais estão submetidos a degraus de potencial sucessivos que resultem numa diferença de potencial de 33 kV, então obteremos íons Li^+ com energia cinética de 33 keV. No caso de emissão de íons Li^{2+} , obteremos íons com energia cinética de 66 keV.

Como expresso no início deste capítulo, os incrementos de energia cinética recebidos pelas partículas carregadas provenientes de uma fonte são obtidos a partir da disposição de um determinado número de eletrodos nos quais são aplicados determinados potenciais eletrostáticos. Consideremos uma região do espaço limitada por dois eletrodos e utilizemos o sistema de coordenadas cartesianas; nesta região, a distribuição de potenciais pode ser determinada através da solução da equação de Laplace,

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

equação esta obtida através da aplicação do operador divergente nos dois lados da equação vetorial (2.5) para o caso de uma região livre de cargas. O movimento das partículas carregadas pode ser determinado através das soluções das equações de movimento

$$m \frac{d}{dt} \frac{dx}{dt} = q \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.13)$$

$$m \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = q \frac{\partial V}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$m \frac{d}{dt} \frac{dz}{dt} = q \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2.15)$$

Estas equações podem ser obtidas através da combinação das equações (2.3), (2.5), (2.6) e (2.7).

A equação de Laplace é uma equação diferencial parcial de segunda ordem e de primeiro grau que deve ser resolvida (quando é possível resolvê-la analiticamente) no sistema de coordenadas mais conveniente. Entretanto, soluções analíticas são possíveis apenas para configurações muito particulares e simplificadas; configurações mais complexas tornam a solução analítica muito difícil e, na maioria das vezes, impossível de ser obtida, uma vez que a solução $V(x, y, z)$ deve obrigatoriamente satisfazer às condições de contorno da montagem experimental (condições a serem satisfeitas na superfície dos eletrodos, tais como potencial aplicado e função densidade de carga superficial [13]). Eletrodos eletricamente carregados produzirão superfícies equipotenciais cuja distribuição dependerá da geometria, das dimensões e do espaçamento entre os eletrodos. Na maioria dos casos, a distribuição de potenciais (ou o mapeamento das superfícies equipotenciais) somente pode ser obtida através de métodos numéricos [16].

Uma distribuição particular de potenciais existente na região entre os eletrodos específica qualitativamente e quantitativamente a atuação das forças elétricas (perpendiculares às superfícies equipotenciais em cada ponto onde estas superfícies estão definidas) produzidas pelos campos eletrostáticos sobre a trajetória das partículas carregadas (provocando deflexão nestas partículas quando estas passam de uma região equipotencial para outra) e sobre a intensidade do feixe constituído por estas mesmas partículas. O efeito que as distribuições de potencial exercem sobre as trajetórias das partículas constituintes do feixe é análogo ao efeito produzido pelas lentes ópticas sobre a faixa visível do espectro eletromagnético [17]. Por isso, um conjunto formado por eletrodos eletricamente carregados e pelas superfícies equipotenciais – associadas aos parâmetros destes eletrodos – é denominado lente eletrostática; assim, uma lente eletrostática convergente possui uma ação focalizadora sobre as partículas carregadas do feixe (veja figuras 2.2 e 2.3).

No fim da década de 70, Don McGilvery (Latrobe University, Melbourne, Austrália) desenvolveu o software SIMION, 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 (2.16) 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 [16]).

$$\left(\frac{V_b - V_0}{\Delta x} - \frac{V_0 - V_a}{\Delta x} \right) \frac{1}{\Delta x} \quad (\text{análogo para as coordenadas } y \text{ e } z) \quad (2.16)$$

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 por sua rapidez e exatidão [18] (em 1985, David Dahl – Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, USA – adaptou o software SIMION para sua utilização em computadores pessoais)

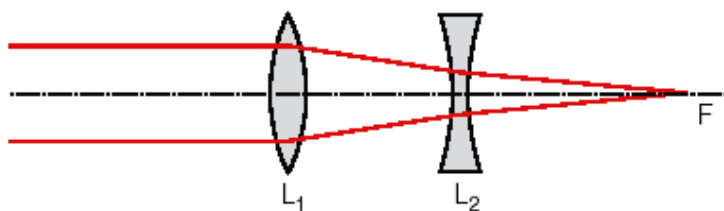


Figura 2.2 Efeito de focalização produzido por um arranjo particular de lentes ópticas sobre um feixe de luz monocromático [19]

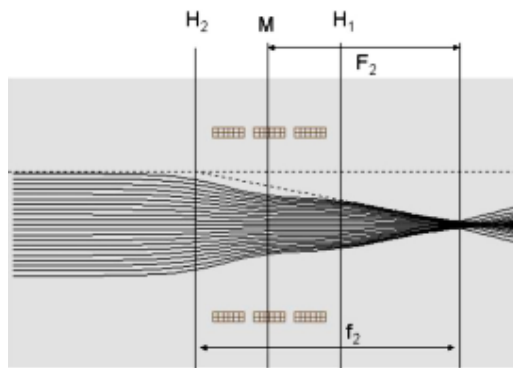


Figura 2.3 Simulação do efeito de focalização produzido por uma lente eletrostática sobre um feixe de partículas carregadas; a figura apresenta alguns parâmetros análogos aos parâmetros utilizados na caracterização de uma lente óptica espessa: M é o plano de referência, H₁ e H₂ são os planos principais, f₂ é a distância focal em relação ao plano principal H₂ e F₂ é a distância focal em relação ao plano de referência M [18]

Capítulo 3

Fonte Termoiônica de Íons Positivos

A eficaz utilização dos aceleradores de partículas com o objetivo de se obter informações sobre as propriedades tanto das partículas projétil quanto das partículas alvo depende da intensidade do feixe iônico produzido e da boa caracterização deste feixe, ou seja, das partículas projétil. O feixe iônico é produzido em uma fonte e a escolha adequada do tipo de fonte a ser utilizada deve ser baseada na aplicação que será feita dela tendo em vista as espécies iônicas e os estados de carga desejados. Outros fatores que devem ser considerados 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 vasta gama de processos físicos, físico-químicos e combinação destes são usados na produção de íons positivos e negativos. Diversos tipos de fonte têm sido amplamente desenvolvidos e utilizados nas mais variadas aplicações, onde cada fonte varia em complexidade dependendo do método utilizado para a produção dos íons e da intensidade do feixe produzido. Uma análise bastante abrangente de diversos tipos de fontes iônicas e de aplicações destas é encontrada em [15].

As fontes de íons podem ser classificadas de acordo com o mecanismo empregado para a produção de íons. Os métodos mais comuns são a produção de íons positivos através de impacto eletrônico e através de ionização de superfície. Além disso, cada fonte de íons é constituída, além da fase de produção de íons, pela fase de extração destes íons (eletrodos do sistema de extração).

Nas fontes cuja produção de íons ocorre através do impacto de elétrons, basicamente, um feixe eletrônico proveniente de um filamento aquecido é injetado dentro de uma câmara (denominada câmara de ionização) que contém o gás apropriado. Os íons positivos formados a partir das colisões entre as moléculas do gás e os elétrons do feixe são submetidos a uma pequena diferença de potencial de modo a atravessarem uma fenda localizada na própria câmara de ionização (veja figura 3.1). Os elétrons do feixe responsável pela ionização das moléculas do gás apropriado devem ser acelerados até alcançarem energias cinéticas suficientemente altas (no mínimo iguais ao potencial de ionização das moléculas do gás) a fim de tornar possível a produção de íons na câmara de ionização. Em seguida, os íons positivos são submetidos à outra diferença de potencial responsável pela aceleração dos mesmos. Neste tipo de fonte, as espécies iônicas produzidas dependem do tipo de gás e da energia do feixe de elétrons (pois um feixe cujos elétrons possuem valores relativamente baixos de energia cinética produzirá apenas íons monocarregados enquanto feixes com elétrons mais energéticos favorecem a produção de íons multiplamente carregados) [20].

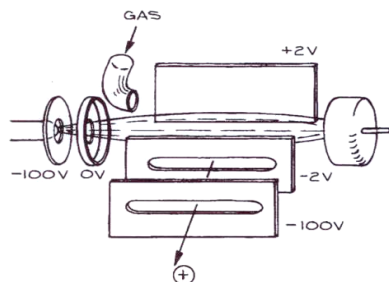


Figura 3.1 Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo impacto eletrônico [20]

Nas fontes cuja produção de íons ocorre através da ionização de superfície, um determinado composto químico (denominado de substância emissiva), que contém o átomo cujo íon desejamos obter, é colocado em contato térmico com um filamento aquecido. Um átomo de baixo potencial de ionização pode ser ionizado através do contato com uma superfície (cujo valor da função trabalho seja superior ao valor da energia de ionização do átomo envolvido) aquecida suficientemente para fornecer a energia necessária para o processo de ionização [15]. Neste processo de ionização de superfície, 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 [20]. Fontes iônicas baseadas neste processo são geralmente caracterizadas por feixes de alta pureza e por um range limitado de espécies iônicas [15]. O fenômeno de emissão de íons através do aquecimento de uma substância à temperatura elevada é conhecido como Efeito Termoiônico.

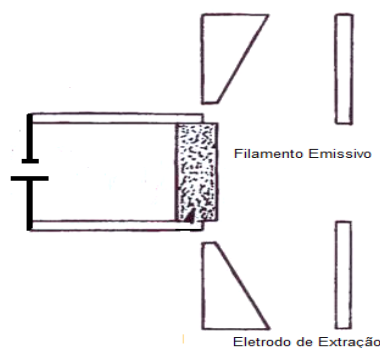


Figura 3.2 Esquema simplificado de uma fonte de íons do tipo ionização de superfície

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

O acelerador linear eletrostático que está sendo construído é alimentado por uma fonte de íons do tipo ionização de superfície. Trata-se de uma fonte termoiônica de íons Li^+ . O

princípio de funcionamento desta fonte é baseado na emissão de íons Li^+ a partir de um filamento de W aquecido e recoberto pela substância emissiva denominada Li- β -eucryptite ($\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Neste capítulo apresentaremos as características deste composto e os motivos que nos conduziram à escolha deste tipo de fonte. No entanto, uma vez que utilizamos como substância emissiva uma mistura dos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptita, vamos descrever os detalhes da preparação desta mistura e da confecção do filamento emissivo. Descreveremos o processo de aquecimento do filamento e o sistema de extração inseridos na fonte termoiônica. Trataremos também da adaptação do filamento emissivo ao sistema de extração.

3.1 Características da Substância Emissiva Li- β -eucryptite

O composto ternário Li- β -eucryptite ($\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) pertence à classe dos alumino-silicatos alcalinos do tipo β -eucryptite ($\text{X}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), onde X pode ser Li, Na, K, Rb ou Cs. Ao ser aquecida, esta substância emite íons do tipo Li^+ [21].

Hundley (1927) [22] e Bainbridge (1931) [23] observaram que os alumino-silicatos alcalinos poderiam ser usados como fontes abundantes de íons.

Blewett e Jones (1936) [24] mostraram que, dentre estes compostos, a variedade β -eucryptite possuía as melhores qualidades de emissão tais como emissão intensa e razoavelmente livre de íons de outros elementos. A figura 3.3 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 [25].

Li_2O	Al_2O_3	SiO_2
1	1	2 Eucryptite
1	1	4 Spodumene
1	1	6
2	1	5
3	1	3
1	0.12	1.6
1	0	1

Figura 3.3 Compostos preparados e testados por Blewett e Jones [24] em ordem decrescente de emissividade

Lambert et al (1978) [25] utilizaram o composto em questão e concluíram que a intensidade máxima da corrente iônica extraída da fonte termoiônica depende da voltagem de extração, da intensidade do aquecimento do filamento (o que pode ser verificado através do

gráfico da figura 3.4 apresentado no artigo [25]) 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 (o termo ‘tempo de vida médio’ de uma fonte significa o tempo no qual a fonte consegue manter uma emissão iônica alta e constante).

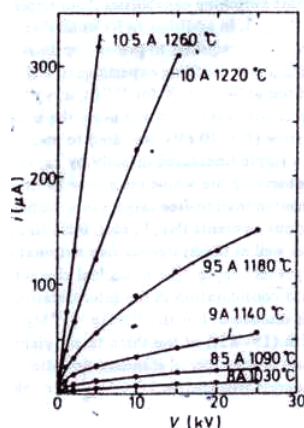


Figura 3.4 Corrente extraída versus voltagem aplicada para diferentes temperaturas do filamento obtida por Lambert et al [25]

Ueda et al (1997) [21] 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 $2 - 3 \text{ mA/cm}^2$ de Li^+ tem sido alcançadas por estes e outros pesquisadores [26], [27].

Além disso, trabalhos recentes destacaram que os feixes iônicos obtidos do composto ternário Li- β -eucryptite 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 freqüentemente causa problemas concernentes à determinação de seções de choque absolutas [28]. Entre as fontes baseadas na emissão termoiônica deste composto, podemos citar os trabalhos recentes de [26] e [28].

Em suma, para a obtenção de feixes de íons Li^+ , uma fonte termoiônica 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 possui design compacto e não necessita de alimentação gasosa.

3.2 A Confeção do Filamento Emissivo

O composto Li- β -eucryptite ($\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) pode ser produzido através do aquecimento da mistura de Carbonato de Lítio (Li_2CO_3), Óxido de alumínio (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2) seguindo a seguinte reação química:



O filamento de Tungstênio (W) é o mais adequado devido ao seu elevado ponto de fusão (3380 K [29]). Além disso, o valor da função trabalho do W é de aproximadamente 4,6 eV [20] enquanto que a função trabalho do Li- β -eucryptite (no sentido de energia mínima necessária para emitir um íon Li^+) é de aproximadamente 3 eV [21],[25].

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 [25]. A substância emissora é obtida em forma de pasta através da mistura dos reagentes (lado esquerdo da equação (3.1)) 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 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 [25].

Apesar da relativa simplicidade do processo de confecção deste filamento emissivo, dificuldades de caráter logístico nos impediram de atingir a temperatura de vitrificação mencionada (1450 °C) e, conseqüentemente, de realizar a síntese do composto ternário Li- β -eucryptite conforme a equação (3.1). O primeiro empecilho com que nos defrontamos foi a repentina impossibilidade de utilização do forno elétrico capaz de atingir tal temperatura. Concernente ao processo de se atingir tal temperatura através do aquecimento do filamento via efeito Joule, a ausência de um pirômetro óptico mostrou-se outro grande óbice; mesmo sendo possível o monitoramento da voltagem e da corrente de aquecimento, a variação da resistência elétrica do filamento, das estruturas metálicas que o sustentam e dos bornes de conexão elétrica tornaram impossível uma medição indireta razoavelmente satisfatória da temperatura.

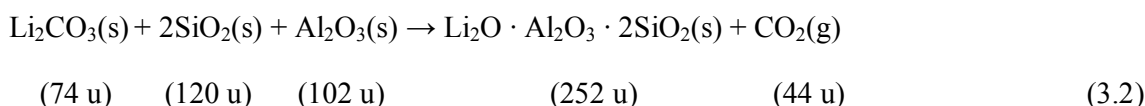
Considerando as limitações acima citadas e seu provável caráter temporário, decidimos utilizar como substância emissiva a mistura formada pelos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptita na proporção indicada pela equação (3.1) e estudar sua emissão.

Conhecendo-se as massas atômicas (relativas ao padrão de massas atômicas: o isótopo Carbono-12, cuja massa é fixada arbitrariamente em 12 unidades - 12 u – de massa atômica [30]) dos elementos envolvidos, podemos obter a massa molecular dos compostos presentes na equação (3.1), tanto dos reagentes quanto dos produtos.

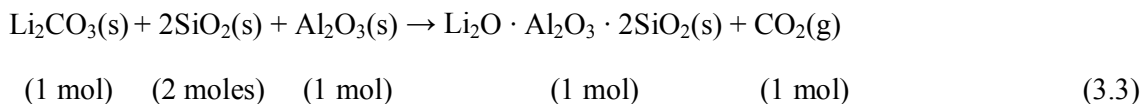
Composto	Massas atômicas	Massas Moleculares
Li_2CO_3	$\text{Li} \approx 7 \text{ u}; \text{C} \approx 12 \text{ u}; \text{O} \approx 16 \text{ u}$	74 u
SiO_2	$\text{Si} \approx 28 \text{ u}; \text{O} \approx 16 \text{ u}$	60 u
Al_2O_3	$\text{Al} \approx 27 \text{ u}; \text{O} \approx 16 \text{ u}$	102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

Tabela 3.1 Compostos e massas atômicas e moleculares envolvidos na síntese do composto Li- β -eucryptita [26]

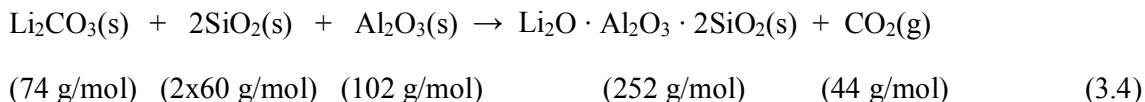
Assim, podemos escrever



Em termos de quantidade de mols, temos que

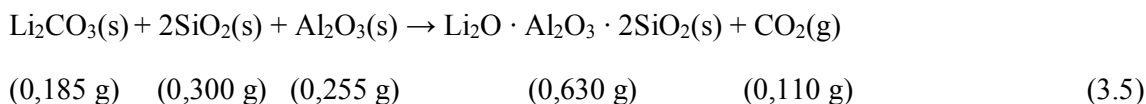


Em termos de massa molar (massa em gramas de 1 mol de uma substância [30]), temos as seguintes quantidades



Portanto, a 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- β -eucryptita com a eliminação de 44 g de CO_2 , uma vez atingida a temperatura de 1450 °C.

A lei das proporções definidas, enunciada 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 [30]. Esta lei nos permite fazer uma redução na quantidade de reagentes e produtos de modo a manter a mesma proporção em massa. A fim de preparar a mistura dos reagentes da equação (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 , Al_2O_3 (nas quantidades indicadas na equação (3.5)) foi obtida em forma de pasta com a adição de água destilada. Esta pasta foi fixada na parte superior de um filamento de W, o qual foi recoberto previamente por uma pasta de Zirconato de Bário (BaZrO_3) a fim de prevenir um ataque químico ao filamento (o filamento de W utilizado é de alta pureza - 99,95% - e possui 0,5 mm de diâmetro e aproximadamente 7 cm de comprimento; a parte superior deste filamento foi forçada a tomar a forma de uma espira helicoidal – apesar de seu alto grau de dureza - a fim de reter mais facilmente a mistura dos reagentes). Após sua confecção, o filamento emissivo médio pode ser caracterizado pelo valor de sua massa (0,609 g) e da área de sua superfície emissiva (aproximadamente 1 cm^2).

3.3 Descrição da Fonte Termoiônica

Conforme explicamos no início deste capítulo, tanto o processo de produção de íons (aquecimento do filamento emissivo) como o processo de extração destes mesmos íons (eletrodos de extração) estão inseridos na estrutura de uma fonte termoiônica.

A figura 3.5 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 corrente 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).

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 figura 3.6 apresenta uma foto da estrutura interna da fonte de íons esquematizada na figura 3.5.

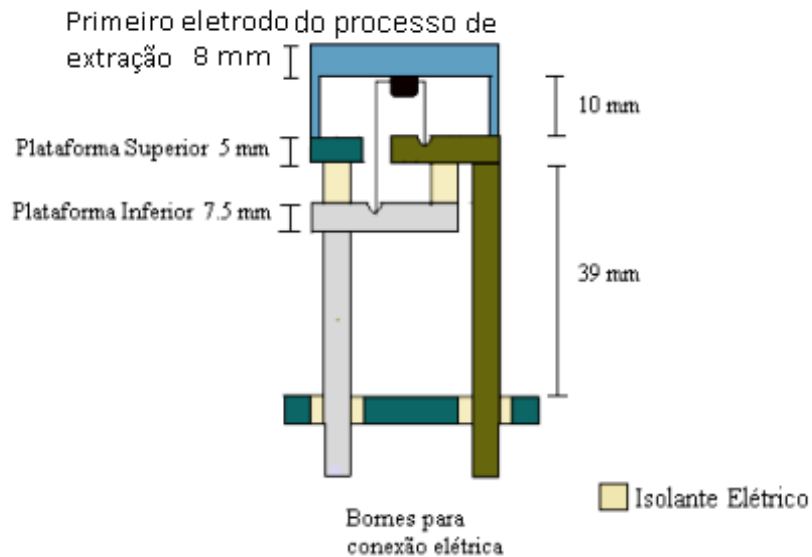


Figura 3.5 Esquema e dimensões da estrutura interna da fonte de íons

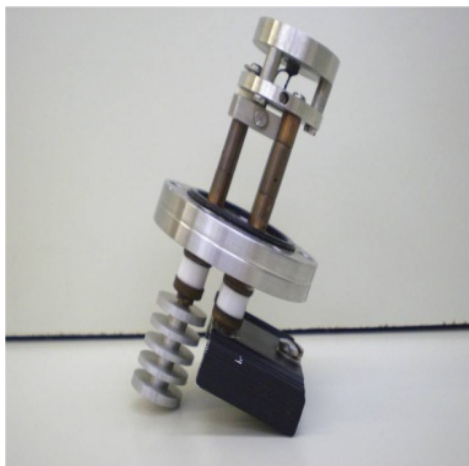


Figura 3.6 Foto da estrutura interna da fonte de íons

O processo de extração dos íons emitidos a partir do aquecimento do filamento 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 figura 3.7 apresenta o arranjo espacial, a distância intersticial e o diâmetro da abertura central de cada eletrodo pertencente ao sistema de extração.

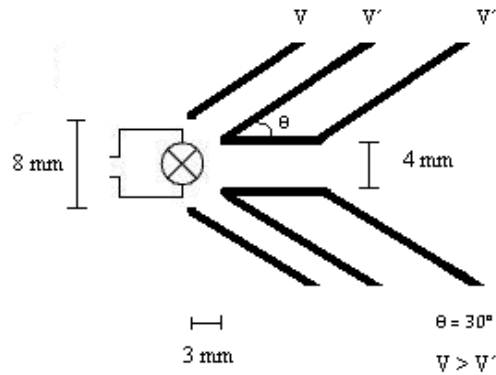


Figura 3.7 Esquema do arranjo espacial do par de eletrodos cônicos responsável pela extração dos íons emitidos pelo filamento emissivo

O primeiro eletrodo do sistema de extração é constituído por um cone metálico conectado acima da plataforma superior na estrutura interna da fonte termoiônica (veja figuras 3.5, 3.6 e 3.8).



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

O segundo eletrodo do sistema de extração é constituído por um cone metálico pertencente à estrutura metálica apresentada nas figuras 3.9.

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 figura 3.10 realiza a conexão entre estas duas estruturas através de parafusos adequados.

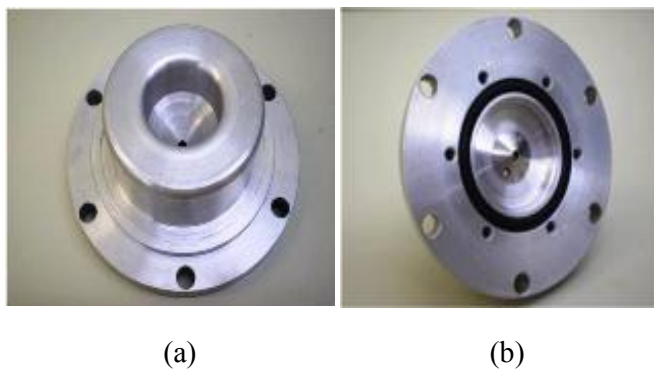


Figura 3.9 a) Vista superior e b) lateral da estrutura metálica que contém o segundo eletrodo do sistema de extração



Figura 3.10 Cilindro metálico de conexão para a montagem do sistema de extração

Uma visão expandida da fonte de íons pode ser vista na figura 3.11 (a). A figura 3.11 (b) apresenta o conjunto montado (compacto, com aproximadamente 14 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 3.11 Visão (a) expandida e b) compacta da fonte de íons

3.4 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 figura 3.5); o filamento é centrado na abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (conforme esquema apresentado na figura 3.7).

Conforme será explicado no capítulo 6, os estudos relacionados à focalização do feixe e à detecção da corrente iônica mostram que as propriedades focais do sistema de extração de nossa fonte termo-iônica podem depender não somente das diferenças de potencial aplicadas entre os eletrodos, mas também da posição da parte superior do filamento emissivo em relação à extremidade inferior da abertura central 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 (figuras 3.12).

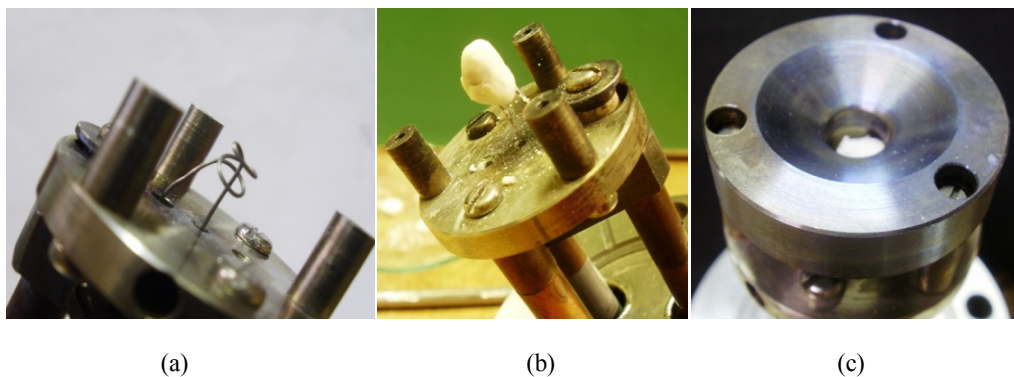


Figura 3.12 Porção superior do filamento emissivo localizado imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração

Confeccionamos também um filamento emissivo cuja porção superior está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (figuras 3.13).



(a)

(b)

(c)

Figura 3.13 Porção superior do filamento emissivo localizado um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração

Capítulo 4

Componentes Eletrônicos e Circuito de Emissão, Extração e Aceleração

Como citamos anteriormente, a primeira etapa do acelerador será constituída basicamente por uma fonte termoiônica de íons Li^+ (a qual inclui o filamento emissivo e um sistema de extração constituído por dois eletrodos (ver capítulo 3)), um estágio de aceleração destes íons e um detector de corrente iônica que permitirá o estudo da emissão, comportamento e características da fonte. Nesse capítulo vamos mostrar o circuito elétrico projetado para a execução dos estágios de emissão, extração e aceleração, explicar o funcionamento de cada componente elétrico/eletrônico e o porquê de sua utilização no circuito. Descreveremos também, detalhadamente, a montagem efetiva deste circuito.

Uma vez que nossa fonte emitirá íons de Li positivamente carregados, os processos de extração e de aceleração implicam a construção de degraus de potencial decrescentes. Portanto, as estruturas responsáveis pelo estágio de extração devem estar num potencial inferior ao do filamento emissivo. Da mesma maneira, as estruturas responsáveis pelo estágio de aceleração devem estar num potencial inferior ao das estruturas extratoras.

O circuito elétrico da figura 4.1 tem por finalidade o estabelecimento da corrente elétrica para o aquecimento do filamento emissivo (estágio de emissão) e das diferenças de potencial associadas aos estágios de extração e aceleração dos íons Li^+ . Neste circuito estão contidas a adequada alimentação das fontes de corrente e tensão e a produção das diferenças de potencial acima citadas.

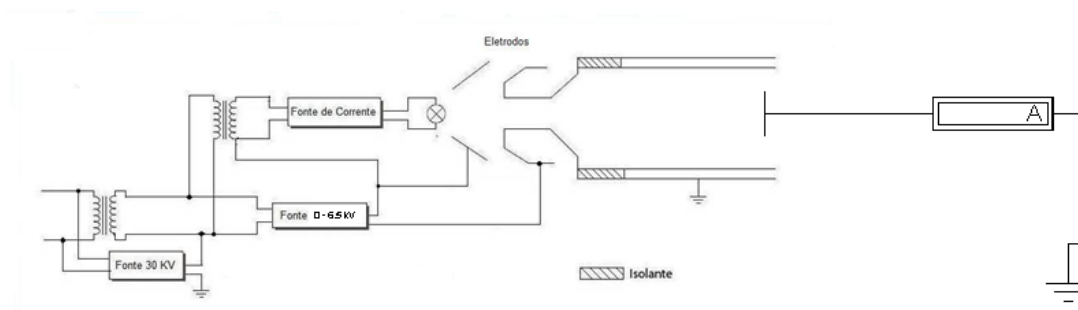


Figura 4.1 Circuito elétrico de estabelecimento da corrente elétrica para o aquecimento do filamento emissivo (estágio de emissão) e das diferenças de potencial associadas aos estágios de extração e aceleração dos íons

Esta é a seqüência das diferenças de potencial às quais os íons são submetidos: uma fonte de corrente mantém uma diferença de potencial ajustável de até 6,5 V entre o filamento

emissivo e o primeiro eletrodo. Uma fonte de tensão mantém uma diferença de potencial ajustável de até 6,5 kV entre o primeiro e o segundo eletrodo, sendo esta a fase de extração. Uma fonte de tensão de 30 kV mantém uma diferença de potencial de 30 kV entre todo o aparato anterior e a Terra, sendo esta a fase de aceleração dos íons. Estas quedas de potencial são ilustradas no esquema da figura 4.2.

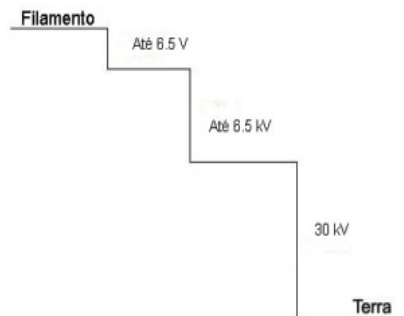


Figura 4.2 Diferenças de potencial às quais os íons estão submetidos nos processos de extração e aceleração

4.1 Componentes Eletrônicos e Mecânicos

Na construção do circuito elétrico responsável pelos estágios de emissão termiônica, extração e aceleração dos íons Li^+ através de diversos valores de diferença de potencial, faremos uso dos seguintes componentes eletrônicos e mecânicos:

- Filtros de linha
- Transformadores de isolamento
- Fontes de tensão e fonte de corrente
- Cabos e conectores
- Racks (interno e externo) para suporte dos componentes eletrônicos acima citados

4.1.1 Filtros de Linha

Os filtros de linha são necessários porque protegem os equipamentos elétricos e eletrônicos contra curtos-circuitos e contra sobrecargas de tensão e ruídos que estão constantemente presentes na rede elétrica, além de expandir o número de tomadas disponíveis para a conexão de outros equipamentos eletrônicos, distribuindo para estes a mesma tensão que recebe da fonte de energia.

Em nossa montagem, utilizamos três filtros de linha com as seguintes especificações:

Tensão de Entrada (V)	110/220
Tensão Máxima de Trabalho (V) (carac. do Varistor)	275
Corrente Máxima (A)	10
Fusível de Proteção (A)	15

Tabela 4.1 Especificações dos filtros de linha utilizados

4.1.2 Transformadores

A utilização da corrente alternada nos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica se dá em virtude do fato de que a corrente alternada pode ser facilmente transformada de baixa para alta tensão e de alta para baixa tensão. Esse processo é realizado através de um dispositivo de construção simples e de rendimento elevado – o transformador.

Num arranjo típico, um transformador é constituído de duas bobinas, uma de entrada (denominada enrolamento primário) e outra de saída (denominada enrolamento secundário), ambas dispostas em torno de um mesmo núcleo de ferro doce (material ferromagnético), o qual recebe o nome de núcleo do transformador (veja figura 4.3). O enrolamento primário é alimentado pela tensão V_1 (tensão que será transformada), denominada tensão primária. No enrolamento secundário será induzida uma voltagem V_2 (tensão transformada), designada pelo nome de tensão secundária. Evidentemente, como estamos trabalhando com voltagens alternadas, as voltagens V_1 e V_2 referem-se às respectivas voltagens eficazes.

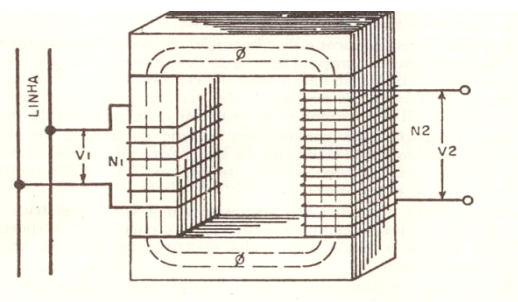


Figura 4.3 Esquema típico de um transformador [31]

O funcionamento do transformador baseia-se no princípio da indução mútua entre dois circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente ligados – uma corrente alternada percorrendo um circuito induz uma força eletromotriz (f. e. m) num circuito próximo. Aplicando uma tensão alternada V_1 nos extremos do enrolamento primário, este será percorrido por uma corrente alternada. Deste modo, um campo magnético variável será estabelecido no interior da bobina fazendo com que o núcleo de ferro fique imantado em

consonância com as oscilações temporais do campo magnético criado pela corrente alternada no primário. Para uma dada corrente, o núcleo de ferro aumenta o campo magnético e canaliza quase todo o fluxo magnético alternado φ para o enrolamento secundário [32]. Segundo a lei da indução de Faraday, sempre que ocorre uma variação temporal de fluxo de campo magnético através de um circuito, aparecerá neste circuito uma f. e. m \mathcal{E} induzida cujo valor em módulo é dado por

$$\mathcal{E} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.1)$$

Logo, uma f. e. m. será induzida nas espiras do enrolamento secundário fazendo aparecer uma voltagem V_2 nos extremos desta bobina.

Qual a relação entre as voltagens primária e secundária? Analisemos um transformador ideal, no qual sejam nulas as resistências elétricas dos enrolamentos e as perdas por histerese no núcleo de ferro. Vamos aplicar uma voltagem alternada de valor eficaz V_1 ao enrolamento primário e deixar o enrolamento secundário aberto. Neste caso, o enrolamento primário comporta-se como um circuito puramente indutivo. O efeito de auto-indução consiste no surgimento de uma f. e. m. induzida numa bobina quando variamos a corrente na própria bobina[33]. Pela primeira lei de Kirchhoff temos que

$$V_1 - L_1 \frac{di}{dt} = 0 \quad (4.2)$$

onde L_1 é a indutância do enrolamento primário. Portanto, a tensão alternada de valor eficaz V_1 , aplicada ao enrolamento primário composto de N_1 espiras agrupadas em série, produz um fluxo variável de campo magnético que, por sua vez, gera no próprio primário uma força contra eletromotriz (f. c. e. m.) \mathcal{E}_1 que, em módulo, é igual à tensão aplicada [31]

$$\mathcal{E}_1 = V_1 = L_1 \frac{di}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.3)$$

A mesma variação temporal do fluxo magnético induz no enrolamento secundário, formado por N_2 espiras agrupadas em série, uma f.e.m secundária \mathcal{E}_2 igual à tensão V_2 que se manifesta nos extremos deste secundário.

$$\mathcal{E}_2 = V_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.4)$$

Dividindo (4.4) por (4.3) teremos a relação entre as voltagens primária e secundária, a saber,

$$V_2/V_1 = N_2/N_1 \quad (4.5)$$

Se $N_2 > N_1$, teremos $V_2 > V_1$; neste caso, o transformador está sendo utilizado para elevar a voltagem. Se $N_2 < N_1$, teremos $V_2 < V_1$; neste caso, o transformador está sendo

utilizado para diminuir a voltagem. (Note que, tratando-se de um transformador ideal, a potência obtida no enrolamento secundário deve ser igual à potência fornecida ao enrolamento primário; para o estudo detalhado do caso em que o enrolamento secundário é efetivamente utilizado para alimentar um determinado circuito, queira ver [31]; no entanto, é importante ressaltar que o regime de funcionamento do transformador é determinado pela necessidade da f. e. m. \mathcal{E}_1 resultar constantemente igual e oposta à tensão aplicada V_1).

Se $N_2 = N_1$, teremos $V_2 = V_1$ (as voltagens primária e secundária serão iguais); neste caso, temos um transformador isolador (veja figura 4.4). Frequentemente, esse tipo de transformador é utilizado para isolar o circuito ligado ao seu enrolamento secundário da rede elétrica, protegendo-o contra os surtos e os ruídos presentes na rede.

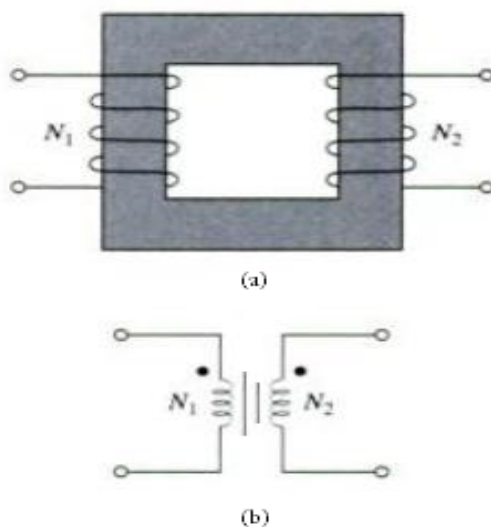


Figura 4.4 a) Esquema de um transformador de isolamento e b) representação deste transformador em diagramas de circuitos elétricos

Utilizamos dois transformadores de isolamento de tamanhos diferentes (veja figuras 4.5). Um dos transformadores possui categoria de isolamento para 30 kV (cor branca, o qual denominaremos de transformador de isolamento A). O outro transformador possui categoria de isolamento para 6,5 kV (cor vermelha, o qual denominaremos de transformador de isolamento B). Este tipo de transformador é essencial para o funcionamento dos estágios de emissão termiônica, extração e aceleração. Apesar de trabalharmos com uma fonte de tensão que eleva 30 kV uma segunda fonte de tensão que, por sua vez, eleva a fonte de corrente mais 6,5 kV (total de 36,5 kV, no caso de tensão de saída máxima), estas fontes são alimentadas pela diferença de potencial alternada de 220 V fornecida pela rede elétrica. Todas as diferenças de potencial envolvidas no funcionamento das fontes são de 220 V, no entanto, essa diferença de potencial de 220 V está levantada 36,5 kV em relação à Terra.

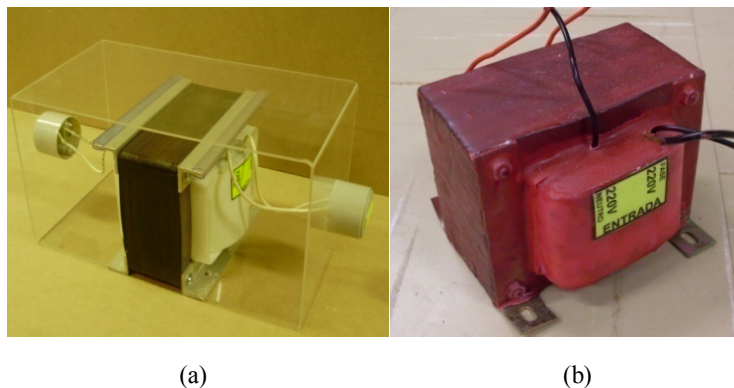


Figura 4.5 Transformadores de isolamento utilizados no acelerador. (a) O transformador de isolamento A (cor branca) possui categoria de isolamento para 30 kV e (b) o transformador de isolamento B (cor vermelha) possui categoria de isolamento para 6,5 kV

4.1.3 Fontes de Tensão e de Corrente

Fontes de alimentação são circuitos eletrônicos capazes de processar energia elétrica de modo que essa possa ser retransmitida com parâmetros estáveis a outros circuitos ou dispositivos eletrônicos, alimentando-os como fonte de corrente elétrica ou como fonte de tensão.

As fontes de tensão podem ser classificadas como fontes de tensão alternada e fontes de tensão contínua. Uma fonte de tensão contínua regulada permite o controle da voltagem de saída em valores específicos (pertencentes a um range de valores que variam de acordo com a fonte) e caracteriza-se pela alta estabilidade na manutenção do valor de tensão escolhido, independente do tipo de circuito ou dispositivo eletrônico ao qual a fonte está conectada. Estas fontes são constituídas basicamente por um circuito retificador de onda inteira (onde os semiciclos positivos e negativos são retificados) o qual converte a voltagem alternada de entrada (rede elétrica) em uma voltagem contínua de saída, seguido de filtros cuja função é manter a tensão de saída próxima do valor de pico da tensão alternada de entrada. No entanto, a estabilidade da tensão de saída de um bloco retificador com filtros não é plenamente satisfatória por causa das variações da tensão de entrada e das oscilações oriundas do processo de filtragem. Por esta razão são introduzidos circuitos reguladores que melhoram a estabilidade da tensão de saída a fim de que esta permaneça constante, independente de outras flutuações [34].



Figura 4.6 Diagrama de blocos de uma fonte de tensão regulada [34]

As fontes de tensão utilizadas no acelerador possuem um limitador de corrente que impede o alcance de valores excessivos de corrente que certamente provocariam danos ao aparelho e ao circuito conectado à sua saída.

Além dos reguladores de tensão, existem também os reguladores de corrente cuja função é manter a corrente de saída constante. Portanto, uma fonte de corrente permite o controle da corrente de saída em valores específicos (pertencentes a um range de valores que variam de acordo com a fonte) e caracteriza-se pela alta estabilidade na manutenção do valor de corrente escolhido, independente do tipo de circuito ou dispositivo eletrônico ao qual a fonte está conectada (concernente à alimentação do filamento emissivo, a fonte de corrente utilizada no acelerador linear eletrostático mantém a estabilidade do valor de corrente escolhido apesar das variações nos valores de resistência elétrica do filamento emissivo e de suas conexões elétricas devido ao aquecimento). A fonte de corrente utilizada no acelerador possui um limitador de tensão que garante que o circuito ou dispositivo ligado à saída da fonte não receba tensões fora de uma determinada faixa de valores.

Para a construção dos estágios de emissão termoiônica, extração e aceleração, utilizamos as seguintes fontes de alimentação:

Fonte de Tensão (Estágio de Aceleração) Power Designs, Inc.; High Voltage Regulated DC Power Supplies Model HV-1579	
Tensão de entrada	110 V
Tensão de saída	10 kV a 30 kV (VC estabilizada)
Corrente máxima de saída	1 mA
A voltagem de saída é ajustável em duas faixas de tensão para otimizar o desempenho dos componentes eletrônicos da fonte, a qual possui também ajustes grosso e fino de tensão	

Tabela 4.2 Dados técnicos da Fonte de Tensão de 30 kV

Fonte de Tensão (Estágio de Extração) FuG Elektronik GmbH; High Voltage Chopper Power Supplies (HCP) 14-6500 MOD	
Tensão de entrada	230 V \pm 10% (47-63 Hz)
Tensão de saída	Continuamente ajustável de 0 a 6500 V (VC estabilizada)
Corrente máxima de saída	2 mA
Potência máxima	14 W
Possui polaridade positiva. Um pólo está no terminal de alta voltagem e o outro pólo está no terminal 0 V.	

Tabela 4.3 Dados Técnicos da Fonte de Tensão 0 – 6,5 kV

Fonte de Corrente (Alimentação do Filamento Emissivo) FuG Elektronik GmbH; Type NTN 350-6,5 MOD	
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

Tabela 4.4 Dados técnicos da fonte de corrente



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 Fontes de tensão para os estágios de (a) aceleração, (b) extração; (c) fonte de corrente para o aquecimento do filamento emissivo

4.1.4 Racks

A fonte de corrente, a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e o transformador de isolamento B terão um rack como suporte. Este rack, o qual vamos denominar de rack interno, foi construído na oficina mecânica do DF-UFJF e possui algumas peculiaridades essenciais para os estágios de emissão termoiônica, extração e aceleração. Sua estrutura é de metalon e possui três prateleiras feitas de aço, com espessura de 2 mm, que podem ser ajustadas

horizontalmente (veja figuras 4.8). Devido ao fato de que a saída da fonte de 30 kV está diretamente conectada a este rack interno (elevando em 30 kV o seu potencial em relação à Terra) o rack está munido de quatro pés confeccionados a partir de tarugos de Nylon (material isolante constituído por fibras sintéticas de poliamida de rigidez dielétrica entre 30 - 50 kV/cm [35]) que impedem que esta tensão seja descarregada do rack. Esses pés foram planejados levando-se em consideração tanto o isolamento elétrico adequado quanto a capacidade de suportar o peso do rack interno.

Por causa do efeito de condutividade elétrica superficial de isolantes sólidos, o acabamento final apresenta sulcos por toda a extensão dos pés. (Este efeito está condicionado à existência de películas de poeira e umidade que porventura estejam recobrando a superfície do isolante [35]. Estas películas comportam-se como condutores de eletricidade de resistência elétrica R dada por

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.6)$$

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 sulcos nos pés de Nylon estamos aumentando o comprimento L da película superficial condutora; conseqüentemente, estamos aumentando sua resistência elétrica e melhorando o seu isolamento elétrico. Além disso, estes pés são ajustáveis de modo a que o rack interno possa se mover para cima e para baixo e ser nivelado em relação ao rack de proteção externo que o comportará (veja figura 4.9(c)).

Na primeira prateleira (de baixo para cima) está alojado um filtro de linha. Na segunda prateleira estão alojados a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e o transformador de isolamento B. Na terceira prateleira está alojada a fonte de corrente. A fonte de corrente está no potencial de 0 – 6,5 kV em relação ao rack interno (que está no potencial de 30 kV em relação à Terra, conforme mencionamos anteriormente). Portanto, com o objetivo de isolar a fonte de corrente de todo o resto do rack interno, introduzimos placas de Nylon nas paredes laterais e na prateleira correspondentes (ou seja, pelas laterais e por debaixo da fonte de corrente). A placa de Nylon fixada sobre a terceira prateleira foi cortada de modo a, além de isolar a fonte de corrente, permitir o resfriamento desta fonte (veja figuras 4.9(a) e 4.9(b)). No topo do rack interno será construído um suporte que sustentará a fonte termoiônica. Este suporte está sendo projetado de modo a que o feixe colimado de íons fique a uma altura de aproximadamente 1,10 m do chão do laboratório.

Este rack interno é comportado por um rack de maior porte que está aterrado, o qual denominaremos de rack externo (veja figura 4.10). Este rack externo suporta o transformador de isolamento A e serve também como apoio para o conjunto bomba difusora e acessórios, bem como para toda a linha de vácuo conectada à fonte termoiônica. Seu aterramento atende a duas necessidades: 1) aterrar toda a linha de vácuo conectada à fonte de íons (caso contrário, a fase de aceleração não existiria) e 2) impedir que tenhamos um contato direto fatal com a alta voltagem (os ajustes de tensão e corrente das fontes são realizados através de cilindros de PCV que atravessam uma placa de acrílico que permite a visualização dos displays (veja figura 4.11). PVC é o nome comum da resina sintética Policloreto de Vinila. Este isolante

possui rigidez dielétrica entre 40 - 50 kV/mm [35]). No topo deste rack existe uma estrutura de proteção, semelhante a uma gaiola, que nos protege da alta tensão e protege a fonte termoiônica contra choques mecânicos indesejáveis (veja figura 4.12). O conjunto rack interno com componentes eletrônicos alojados em seu interior e rack externo, ambos formando uma única unidade, podem ser visto na figura 4.11.

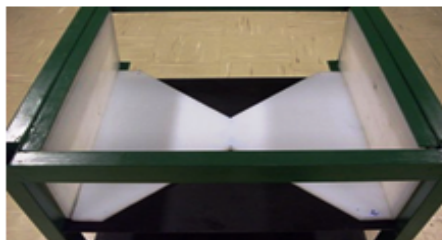


(a)

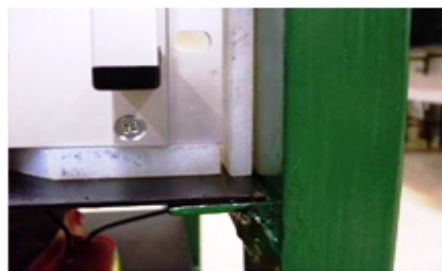


(b)

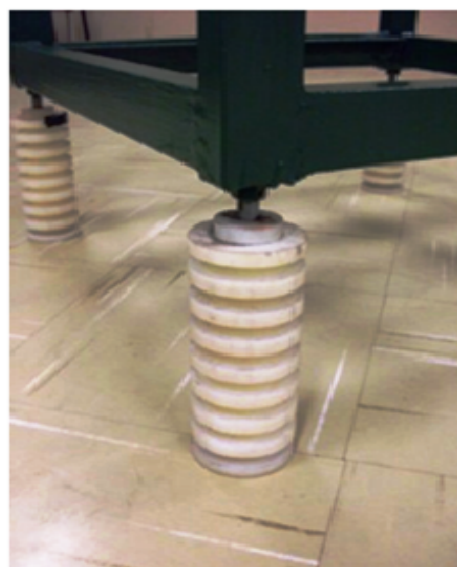
Figura 4.8 Rack Interno com (a) estrutura de metalon e (b) prateleiras de aço



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9 Detalhes do isolamento do rack interno: (a) e (b) placas de nylon para o isolamento da fonte de corrente; (c) pés isolantes e ajustáveis

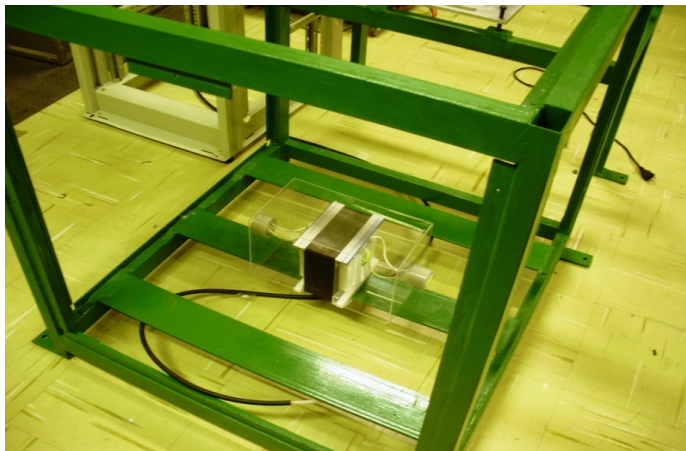


Figura 4.10 Rack externo

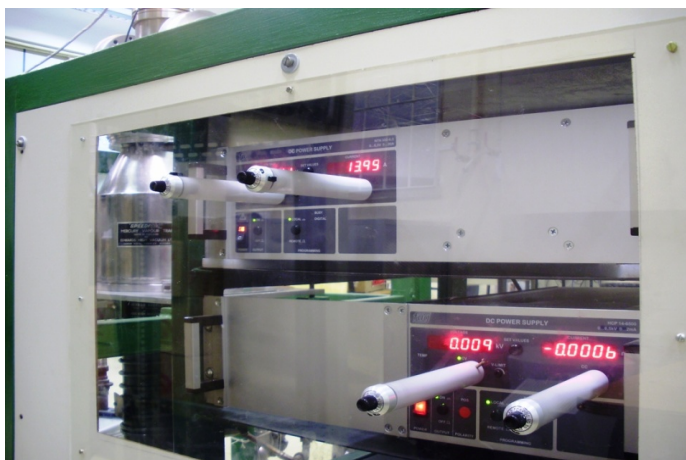


Figura 4.11 Cilindros de PVC para os ajustes de tensão e corrente



Figura 4.12 Gaiola de Proteção

4.2 Circuito Elétrico

Neste tópico descreveremos a montagem efetiva do circuito que apresentamos na figura 4.1.

A entrada do transformador de isolamento A está ligada à rede elétrica que fornece voltagem alternada de valor eficaz 220 V através de um cabo condutor elétrico duplo com $2,5 \text{ mm}^2$ de área de secção reta (para corrente máxima de 21 A sem aquecimento excessivo). Este transformador possui um suporte de acrílico e está alojado na parte inferior do rack externo (veja as figuras 4.5(a) e 4.10).

A saída do transformador de isolamento A está conectada às entradas da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e do transformador de isolamento B (alimentando-os com tensão alternada de 220 V). Estas conexões são feitas através de um filtro de linha localizado na primeira prateleira do rack interno (veja figura 4.13).

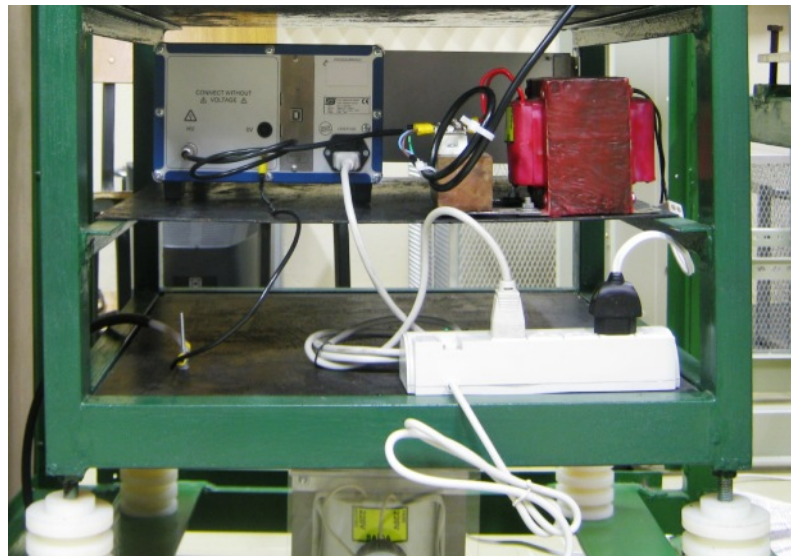


Figura 4.13 Ligações elétricas envolvendo os transformadores de isolamento, o filtro de linha e a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV

(O cabo do filtro de linha está conectado à saída do transformador de isolamento A. O enrolamento primário do transformador de isolamento B e a entrada da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV estão conectados às tomadas do filtro de linha.

- A ligação entre o filtro de linha e a fonte de tensão de 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 B 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 conector estão ligados os cabos do enrolamento primário do transformador de isolamento B).

Tanto a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV quanto o transformador de isolamento B estão situados na segunda prateleira do rack interno.

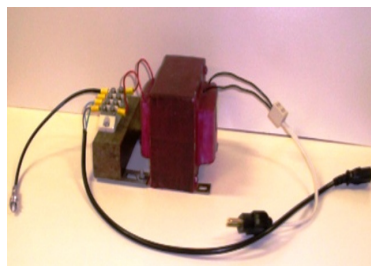
Na terceira prateleira do rack interno localiza-se a fonte de corrente que alimenta o filamento emissivo e, conseqüentemente, produz a emissão de íons.

A fonte de tensão de 0 – 6,5 kV levanta em 0 – 6,5 kV o potencial da fonte de corrente em relação ao potencial da Terra (0 V). Como explicamos anteriormente, essa diferença de potencial de 0 – 6,5 kV 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 B. Logo, tanto a saída do transformador de isolamento B (responsável pela alimentação da fonte) quanto a saída da fonte de 0 – 6,5 kV (responsável pela elevação do potencial da fonte de corrente) devem estar conectadas à entrada da fonte de corrente. Desta forma, temos 220 V levantados em 0 – 6,5 kV em relação à Terra.

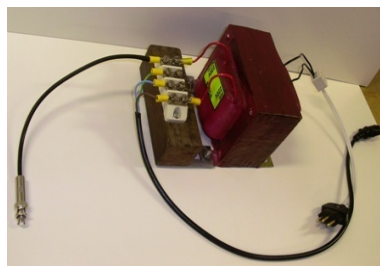
Para efetuarmos estas conexões, utilizamos um conector cerâmico em forma de barra que é suportado por um bloco de madeira (material também isolante). Este conector permite que tanto a saída da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV quanto a entrada da fonte de corrente sejam conectados à saída do transformador de isolamento B. De um lado do conector estão ligados os terminais do enrolamento secundário do transformador de isolamento B. Do outro lado do conector estão ligados a saída da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e a entrada da fonte de corrente.

- a saída da fonte de 0 – 6,5 kV é ligada ao conector-barra através de um cabo coaxial de 50 Ω 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 – o que estabelece blindagem com relação a campos eletromagnéticos externos – que por sua vez, está revestida por outro dielétrico).
- a entrada de fonte de corrente é ligada ao conector-barra através de um cabo 3x0,75 mm² (duas fases e um terra). Este cabo é próprio da fonte (para corrente máxima de 10 A sem aquecimento excessivo).

Estas conexões podem ser vistas nas figuras 4.14 e 4.15.



(a)



(b)

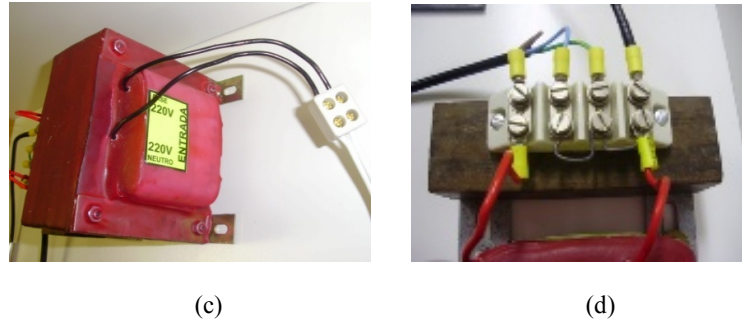


Figura 4.14 Detalhes das ligações elétricas no conector-barra envolvendo o transformador de isolamento B, a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e a fonte de corrente.



Figura 4.15 Ligações elétricas envolvendo o transformador de isolamento B, a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV e a fonte de corrente no interior do rack interno

Até o presente momento todas as conexões elétricas realizadas atenderam às necessidades de alimentação das fontes e de elevação em 0 – 6,5 kV (em relação ao terra da rede elétrica) 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. Por esta razão, neste momento entra em cena a fonte de tensão de 30 kV que está localizada num rack comercial de 19 polegadas, o qual está próximo ao conjunto formado pelos racks interno e externo, mas não possui qualquer dependência mecânica com este conjunto.

Observemos o circuito elétrico representado na figura 4.1 e notemos que a fonte de tensão de 30 kV está ligada à rede elétrica convencional (que fornece, neste caso, voltagem alternada de valor eficaz 110 V). Esta ligação é feita através de um cabo da própria fonte. Observemos 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 sua 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.

Na prática, esta tarefa foi realizada da seguinte maneira: a saída da fonte de tensão de 30 kV é conectada a um parafuso localizado na primeira prateleira do rack interno (note o canto inferior esquerdo da figura 4.13). Esta conexão elétrica faz com que todo o rack interno sofra uma elevação de potencial de 30 kV em relação ao terra da rede elétrica (0 V). Assim, todas as estruturas de suporte e componentes eletrônicos que pertençam ao rack interno ou que estão em contato elétrico com ele estão localizados em um potencial de 30 kV em relação ao potencial da Terra (esta conexão é feita através de um cabo coaxial próprio da fonte).

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 30 kV em relação à Terra. Ela está elevada apenas 0 – 6,5 kV em relação ao terra da fonte de tensão de 0 – 6,5 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 de 0 – 6,5 kV em relação ao terra da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV. No entanto, o terra da fonte de tensão 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 de tensão de saída máxima) e esta diferença total apresenta os degraus de potencial representados na figura 4.2.

Todas as conexões elétricas realizadas podem ser resumidas na tabela abaixo:

EQUIPAMENTO	ENTRADA	SAÍDA
Fonte de 30 kV	Rede Elétrica	Parafuso do Rack Interno
Transformador Isolador A	Rede Elétrica	Entrada da Fonte de 0 – 6,5 kV
		Enrolamento Primário do Transformador Isolador B
Fonte de 0 – 6,5 kV	Enrolamento Primário do Transformador Isolador A Obs.: o terminal terra da fonte está ligado ao parafuso do rack interno	Entrada da Fonte de Corrente
Transformador Isolador B	Enrolamento Secundário do Transformador Isolador A	Saída da Fonte de 0 – 6,5 kV
		Entrada da Fonte de Corrente
Fonte de Corrente	Enrolamento Secundário do Transformador Isolador B	Filamento Emissivo
	Saída da Fonte de 0 – 6,5 kV	

Tabela 4.5 Resumo de todas as conexões elétricas realizadas

4.3 Primeiros Testes de Funcionamento das Fontes e do Estabelecimento das Diferenças de Potencial

Inicialmente, verificamos o funcionamento dos transformadores de isolamento, da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV, da fonte de corrente e das conexões elétricas (cabos, conectores e filtro de linha). Ao ligarmos a entrada do transformador de isolamento A na rede elétrica, provemos alimentação para a fonte de 0 – 6,5 kV, para o enrolamento primário do transformador de isolamento B e, conseqüentemente, para a fonte de corrente.

A primeira tarefa de verificação foi a introdução de uma pequena lâmpada nos bornes de saída da fonte de corrente. Ligamos somente a fonte de corrente e verificamos o range de valores de corrente fornecidos e o limitador de voltagem. A lâmpada acendeu e, ao girarmos o regulador de corrente, observamos variações na intensidade do brilho da lâmpada. Estas variações de intensidade do brilho estavam de acordo com o aumento ou diminuição da intensidade da corrente.



Figura 4.16 Teste inicial de verificação do funcionamento da fonte de corrente

O próximo passo foi ligar a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV. Verificamos o range de valores de voltagem fornecidos e o limitador de corrente (veja figura 4.17). Para esta etapa de verificação, utilizamos uma ponta de prova de alta tensão (tensão de trabalho máxima de 40 kV para DC) e um multímetro digital. Conectamos o terminal terra da ponta de prova ao rack comercial de 19 polegadas (que já está devidamente aterrado, uma vez que a carcaça aterrada da fonte de 30 kV está em contato direto com ele). Colocando a ponta de prova em contato com a fonte de corrente e fazendo a leitura no multímetro digital verificamos que a fonte de corrente é elevada de 0 – 6,5 kV em relação ao terra da rede elétrica à medida que variamos o regulador de voltagem da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.

Finalmente ligamos a fonte de 30 kV. Ao colocar a ponta de prova em contato com o rack interno e fazendo a leitura no multímetro digital, encontramos uma diferença de potencial de 30 kV. Ao colocar a ponta de prova em contato com a fonte de corrente e

fazendo a leitura no multímetro digital, encontramos uma diferença de potencial que varia entre 30 e 36,5 kV à medida que variamos o regulador de voltagem da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV (estas diferenças de potencial estão estabelecidas em relação ao terra da rede elétrica).



Figura 4.17 Fontes de tensão e de corrente em funcionamento

Portanto, estas verificações e medições mostram que todos os equipamentos eletrônicos e todos os isolamentos elétricos estão funcionando de maneira satisfatória, todas as conexões elétricas feitas estão em bom estado e as diferenças de potencial que desejávamos estabelecer foram estabelecidas.



Figura 4.18 Visão panorâmica dos racks interno e externo, do rack comercial 19 polegadas e dos equipamentos eletrônicos

Nota Sobre Segurança:

As altas diferenças de potencial estabelecidas pelas fontes de tensão são fatais para o ser humano. Como citamos anteriormente, os ajustes de tensão e corrente das fontes localizadas no interior do rack interno são realizados através de cilindros de PVC que atravessam uma placa de acrílico.

No entanto, o campo elétrico devido ao acúmulo de cargas no rack interno provoca uma indução de cargas nas superfícies interna e externa do rack externo. Estando a superfície do rack externo eletricamente carregada, o contato físico com esta superfície provocará a passagem de cargas elétricas através do corpo humano.

Suponha que dois materiais condutores estejam eletricamente carregados com carga Q_1 e Q_2 , respectivamente, e que todos os pontos de cada condutor estejam num potencial elétrico V_1 e V_2 , respectivamente. Ao estabelecermos contato elétrico entre eles, provocamos um deslocamento de cargas elétricas de um condutor para o outro de modo que os potenciais elétricos dos dois condutores se tornam iguais [13].

Seguindo o mesmo raciocínio, conectamos uma das extremidades de um fio condutor à superfície externa do rack externo e conectamos a outra extremidade ao rack comercial de 19 polegadas (que está devidamente aterrado). Desta maneira, a superfície externa do rack externo fica neutra e no mesmo potencial elétrico da Terra. Conseqüentemente, o contato físico com a superfície externa do rack externo não mais provocará deslocamentos de carga através do corpo humano.

Obviamente, mesmo que não houvesse contato humano com o rack externo, o aterramento deste seria obrigatório, uma vez que a fase de aceleração exige que a linha de vácuo (que está em contato direto com o rack externo) esteja isolada do rack interno e aterrada.

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

A fonte de tensão de 30 kV – responsável pela fase de aceleração dos íons emitidos pelo filamento emissivo – não foi utilizada neste presente trabalho devido à indisponibilidade de uma tubulação cerâmica para o isolamento elétrico indicado na figura 4.1. Por isso, as diferenças de potencial utilizadas nos estudos de focalização do feixe e detecção da corrente iônica foram estabelecidas pela fonte de tensão de 0 – 6,5 kV nos dois eletrodos pertencentes ao sistema de extração (ver capítulo 3).

O circuito elétrico da figura 4.19 tem por finalidade o estabelecimento da corrente elétrica responsável pelo aquecimento do filamento emissivo (estágio de emissão) e das diferenças de potencial associadas ao estágio de extração dos íons positivamente carregados. Suponha que, num determinado instante, a fonte de corrente esteja mantendo uma diferença

de potencial de 2,5 V para um determinado valor de corrente de aquecimento do filamento emissivo (tanto o valor da corrente elétrica como o valor da voltagem são indicados nos *displays* da fonte de corrente). Além disso, simultaneamente, um dos *displays* da fonte de tensão indica o valor de 3 kV. O circuito elétrico da figura 4.19 mostra que, nestas 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 mantém uma diferença de potencial de 3 kV entre os eletrodos 1 e 2, sendo esta diferença de potencial responsável pelo estágio de extração dos íons provenientes do filamento emissivo.

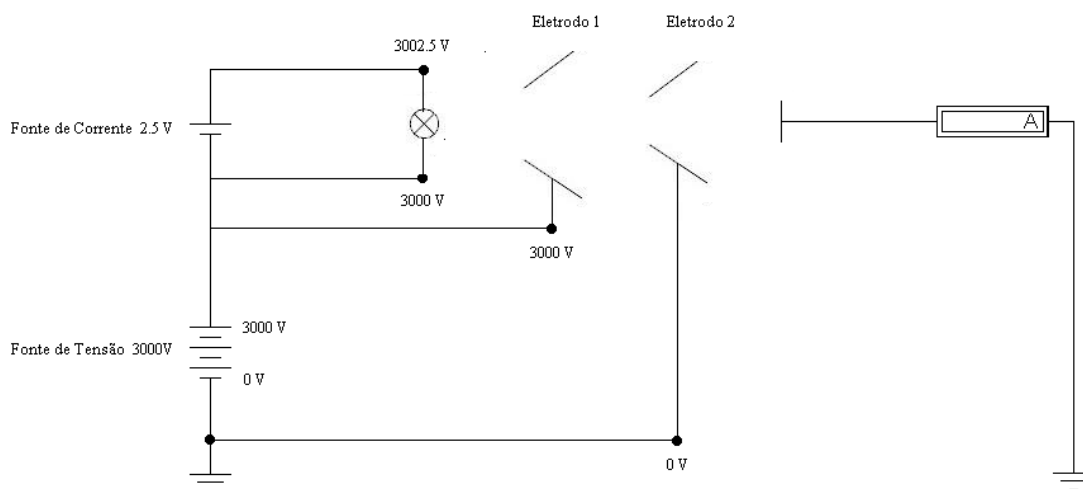


Figura 4.19 Circuito de emissão e extração dos íons positivamente carregados provenientes do filamento emissivo aquecido

A leitura da corrente de emissão (ou corrente termoiônica – corrente elétrica constituída pelos íons positivos emitidos pelo filamento emissivo que se dirigem ao detector) é realizada através do *display* associado ao limitador de corrente da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.

A figura 4.20 apresenta o mesmo circuito de emissão e extração apresentado na figura 4.19; note que tanto o 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 0 – 6,5 kV. Devido à emissão de íons positivos, a substância emissiva (eletricamente neutra antes do início da emissão iônica) torna-se negativamente carregada. A fim de que a substância emissiva permaneça neutra [24], o excesso de cargas negativas deve ser descarregado desta mesma substância; o escoamento do excesso de partículas de carga negativa ocorre devido ao adequado aterramento da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.

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

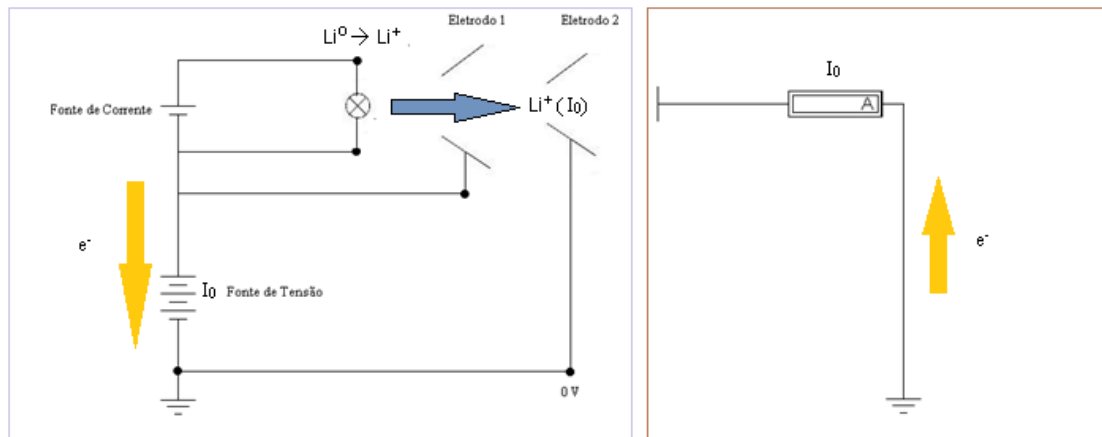


Figura 4.20 Sentido da corrente de emissão iônica e das correntes eletrônicas devidas ao aterramento dos lados esquerdo (quadrado azul) e direito (quadrado marrom) do circuito

Capítulo 5

Sistemas de Vácuo e Detecção do Feixe

Estando concluídas as fases de produção do filamento emissivo, de estabelecimento da corrente elétrica responsável pelo aquecimento do filamento emissivo (estágio de emissão) e de estabelecimento das diferenças de potencial desejadas para a execução do estágio de extração dos íons positivamente carregados, torna-se necessário um estudo sobre a emissão da fonte, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica; tal estudo inclui a aquisição de dados referentes ao comportamento da fonte e às características ópticas do sistema de extração dos íons, tais como corrente de emissão e corrente detectada obtidas em função da corrente de aquecimento do filamento e da voltagem de extração. Para a realização de tal estudo, foi necessária a construção de um eficiente sistema de vácuo e de detecção conectados à fonte termoiônica.

A fonte de íons foi adaptada a uma câmara de detecção através da qual o feixe de íons positivos atinge um detector de corrente. Neste capítulo descreveremos a montagem e o funcionamento do sistema de vácuo, a adaptação da fonte termoiônica à câmara de detecção e a construção do sistema de detecção.

5.1 Sistema de Vácuo e Câmara de detecção

O ambiente adequado para a realização de colisões atômicas deve apresentar valores de densidade molecular extremamente reduzidos (redução de várias ordens de grandeza) em relação ao valor de densidade molecular correspondente ao valor 760 torr da pressão atmosférica (1 Torr é a unidade de pressão definida como a pressão exercida por uma coluna de 1 mm de mercúrio a 0 °C. 760 torr equivalem a 1 atmosfera física ou a 101325 Pa [36]. É uma unidade amplamente usada para especificar os equipamentos de vácuo). A qualidade das informações referentes às propriedades das partículas projétil e das partículas alvo obtidas via processos de colisões atômicas dependem diretamente da qualidade do vácuo obtido nas câmaras e tubulações do acelerador. Concernente às partículas projétil, a redução da densidade molecular é essencial para a diminuição do número de colisões entre as partículas do feixe e as moléculas do ar presentes na tubulação linear à qual o feixe atravessa, colisões estas que resultam na perda de momento das partículas do feixe. Concernente às partículas alvo (no caso de tratar-se de um alvo gasoso), a criação de um novo ambiente gasoso exige a prévia evacuação das moléculas do ar presentes na câmara de colisão [20].

Em nosso sistema, a pressão interna da tubulação linear através da qual o feixe de íons positivos alcança o detector deve ser reduzida a partir do valor de 760 torr até valores da

ordem de 10^{-6} torr (redução de nove ordens de grandeza). A redução da densidade molecular (e, portanto, da pressão) é realizada por meio do escoamento do gás contido no interior da câmara que se quer evacuar, através de um arranjo adequado de bombas de vácuo, tubulações, conexões e válvulas. Tal variação de pressão não pode ser produzida com a atuação de uma única bomba de vácuo. É necessário que, inicialmente, uma bomba de vácuo primário reduza a pressão do valor de 760 torr até valores de pressão pertencentes à faixa denominada de médio vácuo (pressões da ordem de 10^{-2} torr); o bombeamento de um sistema a partir da pressão atmosférica é denominado bombeamento primário. Em seguida, uma bomba de alto vácuo deve reduzir a pressão interna da câmara até valores de pressão pertencentes à faixa denominada de alto vácuo (pressões da ordem de 10^{-6} torr). Neste estágio - no caso de sistemas em que a bomba de alto vácuo é uma bomba de transferência de gás - a bomba de vácuo primário passa a ser responsável pelo recolhimento, compressão e expulsão para a atmosfera do gás a baixa pressão recolhido pela bomba de alto vácuo; a manutenção de uma baixa pressão na saída de uma bomba de vácuo - manutenção esta realizada por outra bomba de vácuo - é denominada “backing”.

A figura 5.1 apresenta o esquema da estrutura (fonte termoiônica, câmara de detecção e detector de corrente) construída com a finalidade de execução dos estudos referentes à emissão, focalização e detecção do feixe, e também do sistema de bombeamento que está acoplado a esta estrutura (os números e letras encontrados entre parênteses no texto a seguir fazem referência à figura 5.1). Na figura 5.2, temos uma foto desta estrutura.

A câmara de detecção (12) é ligada ao sistema de bombas de vácuo através do flange (8). O bombeamento primário é realizado através do funcionamento de uma bomba mecânica de palhetas rotativas (1), à qual é capaz de bombear toda a câmara de detecção (com a fonte termoiônica já acoplada) a partir da pressão atmosférica até valores de pressão da ordem de 10^{-2} torr. A entrada da bomba de vácuo primário é ligada a um sistema de válvulas (manifold) através da válvula (2d) por meio de um tubo com bellow. No início da evacuação do sistema, a bomba difusora deve ficar isolada da câmara de detecção (válvula 7 fechada) e da bomba rotatória (válvula 2b fechada). A bomba rotatória inicia a retirada do gás através da linha de vácuo primário (9b) com a válvula (2e) aberta. A linha de vácuo primário consiste num cano flexível de borracha que contém tubos metálicos em suas extremidades; uma destas extremidades é conectada a um orifício presente no flange (8).

Quando a pressão interna da câmara de detecção atinge valores da ordem de 10^{-2} torr, a bomba mecânica é isolada desta câmara (válvula 2e é fechada) e passa a bombear a bomba difusora através da linha de apoio à difusora (9c) com a válvula (2b) aberta (esta conexão é feita através de um tubo com bellow). Em seguida, a bomba difusora é conectada à câmara de detecção por intermédio da válvula (7). A câmara de detecção passa agora a ser evacuada pela bomba difusora - através da linha de alto vácuo - que, por sua vez, é bombeada pela bomba rotatória. (Uma descrição detalhada do modo de operação do sistema de vácuo acima descrito pode ser encontrada no Apêndice A1).

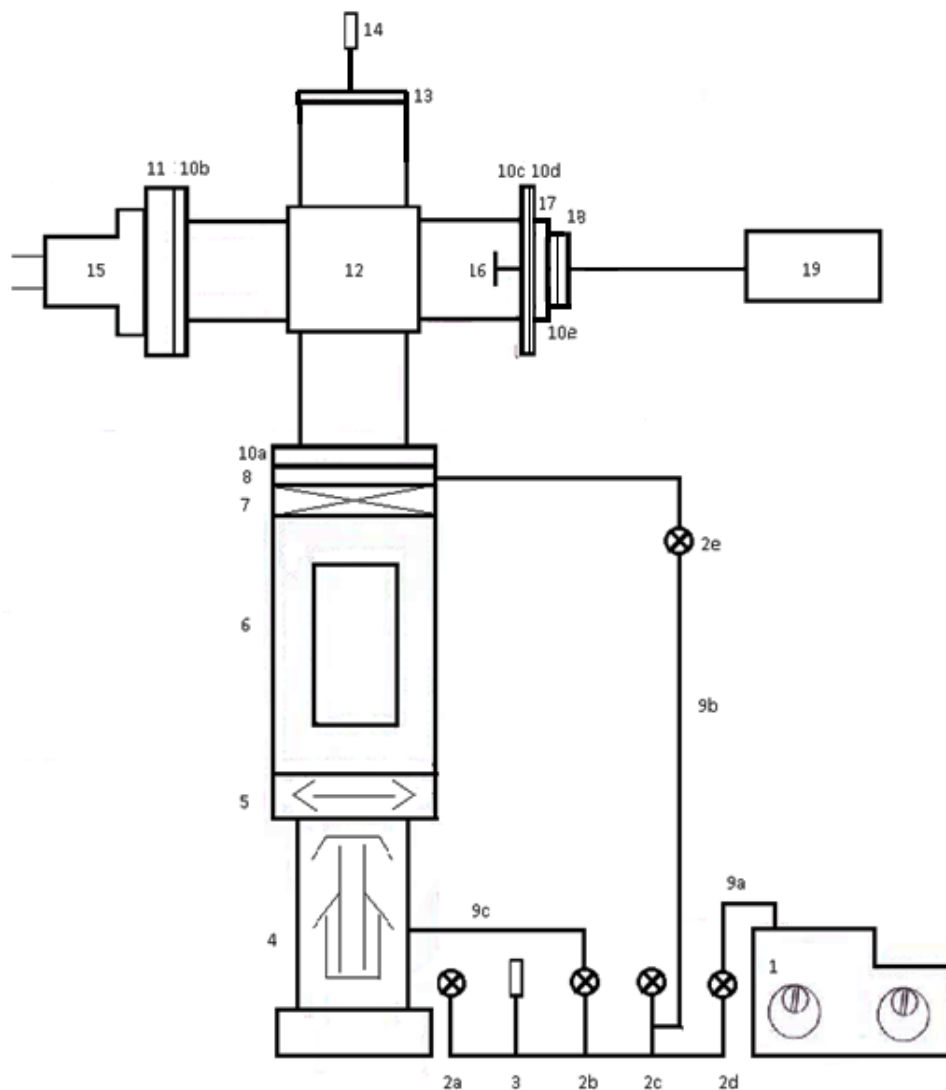


Figura 5.1 Sistemas de vácuo e detecção 1) Bomba mecânica de palhetas rotativas (bomba de vácuo primário), 2) sistema de válvulas de diafragma, a) válvula para entrada de ar, b) válvula para isolar a bomba difusora da bomba mecânica, c) válvula para entrada de ar, d) válvula de conexão entre a bomba mecânica e o sistema de válvulas, e) válvula para a linha de vácuo primário, 3) sensor do medidor de pressão Pirani 4) bomba difusora, 5) baffle, 6) cold trap, 7) válvula borboleta para isolar a bomba difusora da câmara de detecção, 8) flange com orifício para a linha de vácuo primário 9) linhas de vácuo, a) conexão entre bomba mecânica e sistema de válvulas, b) linha de vácuo primário, c) linha de alto vácuo, incluindo linha de apoio à bomba difusora, 10) anéis de ligação, 11) flange de adaptação para a fonte de íons, 12) câmara de detecção (cruz de aço inox de quatro portas), 13) disco metálico com pequeno flange central para encaixe do sensor do medidor de pressão Bayard - Alpert, 14) sensor do medidor de pressão Bayard - Alpert, 15) fonte de íons, 16) detector de corrente, 17) e 18) flanges para conexão do detector de corrente, 19) picoamperímetro



Figura 5.2 Estrutura constituída pela fonte termoiônica e pelos sistemas de vácuo e detecção

A câmara de detecção (12) é constituída por uma cruz (confeccionada em aço inox) de quatro portas, onde cada braço da cruz possui 9,50 cm de comprimento e cada porta possui 9,70 cm de diâmetro interno.

A fonte termoiônica (15) é conectada à porta esquerda da câmara de detecção através de um flange de adaptação (11) projetado por nossa equipe e confeccionado na Oficina Mecânica do DF – UFJF (ver figuras 5.3). Este flange foi usinado a partir de um tarugo de Alumínio (material que, apesar de sua baixa resistência mecânica comparada à resistência mecânica do aço inox, apresenta boa usinagem) e possui 16 cm de diâmetro externo e 7,7 cm de diâmetro interno. A fonte termoiônica é presa neste flange através de parafusos. Da mesma maneira, o flange é apertado contra um anel de ligação inserido na porta esquerda da câmara de detecção através de parafusos (veja figura 5.4).

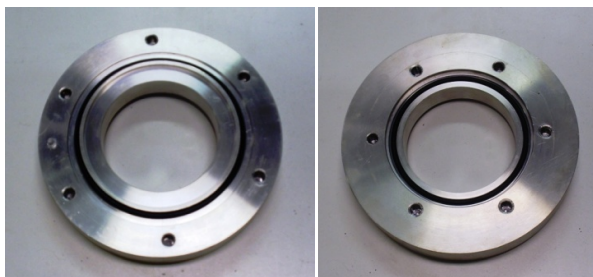


Figura 5.3 Os dois lados do flange (11) construído para a adaptação da fonte termoiônica

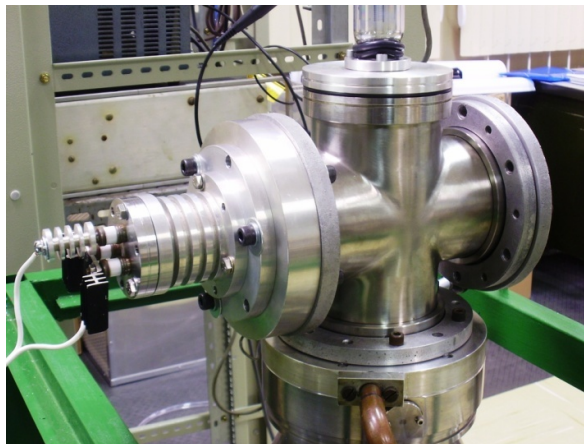


Figura 5.4 Fonte termoiônica (15) conectada à câmara de detecção (12) através do flange (11)

A porta inferior da câmara de detecção está conectada ao sistema de bombeamento através do flange (8), o qual possui um orifício que liga a câmara de detecção à linha de vácuo primário (figura 5.5 (a)). Este flange possui 10,30 cm de diâmetro interno e 18,40 cm de diâmetro externo. Um anel de ligação inserido na porta inferior da câmara de detecção é apertado contra o flange (8) através de parafusos (ver figura 5.5 (b)).



(a)

(b)

Figura 5.5 Flange (8) para conexão da câmara de detecção ao sistema de vácuo

O monitoramento da pressão deste sistema é realizado em dois pontos: para a medição dos valores de pressão durante o estágio de obtenção de médio vácuo, o sensor de um medidor do tipo Pirani (3) está localizado no sistema de válvulas (manifold) próximo à entrada da bomba mecânica (ver figura 5.2); para a medição dos valores de pressão durante o estágio de obtenção de alto vácuo, o sensor de um medidor do tipo Bayard – Alpert (14) está localizado na porta superior da câmara de detecção; este sensor está ajustado sobre um disco (13)

cuidadosamente projetado por nossa equipe e confeccionado na Oficina Mecânica do DF – UFJF. Este disco foi usinado a partir de um tarugo de alumínio e possui 12,0 mm de espessura e 11,40 cm de diâmetro externo (figura 5.6).



Figura 5.6 Disco metálico (13) para conexão do sensor do medidor de pressão Bayard - Alpert à câmara de detecção

Um pequeno flange central é conectado a este disco com a finalidade de proporcionar um melhor ajuste do sensor do medidor Bayard – Alpert à câmara de detecção. Anéis de borracha para vedação (os quais são utilizados em todas as conexões não soldadas) foram também utilizados para impedir que o tubo de vidro do sensor Bayard – Alpert seja danificado (ver figura 5.7).

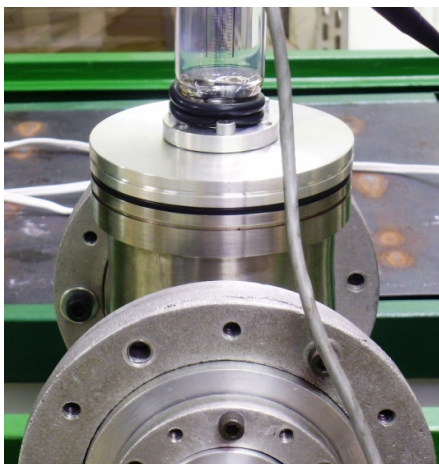


Figura 5.7 Sensor do medidor Bayard - Alpert (14) conectado à câmara de detecção através do disco metálico (13) com pequeno flange central e anéis de borracha para vedação e proteção do sensor

O detector de corrente (16) - responsável pela coleta das partículas positivamente carregadas que compõem o feixe oriundo da fonte termoiônica – está conectado à porta direita da câmara de detecção através de um conjunto formado por dois flanges, três anéis de ligação e um passador elétrico. A saída do passador elétrico está eletricamente conectada a um

picoamperímetro, o que permitirá a leitura dos valores de corrente iônica detectada. Para detalhes da construção do sistema de detecção, queira ver a seção 5.2 deste capítulo.

Antes da montagem dos sistemas de vácuo e detecção, uma limpeza química foi realizada em todos os componentes (tubulações, conexões, braçadeiras, anéis de ligação, anéis de centragem, manifold, flanges, válvulas, discos, bomba difusora, cold trap, baffle) por meio de sabão neutro e banhos de acetona e álcool (com exceção das válvulas). Após a montagem, o sistema foi bombeado para sua degaseificação (dessorção e evaporação).

Para um melhor entendimento do processo de obtenção de vácuo e detecção do feixe, faremos uma breve descrição do funcionamento de alguns dos componentes utilizados nos sistemas de vácuo e detecção do acelerador linear eletrostático.

5.1.1 Bombas de Vácuo

A seleção dos tipos de bombas a serem utilizadas em uma linha de vácuo é baseada nos seguintes parâmetros [37]:

- Pressão mínima que a bomba pode alcançar
- Intervalo de pressões em que a bomba pode ser operada
- Pressão de exaustão/pressão de saída (pressão mínima à qual a bomba deve comprimir o gás para ele ser ou expulso para a atmosfera ou recolhido por outra bomba).
- Capacidade de bombeamento (medida pela velocidade de bombeamento nominal na entrada de gás da bomba)

5.1.1.1 Bomba Mecânica de Palhetas Rotativas (Duplo Estágio)

As bombas mecânicas de palhetas rotativas (veja figura 5.8) são constituídas por um estator cilíndrico que recebe em seu interior um rotor excêntrico (ambos fabricados em aço), o qual é movimentado por um motor elétrico. O rotor possui duas fendas diamétricas nas quais correm duas palhetas de aço que podem deslizar livremente nestas fendas; estas palhetas são forçadas contra as paredes do estator por meio de molas. O estator contém um orifício para a entrada e um orifício para a saída do gás. O orifício de entrada é conectado ao sistema a ser evacuado (através de conexões e tubulações apropriadas) e o orifício de saída é conectado ao sistema de exaustão para a atmosfera; este orifício de saída é fechado por uma válvula (usualmente é uma lâmina de metal que se dobra em uma lateral) imersa em óleo. O estator e o rotor não se tocam, mas mantêm uma distância muito pequena entre si. Um filme de óleo localizado entre eles forma o selo entre as câmaras de entrada e de saída, o qual é denominado selo superior. O óleo também realiza o selo dinâmico nas laterais do conjunto onde as

palhetas encontram a superfície interna do estator. Todo o conjunto estator-rotor é imerso em óleo que, além de selagem, fornece também lubrificação e resfriamento a este conjunto [37].

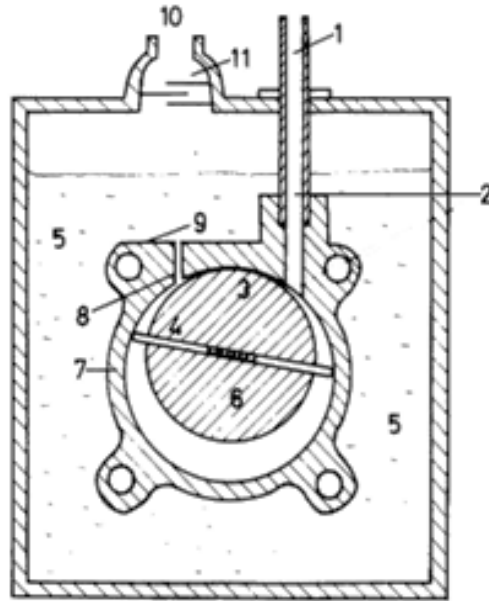


Figura 5.8 Esquema de uma bomba mecânica de palhetas rotativas: 1) conexão entre a entrada de gás da bomba e o sistema a ser evacuado, 2) orifício de entrada de gás, 3) selo superior, 4) palhetas, 5) óleo para lubrificação, selagem e resfriamento, 6) rotor, 7) estator, 8) orifício de saída de gás, 9) válvula imersa em óleo, 10) saída de gás para a atmosfera e 11) filtro para vapor de óleo [38]

A passagem de gás do orifício de entrada para o orifício de saída da bomba é provocada pela transferência de momento linear entre as palhetas e o gás (veja figura 5.9). Quando a palheta A passa pelo orifício de entrada do gás, a câmara a ser evacuada é colocada em contato com a região limitada pelo estator, pelo rotor, pela palheta e pelo selo superior. Este volume, o qual a entrada de gás está em contato, aumenta à medida que a palheta A avança, o que produz uma redução na pressão na câmara que está sendo evacuada. Quando a palheta B passa pelo orifício de entrada, o gás retirado fica isolado entre as duas palhetas A e B. À medida que a rotação continua, o gás isolado passa a ser comprimido pela palheta B até atingir um valor de pressão suficiente para abrir a válvula de saída (pressão de exaustão, a qual deve possuir um valor de pressão ligeiramente maior que a pressão atmosférica); o gás penetra no óleo e é eliminado para a atmosfera [37].

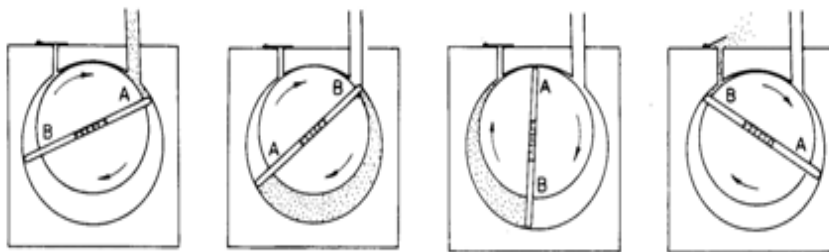


Figura 5.9 Esquema de funcionamento de uma bomba mecânica de palhetas rotativas [38]

Em nossa montagem, utilizamos uma bomba mecânica de palhetas rotativas de velocidade de bombeamento nominal de $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ com intervalo de pressão de trabalho entre 760 torr e pressões da ordem de 10^{-2} torr. Esta bomba (figura 5.10) possui uma conexão em série de dois conjuntos rotor – estator (duplo estágio). Não necessita de cuidados especiais durante seu funcionamento e possui um filtro para vapor de óleo - conectado ao orifício de saída de gás para a atmosfera - o que torna desnecessária a ligação de um conduto para o exterior do laboratório.



Figura 5.10 Bomba mecânica de palhetas rotativas utilizada no sistema de vácuo do acelerador

5.1.1.2 Bomba Difusora Fracionadora e Acessórios

As bombas difusoras são constituídas por um invólucro cilíndrico (revestido por uma serpentina metálica onde circula água), o qual possui a entrada de ar localizada na parte superior (ver figura 5.11) – que deve ser conectada ao sistema que se deseja bombear – e a saída de ar localizada lateralmente – que deve ser conectada à entrada de uma bomba de vácuo primário. No interior deste invólucro cilíndrico encontra-se uma estrutura metálica denominada “castelo” que consiste num sistema de andares de ejetores de vapor de óleo. Uma determinada quantidade de óleo fica depositada no interior desta estrutura. Um aquecedor

elétrico é ajustado na base do corpo da bomba e tem por finalidade o aquecimento do óleo contido no interior desta a uma temperatura suficientemente alta para a formação de vapor deste óleo [37].

Seu funcionamento é baseado na transferência de momento linear das moléculas do vapor de óleo para as moléculas que compõem a atmosfera rarefeita da câmara a ser evacuada (o óleo deve apresentar grande massa molecular e baixa pressão de vapor na temperatura da água de arrefecimento) [39]. Este processo pode ser elucidado através da figura 5.11. O vapor de óleo sobe através do “castelo”, sendo conduzido em direção aos vários andares de ejetores. Devido a uma diferença de pressão relativamente grande entre as regiões interna e externa ao “castelo”, o vapor de óleo é ejetado para a região externa ao “castelo”. Desta maneira, são geradas regiões de jatos cônicos entre os ejetores e a parede interna da bomba. As moléculas do gás a ser bombeado, ao se difundirem para o interior da bomba, são arrastadas para baixo e de encontro às paredes da bomba pelos sucessivos jatos de vapor de óleo [39]. Uma vez que a área entre cada andar de ejetores e a parede interna da bomba é decrescente, o gás bombeado é cada vez mais comprimido à medida que é arrastado para baixo pelos sucessivos jatos de vapor de óleo. Após serem arrastadas pelos jatos de óleo oriundos do andar inferior de ejetores, as moléculas do gás são retiradas pela bomba de apoio. Ao mesmo tempo, ao colidirem com as paredes refrigeradas (devido à circulação de água através da serpentina) da bomba, os vapores de óleo condensam e escorrem de volta para o interior do “castelo”, onde recomeçam o ciclo [37].

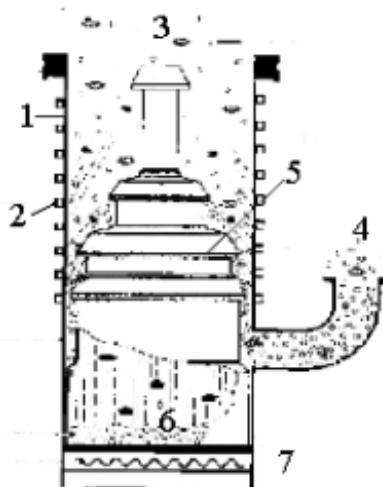


Figura 5.11 Estrutura e funcionamento de uma bomba difusora: 1) invólucro metálico cilíndrico, 2) serpentina metálica, 3) entrada de ar, 4) saída de ar, 5) “Castelo” ou sistema de andares de ejetores de vapor de óleo, 6) vapor de óleo, 7) aquecedor elétrico [40]

Para evitar a retro-migração de vapor de óleo a partir do jato superior para fora da bomba difusora – o que contaminaria a câmara que está sendo evacuada – estas devem estar

equipadas com três acessórios condensadores: a capa-armadilha, o baffle e o cold trap (a utilização dos condensadores faz com que a pressão final no interior da câmara de vácuo seja aproximadamente igual à pressão de vapor do óleo na temperatura do condensador [41]). A capa armadilha é uma estrutura alocada imediatamente acima do andar superior de ejetores, sendo resfriada através do contato térmico com a parede refrigerada da bomba [37]. O baffle é constituído por uma série de placas refrigeradas por água – colocadas acima da entrada da bomba difusora – que recondensam o fluido, devolvendo-o para o interior do “castelo”. Estas placas são arranjadas de tal modo que as moléculas de vapor de óleo que estejam a migrar para a câmara de vácuo colidam pelo menos uma vez com a superfície arrefecida das placas [39]. Outro acessório condensador é o cold trap; trata-se de uma superfície resfriada com N_2 líquido, o que a torna muito eficiente para a retenção de vapores de óleo que não tenham sido recondensados no baffle. Além disso, sua utilização permite o alcance de valores mais baixos de pressão, uma vez que provoca a redução da pressão de vapor do óleo. Este acessório deve ser alocado imediatamente acima do baffle [41]. A figura 5.12 apresenta o esquema de uma bomba difusora equipada com estes acessórios condensadores.

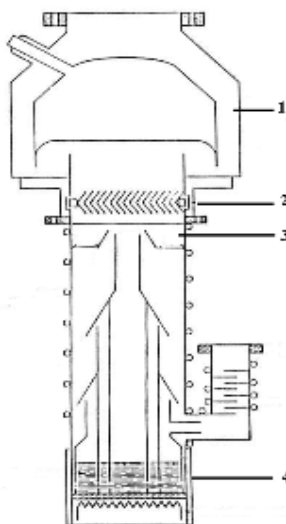


Figura 5.12 Esquema de bomba difusora fracionadora com acessórios para condensação: 1) cold trap, 2) baffle, 3) capa - armadilha, 4) fracionador [39]

Observe que a montagem representada no diagrama da figura 5.1 permite o bombeamento inicial da câmara de vácuo pela bomba mecânica independente da bomba difusora (linha de vácuo primário 9b). Isto se deve ao fato de que a bomba difusora inicia seu bombeamento a partir do valor de pressão mais baixo atingido pela bomba mecânica. A bomba difusora nunca deve ser ligada antes que se estabeleça o vácuo primário na câmara, caso contrário, o óleo da bomba sofre combustão devido ao seu aquecimento na presença do ar. Quando a bomba difusora é ligada à câmara, a bomba mecânica deve ser isolada desta câmara e conectada à saída da bomba difusora (queira ver Apêndice A1).

Em nossa montagem, utilizamos uma bomba difusora fracionadora (na qual o espaço interno de cada andar de ejetores é separado por uma parede cilíndrica de modo que as frações do óleo com menor pressão de vapor sejam utilizadas como vapor no andar central (superior), o qual está localizado na região de mais baixa pressão da bomba) com três andares de ejetores e 37,0 cm de altura (figura 5.13).

Sua velocidade de bombeamento nominal S pode ser calculada através da expressão

$$S = H_0 C \quad (5.1)$$

onde C é a condutância da abertura da entrada de ar da bomba e H_0 – denominado fator de velocidade – é um fator que depende do porte da bomba [41]. Para uma abertura cilíndrica da entrada de ar, a equação 5.1 torna-se

$$S = 11,6 H_0 \pi r^2 \text{ (l/s)} \quad (5.2)$$

onde r deve ser expresso em centímetros (para a dedução da equação 5.2, queira ver [42]). Sendo $r = 5,25$ cm e $H_0 = 0,2$ para a bomba difusora utilizada em nossa montagem, o valor de sua velocidade de bombeamento deveria ser $S = 200$ l/s. No entanto, a utilização dos acessórios condensadores (ver figuras 5.14) torna a velocidade de bombeamento real muito menor do que este valor calculado. Admite-se que a introdução de condensadores de dimensões adequadas à bomba difusora reduz a velocidade desta pelo menos a metade [41].



Figura 5.13 Bomba difusora fracionadora utilizada no sistema de vácuo do acelerador

A pressão mínima que uma bomba difusora pode alcançar é determinada pela pressão de vapor do óleo utilizado na temperatura da água de arrefecimento (embora não tenhamos preenchido o cold trap com N_2 líquido, tanto o baffle como a capa- armadilha foram refrigerados por água). Entretanto, na prática, a pressão mínima alcançada ocorre quando a quantidade de gás proveniente de degaseificações e vazamentos torna-se igual à máxima taxa

à qual a bomba consegue retirar o ar. Durante as medições, obtivemos pressões com valores da ordem de 10^{-6} torr.

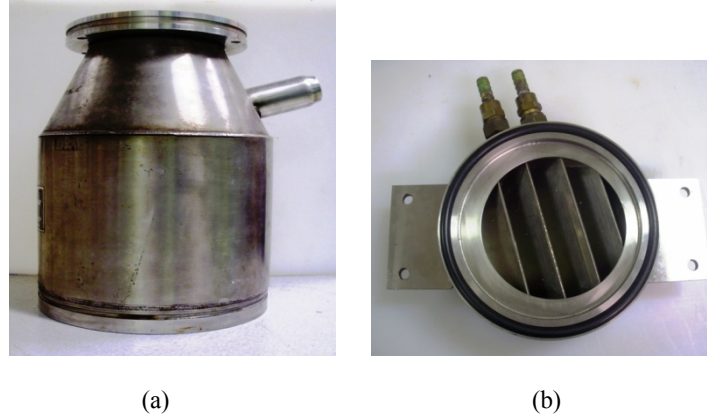


Figura 5.14 Acessórios condensadores utilizados no sistema de vácuo do acelerador: a) cold trap e b) baffle

5.1.2 Medidores de Pressão

Como citado anteriormente, uma redução de nove ordens de grandeza no valor da pressão interna de uma câmara não pode ser executada através da ação de uma única bomba de vácuo. Analogamente, a medição da pressão em um sistema de vácuo obriga a utilização de diferentes tipos de medidores para determinados intervalos de valores de pressão; o intervalo de pressão no qual um medidor pode ser utilizado deriva do princípio físico de funcionamento deste medidor.

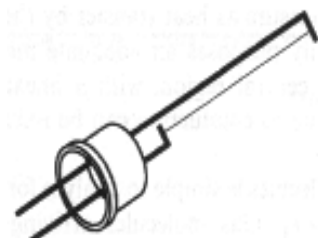
A seleção dos tipos de medidores a serem utilizados em uma linha de vácuo é baseada nos seguintes critérios [37]:

- Intervalo de pressão a ser medido
- Medição da pressão total ou parcial
- Dependência entre a leitura do medidor e a espécie de gás contido na câmara
- Precisão da medida

5.1.2.1 Medidor Pirani

O princípio físico de funcionamento de um medidor Pirani é a condutividade térmica dos gases. O sensor de um medidor Pirani é constituído por um filamento colocado no interior de um invólucro metálico, o qual é acoplado ao sistema de vácuo; estando o filamento em contato com a atmosfera cuja pressão se quer medir, este é aquecido por uma corrente elétrica; devido à presença de gás, o filamento irá dissipar energia térmica por condução. Sendo a condutividade térmica dos gases proporcional à pressão [37], a temperatura do filamento cresce com a diminuição da densidade molecular. As variações na temperatura do filamento (provocadas pelas variações de pressão no interior da câmara) provocam variações na resistência elétrica do filamento.

O circuito elétrico de medição associado ao sensor é uma ponte de Wheatstone, onde o filamento em questão é um dos braços desta ponte. Com este arranjo, um aumento na resistência do filamento (que ocorre com a diminuição da pressão) provoca um aumento na intensidade da corrente elétrica que atravessa o galvanômetro da ponte de Wheatstone, cuja escala é calibrada diretamente em unidades de pressão [42].



(a)



(b)

Figura 5.15 a) Desenho de um sensor tipo Pirani [43]; b) sensor Pirani utilizado no sistema de vácuo do acelerador

Uma vez que a condutividade térmica varia conforme a espécie de gás, a leitura de um medidor Pirani depende da espécie de gás contido na câmara; geralmente, sua escala é calibrada para N_2 . Além disso, a leitura da pressão total é mais confiável no intervalo entre $5 \cdot 10^{-3}$ torr e $5 \cdot 10^{-1}$ torr [42]. São caracterizados também pela elevada resistência mecânica, robustez e facilidade de manuseio.

5.1.2.2 Medidor Bayard – Alpert

No medidor Bayard – Alpert, a medição da pressão é efetuada através da ionização das moléculas do gás (produzida pelas colisões entre elétrons emitidos de um filamento aquecido e as moléculas do gás) e da detecção da correspondente corrente iônica por meio de um eletrodo coletor; a corrente iônica detectada é proporcional à densidade molecular contida na câmara que está sendo evacuada [42].

O sensor de um medidor Bayard – Alpert possui um filamento (catodo termoiônico) que, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, emite os elétrons responsáveis pela ionização das moléculas do gás. Externamente a esta filamento emissor de elétrons encontra-se uma grade metálica em forma de hélice cilíndrica, a qual é polarizada positivamente em relação ao filamento emissor. No interior desta grade, um filamento polarizado negativamente em relação à grade e ao catodo termoiônico é responsável pela coleta das moléculas ionizadas. A função da grade metálica é aumentar a eficiência do processo de ionização através da extensão do caminho percorrido pelos elétrons [37]. Alguns medidores possuem dois filamentos emissores para que não seja necessária a abertura da câmara de vácuo para a realização da troca do sensor caso ocorra a queima de um filamento. Toda esta estrutura é encapsulada dentro de um tubo de vidro, o qual deve ser cortado adequadamente para que se efetue sua conexão ao sistema de vácuo. Um desenho da estrutura descrita pode ser visto na figura 5.16 (a).

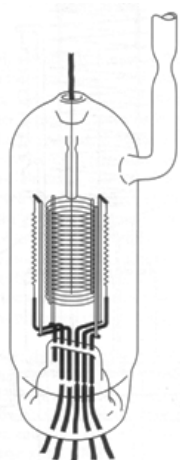


Figura 5.16 a) Esquema de um sensor tipo Bayard – Alpert [43]; b) Sensor Bayard – Alpert utilizado no sistema de vácuo do acelerador

Este arranjo (no qual o coletor é um filamento) objetiva a diminuição da ejeção de elétrons do coletor provocada por raios X moles provenientes da colisão entre os elétrons

oriundos do filamento emissivo e a grade, fenômeno este que interfere na leitura da corrente detectada pelo coletor [37].

Uma vez que a eficiência de ionização varia conforme a espécie de gás, a sensibilidade de um medidor Bayard – Alpert depende da espécie de gás contido na câmara que se deseja evacuar; geralmente, estes medidores são calibrados com N_2 . A pressão total medida pelo medidor Bayard – Alpert utilizado em nossa montagem compreende o intervalo entre 10^{-4} torr e 10^{-9} torr.



Figura 5.17 Escalas dos medidores Pirani (acima) Bayard – Alpert (abaixo)

5.2 Sistema de detecção

A detecção de parte das partículas positivamente carregadas emitidas pelo filamento emissivo e extraídas através de diferenças de potencial variáveis (estabelecidas nos dois eletrodos de extração) é realizada de uma maneira direta. Em nosso sistema de detecção, um anteparo metálico aterrado (previamente conectado a um picoamperímetro através de um passador elétrico fixado a um flange) intercepta parte do feixe de partículas emitidas, tornando-se, portanto, positivamente carregado. Em seguida, rapidamente o anteparo é descarregado (devido ao seu adequado aterramento) e o medidor de corrente efetua medições da corrente eletrônica equivalente ao número de íons que colidiram com o anteparo por segundo (veja figura 4.20).

Para a realização dos estudos relacionados à focalização do feixe e à detecção da corrente iônica, utilizamos dois anteparos que consistem em duas folhas circulares de Alumínio; um dos anteparos (o qual denominaremos de anteparo A) possui 3,50 cm de diâmetro e o outro anteparo (o qual denominaremos de anteparo B) possui 6,70 cm de diâmetro. Estes anteparos estão eletricamente isolados da câmara de detecção por meio de um passador elétrico (estrutura constituída por um tubo metálico revestido por teflon (material

isolador elétrico) – nome comum da resina sintética politetrafluoretileno [35] – que permite que as conexões elétricas entre o interior e o exterior da câmara de detecção estejam eletricamente isoladas das paredes metálicas desta mesma câmara) fixado a um flange projetado por nossa equipe e confeccionado na Oficina Mecânica do DF – UFJF. Este flange foi usinado a partir de um tarugo de alumínio e possui 6,0 cm de diâmetro externo. A figura 5.18 apresenta duas fotos deste flange com o passador elétrico inserido e o anteparo A conectado.

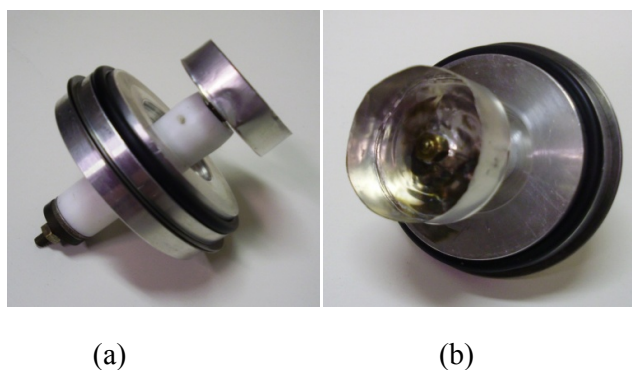


Figura 5.18 Flange com passador elétrico fixo e anteparo A conectado para os estudos de focalização do feixe e detecção da corrente iônica

O flange com passador elétrico fixo está conectado ao flange de adaptação mostrado na figura 5.19 (a) (o qual possui 11,45 cm de diâmetro externo e 5,30 cm de diâmetro interno) por meio de um anel de ligação e parafusos. O conjunto formado pela união destes dois flanges é conectado à porta direita da câmara de detecção através de dois anéis de ligação unidos entre si por parafusos. A figura 5.19 (b) mostra uma foto do conjunto formado por estes dois flanges do sistema de detecção com o anteparo B conectado.

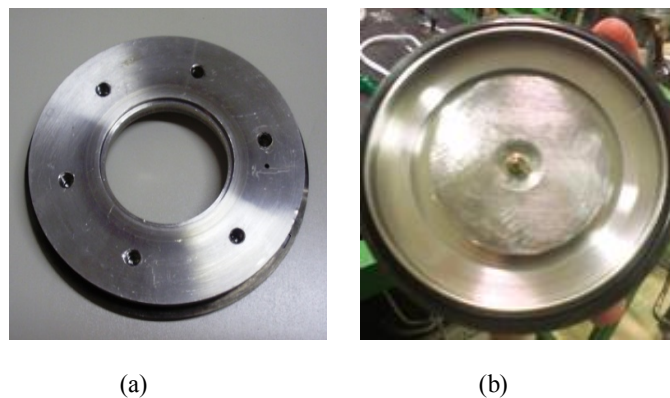


Figura 5.19 a) Flange de adaptação; b) conjunto formado pelos dois flanges do sistema de detecção (flange com passador elétrico fixo e flange de adaptação) com o anteparo B conectado

Estando o sistema de detecção (flange com passador elétrico fixo, flange de adaptação, passador elétrico e anteparo) conectado à porta direita da câmara de detecção, a distância entre o filamento emissor e o anteparo responsável pela detecção da corrente é de aproximadamente 24 cm.

A leitura da corrente iônica detectada pelos anteparos A e B é realizada através de um picoamperímetro Keithley modelo 6845, o qual é ligado à rede elétrica convencional (que fornece, neste caso, voltagem alternada de valor eficaz 110 V e aterramento) por meio de um cabo próprio do picoamperímetro. A transmissão do sinal a ser medido pelo picoamperímetro é realizada através de um cabo coaxial (próprio do medidor de corrente elétrica) que conecta eletricamente o passador elétrico ao picoamperímetro. As figuras 5.20 apresentam fotos do painel frontal (figura 5.20 (a)) e traseiro (figura 5.20 (b)) do picoamperímetro utilizado na medição da corrente iônica detectada. A figura 5.21 mostra o sistema de detecção conectado à porta direita da câmara de detecção.



Figura 5.20 Painéis (a) frontal e (b) traseiro do picoamperímetro utilizado na medição da corrente iônica detectada (o cabo coaxial é conectado ao picoamperímetro através de uma conexão BNC situada no painel traseiro do medidor)

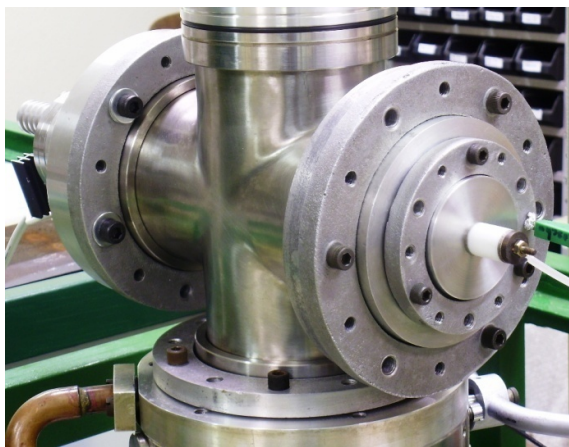


Figura 5.21 Sistema de detecção conectado à porta direita da câmara de detecção (o cabo coaxial está conectado ao passador elétrico)

5.3 Aspectos Gerais Concernentes ao Funcionamento do Sistema de Vácuo e à Obtenção de Valores de Pressão Pertencentes à Faixa de Alto Vácuo

Após a realização da limpeza química em todos os componentes do sistema de vácuo (tubulações, conexões, braçadeiras, anéis de ligação, anéis de centragem, manifold, flanges, válvulas, discos, bomba difusora, cold trap, baffle) e em alguns componentes do sistema de detecção (anteparos A e B e passador elétrico) por meio de sabão neutro e banhos de acetona e álcool (com exceção das válvulas e do passador elétrico), passamos à etapa de montagem efetiva dos sistemas de vácuo e detecção conforme apresentados nas figuras 5.1 e 5.2.

Esta montagem envolveu não somente as conexões descritas no início do tópico 5.1, mas também a conexão elétrica entre os bornes da fonte termoiônica e a fonte de corrente, a construção do sistema de circulação de água para o resfriamento da bomba difusora fracionadora e de seus acessórios (capa armadilha e baffle) e as conexões elétricas envolvendo o sensor do medidor de pressão Bayard – Alpert. (Devido à indisponibilidade de N₂ líquido, não foi possível preencher o cold trap com tal arrefecedor).

Após a montagem dos sistemas de vácuo e detecção, a câmara foi bombeada para sua degaseificação (dessorção e evaporação). Seguindo o procedimento apresentado no apêndice A1, verificamos o correto funcionamento das bombas (bomba mecânica de palhetas rotativas e bomba difusora), das válvulas e dos medidores de pressão; verificamos a qualidade das tubulações, das conexões realizadas através dos flanges de adaptação e dos anéis de vedação utilizados. As repetidas verificações realizadas por nossa equipe nos permitiram concluir que:

- Pressões com valores da ordem de 10^{-6} torr (valores de pressão adequados para os estudos de emissão e detecção a serem realizados) foram facilmente obtidas no interior da câmara de detecção.
- O tempo de bombeamento necessário para se atingir valores de pressão da ordem de 10^{-6} torr no interior da câmara de detecção são relativamente curtos (menos de duas horas), o que permite a realização de descompressões durante o período de medições.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Neste capítulo vamos descrever as diversas medições que foram realizadas referentes à emissão da fonte termoiônica, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica, apresentar gráficos e tabelas referentes aos resultados obtidos e discutir estes resultados com o objetivo de encontrar quais são as configurações mecânicas e elétricas que otimizam o funcionamento da fonte termoiônica e dos sistemas de extração e detecção.

Este estudo pode ser separado em duas etapas. A primeira etapa consiste na execução dos procedimentos de pré - operação que devem ser realizados após a inserção de um novo filamento emissivo na fonte termoiônica; esta etapa abrange os procedimentos de rotina que visam preparar tanto o filamento emissivo como o ambiente da câmara de detecção para a etapa operacional. A segunda etapa consiste na realização das medições concernentes à emissão, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica.

6.1 Procedimentos de Pré - Operação

Após a inserção de um novo filamento emissivo na fonte termoiônica e o fechamento da câmara de detecção, inicia-se o bombeamento desta câmara a fim de se alcançar valores de pressão interna pertencentes à faixa de alto vácuo para que se possa iniciar o processo de ativação da fonte termoiônica.

Quando valores de pressão próximos a $1,5 \times 10^{-5}$ torr são atingidos, a fonte de corrente é ligada e a intensidade da corrente de aquecimento do filamento é monitorada através de um dos *displays* da fonte de corrente. À medida que aumentamos a intensidade da corrente de aquecimento (este aumento deve ser realizado lenta e gradualmente a fim de evitar danos ao filamento) observamos o crescimento dos valores da pressão no interior da câmara de detecção. Este aumento de pressão se deve à evaporação da água destilada utilizada na preparação da substância emissiva e à dessorção provocada pelo aquecimento das tubulações do acelerador, aquecimento este resultante da absorção da radiação térmica (emitida pelo filamento aquecido) por parte da tubulação (o fenômeno da dessorção consiste na retirada de moléculas adsorvidas - na superfície interna da câmara, tubulações e conexões - devido à atuação de forças moleculares do tipo Van der Waals ou ligações químicas; a dessorção é um processo termicamente ativado [37]).

Neste processo de preparação do ambiente de vácuo no interior da câmara de detecção, cada aumento de uma unidade na intensidade da corrente de aquecimento do filamento

emissivo é realizado somente após a pressão no interior da câmara de detecção atingir valores menores que $1,5 \times 10^{-5}$ torr. O aumento na intensidade da corrente de aquecimento é realizado até que seja atingido o valor de 14 A (intensidades de corrente superiores ao valor de 14 A provocam danos ao filamento emissivo devido ao seu aquecimento excessivo); uma vez atingido este valor de corrente, espera-se o estabelecimento do valor de pressão desejado (valor da ordem de 10^{-6} torr).

Este procedimento nos permite também analisar as conexões mecânicas e elétricas da fonte termoiônica; diversos problemas decorrentes da montagem mecânica e do aquecimento da fonte - tais como o isolamento elétrico entre as plataformas superior e inferior da estrutura interna da fonte e a posição correta do filamento emissivo de modo que este filamento realize o único contato elétrico entre estas duas plataformas - foram detectados e solucionados. A execução de tais reparações 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 referentes à emissão da fonte termoiônica, à focalização do feixe extraído e à detecção da corrente iônica.

6.2 Emissão da Fonte Termoiônica

Após o estabelecimento do valor de pressão desejado no interior da câmara de detecção (valor da ordem de 10^{-6} torr), a fonte de corrente é desligada e espera-se o resfriamento do filamento emissivo (~ 30 minutos). Após o resfriamento do filamento emissivo, a fonte de tensão de 0 – 6,5 kV é ligada e sua voltagem de saída é mantida constante no valor 1 kV; com a manutenção da diferença de potencial extratora entre os dois eletrodos do sistema de extração (figura 4.19) no valor de 1 kV, a fonte de corrente é novamente ligada e iniciamos o estudo da variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo (como explicado no tópico 4.4, a leitura da corrente de emissão – constituída pelos íons positivos emitidos pelo filamento emissivo que se dirigem ao detector) é realizada através do *display* associado ao limitador de corrente da fonte de tensão de 0 – 6,5 kV). A tabela 6.1 e a figura 6.1 apresentam os resultados obtidos nestas medições para os dois filamentos emissivos preparados segundo os procedimentos descritos nos tópicos 3.2 e 3.4. Cada dado é obtido após intervalos de tempo suficientes para que o valor da corrente de emissão se estabilize para cada um dos valores crescentes de corrente de aquecimento aplicados ao filamento emissivo.

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

Tabela 6.1 Correspondência entre os valores da corrente de aquecimento do filamento emissivo e os valores de corrente de emissão da fonte termoiônica para os filamentos 1 (figuras 3.12) e 2 (figuras 3.13) com tensão de extração fixa em 1 kV

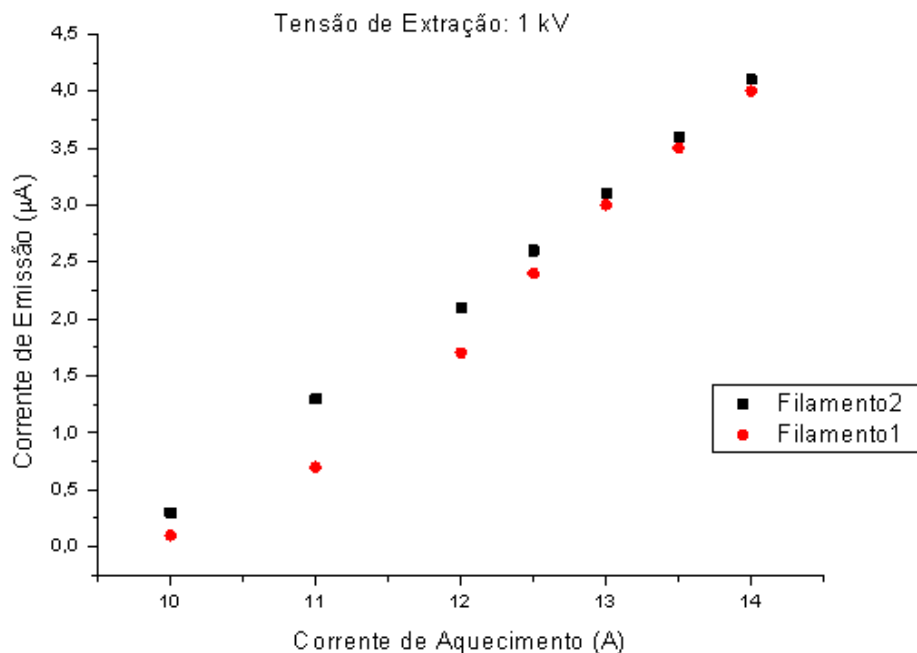


Figura 6.1 Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo para os filamentos 1 (figuras 3.12) e 2 (figuras 3.13) com tensão de extração fixa em 1 kV

Pela tabela 6.1, observa-se que os valores da intensidade 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 da corrente de emissão é prejudicada pelas limitações de leitura da própria fonte de tensão de 0 – 6,5 kV.

Pelo gráfico apresentado na figura 6.1, observa-se que o crescimento da intensidade da corrente de emissão acompanha o crescimento da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo. Levando em consideração o fato de que desejamos evitar o aquecimento excessivo do filamento emissivo, o valor de corrente de aquecimento 14 A é o que otimiza o funcionamento da fonte termoiônica.

A lei de Child – Langmuir

$$I = k V^{3/2} \quad [21] \quad (6.1)$$

estabelece uma proporcionalidade entre a corrente de emissão máxima I que pode ser transmitida entre dois eletrodos planos e paralelos no vácuo e a tensão de extração V – estabelecida entre estes dois eletrodos – elevada ao fator $3/2$ [44]. Esta lei se aplica, em aproximação, a eletrodos de diferentes geometrias [45]. Ao variarmos a tensão de extração entre os dois eletrodos do sistema de extração (figura 4.19), mantendo fixo o valor de corrente de aquecimento do filamento emissivo (14 A), obtivemos os gráficos das figuras 6.2 e 6.3 nos quais a lei de Child – Langmuir pode ser observada (o expoente $3/2$ pode ser explicitado através do valor do coeficiente angular da reta obtida com os dados coletados - corrente de emissão e tensão de extração - dispostos em um gráfico com escala log – log) para os dois filamentos emissivos preparados segundo os procedimentos descritos nos tópicos 3.2 e 3.4. Cada ponto do gráfico é obtido após intervalos de tempo suficientes para que o valor da corrente de emissão se estabilize para cada um dos valores crescentes de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração.

Pelos gráficos apresentados nas figuras 6.2 e 6.3, observa-se o crescimento da intensidade da corrente de emissão segundo a lei de Child – Langmuir (com pequeno desvio) à medida que aumentamos os valores da voltagem de extração.

Portanto, as medições concernentes à emissão da fonte termoiônica (variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica em função da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo e da tensão de extração entre os dois eletrodos do sistema de extração) nos permitem concluir que o aumento da máxima intensidade de corrente de emissão pode ser obtido através do aumento dos valores de tensão aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração e da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo.

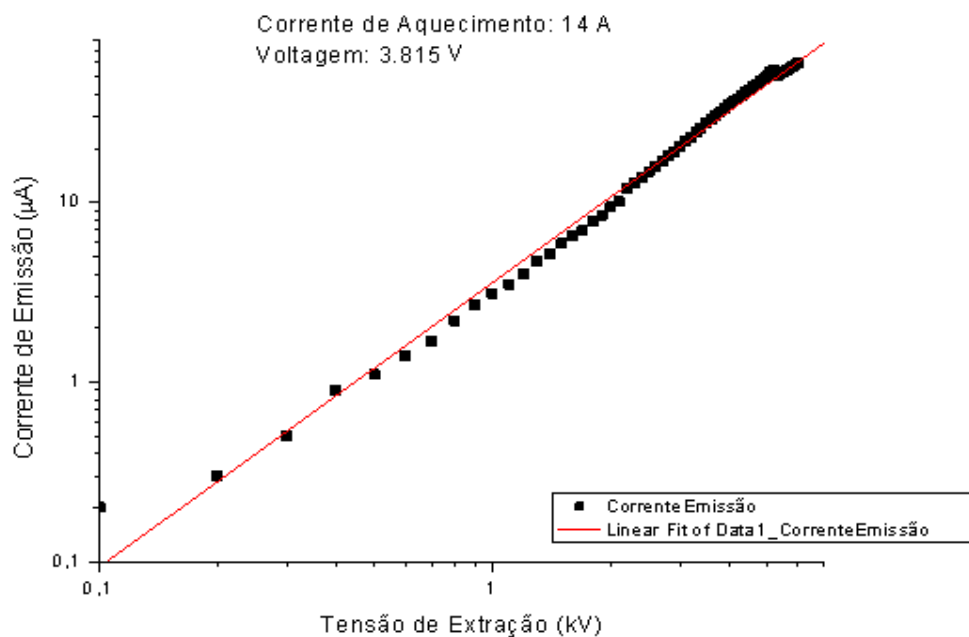


Figura 6.2 Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica para o filamento 1 (figuras 3.12) em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração (coeficiente angular da reta: 1,58 com erro 0,02 – Scientific Graphing and Analysis Software Origin 7.0)

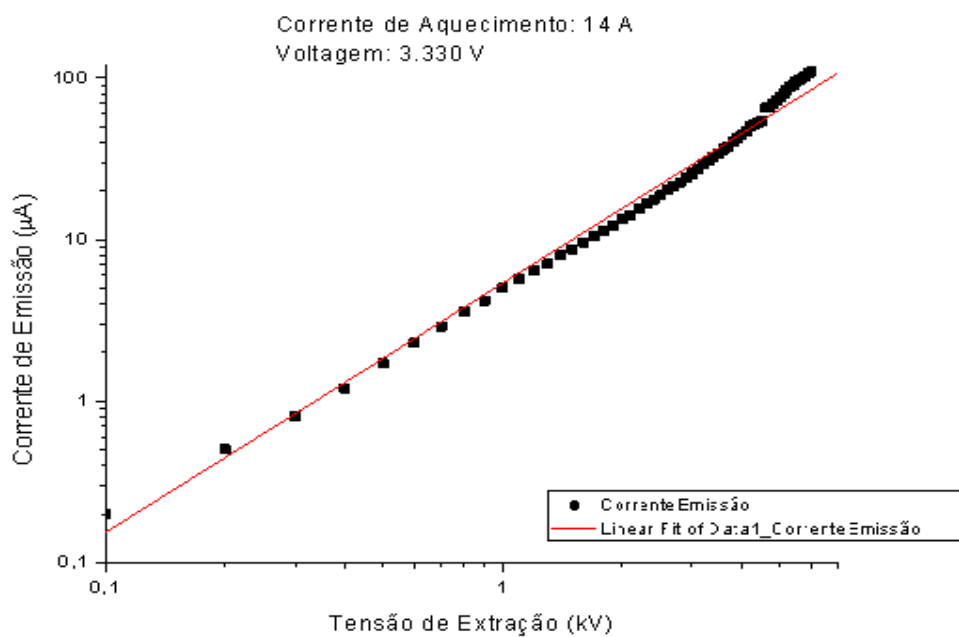


Figura 6.3 Variação da intensidade da corrente de emissão da fonte termoiônica para o filamento 2 (figuras 3.13) em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração (coeficiente angular da reta: 1,54 com erro 0,02 – Scientific Graphing and Analysis Software Origin 7.0)

6.3 Focalização do Feixe Extraído e Detecção da Corrente Iônica

A intensidade da corrente de emissão (para valores fixos de corrente de aquecimento do filamento emissivo e de 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 por campos eletrostáticos – na região entre os eletrodos carregados do sistema de extração modifica a trajetória das partículas eletricamente carregadas, provocando a deflexão destas partículas quando estas passam de uma região equipotencial para outra; a atuação das forças elétricas (perpendiculares às superfícies equipotenciais em cada ponto onde estas superfícies estão definidas) sobre as partículas carregadas determinam a abertura angular do feixe iônico, grandeza esta que interfere diretamente na detecção das partículas constituintes deste feixe. Assim, uma lente eletrostática (conjunto formado por eletrodos eletricamente carregados e pelas superfícies equipotenciais associados aos parâmetros físicos destes eletrodos) pode possuir uma ação focalizadora ou divergente (ação que maximiza ou minimiza, respectivamente, a eficiência no transporte das partículas carregadas e sua detecção) sobre o feixe oriundo do filamento emissivo.

As propriedades focais de uma lente eletrostática dependem da geometria, das dimensões e do número de eletrodos presentes na lente, bem como do espaçamento e das voltagens aplicadas entre eles.

Como descrevemos no capítulo 3, o processo de extração dos íons positivos emitidos a partir do aquecimento do filamento emissivo é realizado através da disposição espacial de dois eletrodos eletricamente carregados, os quais apresentam formato cônico e abertura central. O esquema da figura 3.7 mostra o arranjo espacial, a distância intersticial e o diâmetro da abertura central de cada eletrodo pertencente ao sistema de extração (note que o sistema de extração, apesar de apresentar simetria cilíndrica, contém eletrodos que não possuem as mesmas dimensões).

A quantidade e as dimensões dos eletrodos constituintes do sistema de extração da fonte termoiônica são fixas, assim como a distância de espaçamento entre eles; por esta razão, as propriedades de focalização do feixe e a detecção da corrente iônica foram estudadas através da modificação da geometria do sistema de extração e dos valores da voltagem de extração aplicados entre os eletrodos deste sistema.

A geometria do sistema de extração afeta a distribuição das superfícies equipotenciais na região entre os eletrodos que compõem este sistema. Considerando que o filamento emissivo constitui uma parte integrante do primeiro eletrodo de extração, simulações realizadas através do software SIMION 7.0 para diversas configurações deste filamento mostraram que a posição da parte superior do filamento emissivo em relação à extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração altera profundamente a distribuição das superfícies equipotenciais na região entre os dois eletrodos, e conseqüentemente, modifica as propriedades de focalização do feixe e a intensidade da corrente iônica detectada.

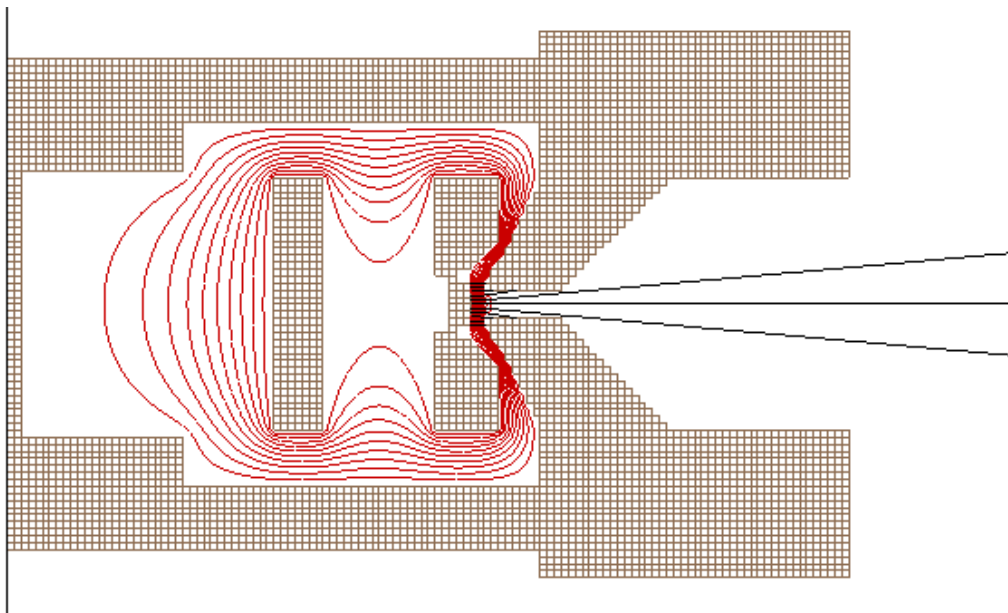


Figura 6.4 Distribuição de superfícies equipotenciais (linhas vermelhas) para a geometria na qual a porção superior do filamento emissivo está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração; tal configuração transforma o sistema de extração em uma lente eletrostática divergente (SIMION 7.0)

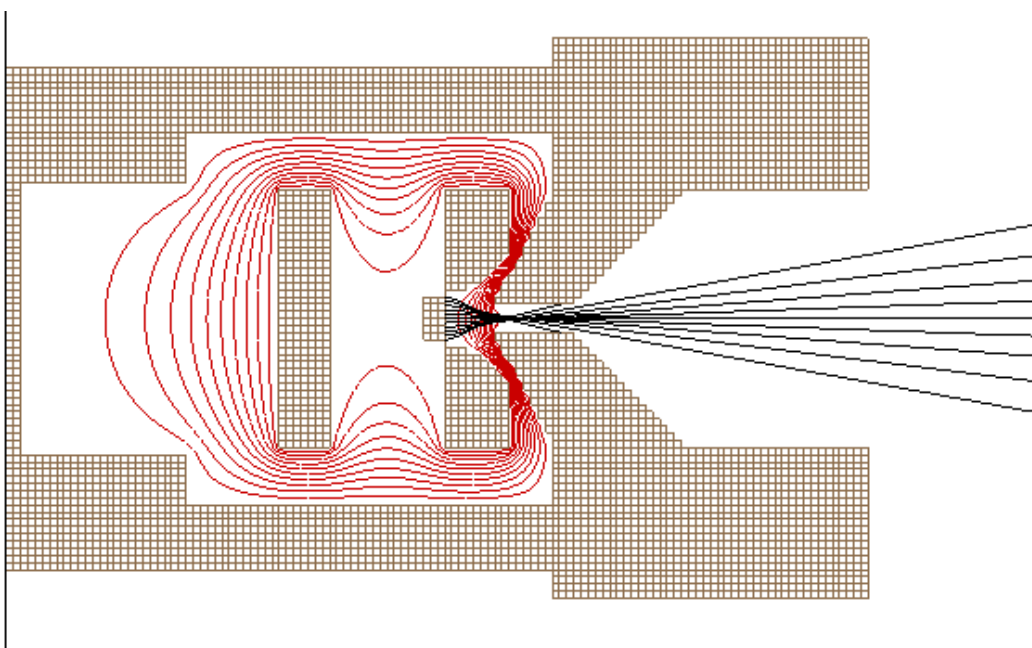


Figura 6.5 Distribuição de superfícies equipotenciais (linhas vermelhas) para a geometria na qual a porção superior do filamento emissivo está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração; tal configuração transforma o sistema de extração em uma lente eletrostática convergente (SIMION 7.0)

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam as superfícies equipotenciais (linhas vermelhas) e as trajetórias das partículas constituintes do feixe (linhas pretas) para duas configurações geométricas particulares do sistema de extração, conforme calculadas e desenhadas pelo software SIMION 7.0; nestas duas simulações, as partículas são emitidas isotropicamente de cada ponto da substância emissiva; além disso, foi estabelecida uma diferença de potencial de 3 kV entre os dois eletrodos do sistema de extração.

Pelas modificações nas trajetórias das partículas carregadas apresentadas na figura 6.4, conclui-se que a distribuição de superfícies equipotenciais para a configuração geométrica na qual a parte superior do filamento emissivo está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração atribui propriedades de divergência ao sistema de extração, transformando este sistema em uma lente eletrostática divergente.

Pelas modificações nas trajetórias das partículas carregadas apresentadas na figura 6.5, conclui-se que a distribuição de superfícies equipotenciais para a configuração geométrica na qual a parte superior do filamento emissivo está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração atribui propriedades de focalização ao sistema de extração, transformando este sistema em uma lente eletrostática convergente.

Estas simulações nos indicam também que a alteração das propriedades focalizadoras do sistema de extração devido às mudanças nas configurações geométricas do sistema de extração (mudanças relativas à posição da parte superior do filamento emissivo em relação à extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração) modifica a intensidade da corrente iônica coletada pelo anteparo inserido na porta direita da câmara de detecção. Na figura 6.4, pode-se observar que o efeito divergente provocado pela configuração correspondente faz com que grande parte dos íons positivos emitidos pelo filamento emissivo não atravessem a abertura central do segundo eletrodo do sistema de extração, mas que colidam com a periferia desta abertura central. Na figura 6.5 pode-se observar que o efeito focalizador provocado pela configuração correspondente atenua o número destas colisões e, conseqüentemente, aumenta o número de íons que conseguem atravessar a abertura central do segundo eletrodo e alcançar a câmara de detecção.

Com o objetivo de encontrar quais são as configurações mecânicas e elétricas que otimizam a eficiência dos sistemas de extração e detecção, desejamos verificar estas modificações nas propriedades de focalização e na intensidade da corrente iônica detectada causadas por aquelas configurações geométricas do sistema de extração. Além disso, queremos estudar como as propriedades de focalização e intensidade da corrente iônica detectada variam com relação aos valores de voltagem aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração e qual a importância das dimensões do anteparo (utilizado no sistema de detecção) na coleta dos íons positivamente carregados que atravessam a abertura central do segundo eletrodo de extração.

Para esta análise, utilizamos dois anteparos que consistem em duas folhas circulares de Alumínio; um dos anteparos (o qual denominaremos de anteparo A) possui 3,5 cm de

diâmetro (veja figuras 5.18) e o outro anteparo (o qual denominaremos de anteparo B) possui 6,7 cm de diâmetro (veja figura 5.19 (b)). Confeccionamos um filamento emissivo cuja porção superior está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (figuras 3.13). A configuração na qual este filamento emissivo está associado ao anteparo A é denominada configuração 1. A configuração na qual este filamento emissivo está associado ao anteparo B é denominada configuração 2. Confeccionamos também um filamento emissivo cuja porção superior está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração (figuras 3.12). A configuração na qual este filamento emissivo está associado ao anteparo A é denominada configuração 3. A configuração na qual este filamento emissivo está associado ao anteparo B é denominada configuração 4.

Ao variarmos os valores da tensão de extração (de maneira crescente) aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração – mantendo fixo o valor da corrente de aquecimento do filamento emissivo (14 A) – para as quatro configurações descritas no parágrafo anterior, obtivemos os gráficos mostrados nas figuras 6.6, 6.9 e 6.10. Estes gráficos apresentam a variação da intensidade da corrente iônica detectada em relação à geometria do sistema de extração, aos valores de voltagem aplicados entre os dois eletrodos e às dimensões dos anteparos utilizados neste sistema. A leitura da intensidade da corrente iônica coletada pelos anteparos A e B é realizada através do *display* do picoamperímetro Keithley (veja figura 5.20 (a)). Cada ponto dos gráficos é obtido após intervalos de tempo suficientes para que o valor da corrente detectada se estabilize (ou seja, quando se atinge a situação em que os valores indicados no *display* do picoamperímetro estejam oscilando em torno de um valor médio) para cada um dos valores crescentes de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração.

O gráfico mostrado na figura 6.6 apresenta a variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para as configurações 1 e 2 (ou seja, utilizamos os anteparos A e B na coleta de parte dos íons emitidos do filamento emissivo cuja porção superior está localizada um pouco acima da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração). Para estas duas configurações, podemos observar que, inicialmente, o aumento dos valores de tensão de extração provoca o crescimento da intensidade da corrente detectada; no entanto, a partir de um determinado valor de tensão extratora (valores distintos para cada anteparo) a intensidade da corrente iônica detectada começa a oscilar em torno de um valor médio que parece aumentar muito lentamente, apesar do progressivo aumento da tensão de extração.

A interpretação deste fato pode ser elucidada mediante as simulações realizadas através do software SIMION 7.0 para esta geometria do sistema de extração com alguns valores de voltagem aplicados entre os dois eletrodos deste sistema (veja figura 6.7).

Como explicado anteriormente, uma distribuição particular de potenciais existente na região entre os eletrodos especifica qualitativamente e quantitativamente a atuação das forças elétricas sobre a trajetória das partículas carregadas e sobre a intensidade do feixe constituído por estas mesmas partículas. No entanto, as simulações apresentadas nas figuras 6.7 indicam

que o aumento dos valores da tensão de extração não resulta em modificações sensíveis nas trajetórias das partículas carregadas (linhas pretas). Por esta razão, concluímos que, para esta geometria do sistema de extração, o aumento dos valores da tensão de extração não modifica sensivelmente a forma das superfícies equipotenciais e, conseqüentemente, não altera a direção dos vetores força elétrica que determinam as propriedades divergentes desta lente eletrostática.

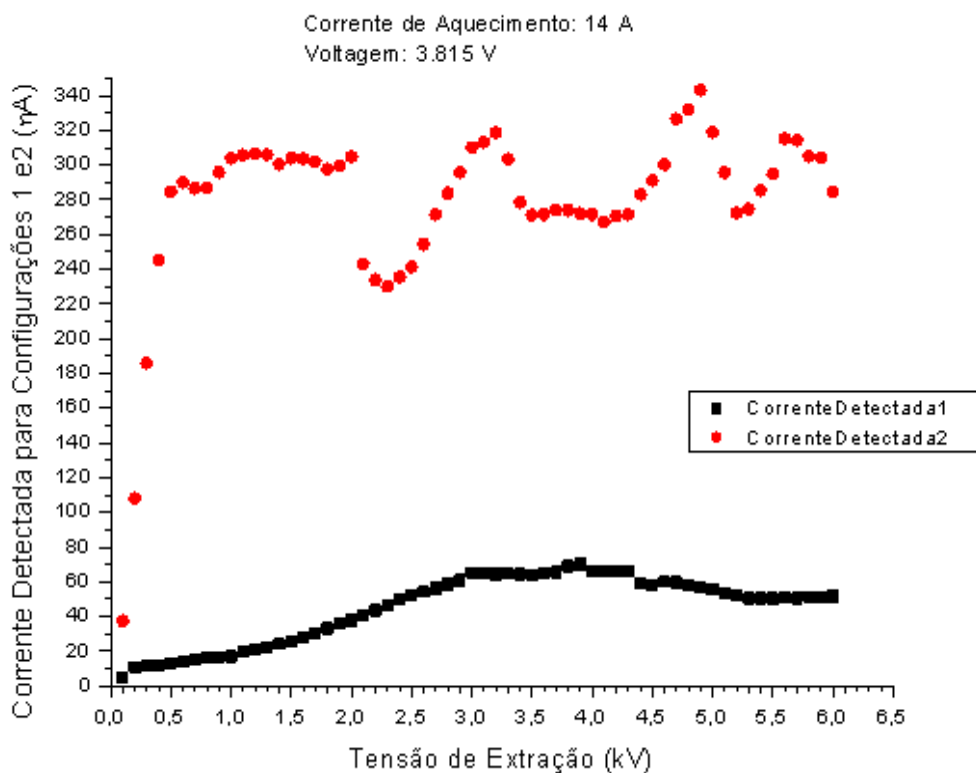
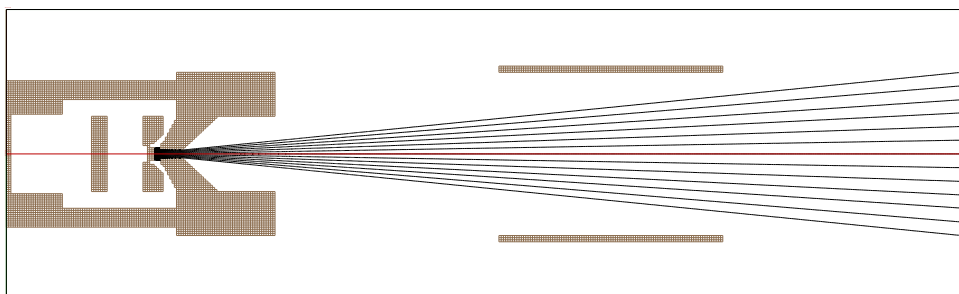
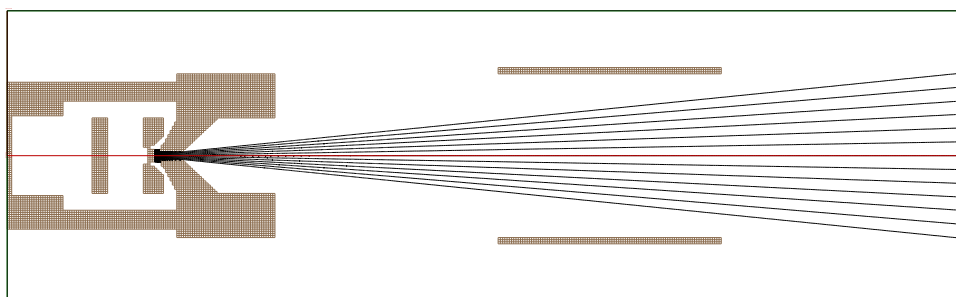


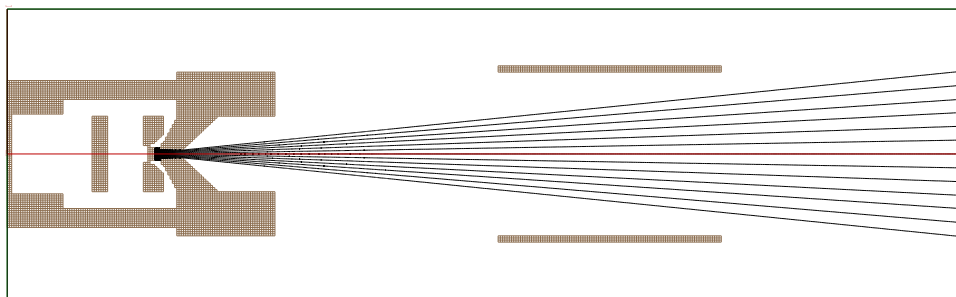
Figura 6.6 Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para as configurações 1 e 2



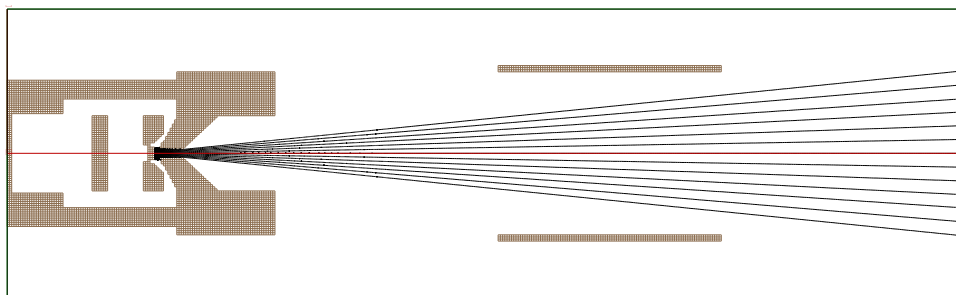
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.7 Simulações para a particular geometria do sistema de extração com os seguintes valores de diferença de potencial aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração: a) 100 V, b) 1100 V, c) 3100 V, d) 5500 V (SIMION 7.0)

As propriedades divergentes associadas a esta geometria particular do sistema de extração podem ser analisadas através da figura 6.4. Nesta figura (na qual a tensão de extração possui um valor fixo) observa-se que, na região frontal ao filamento emissivo, à medida que nos afastamos do eixo de simetria da lente percorrendo uma linha equipotencial particular (à qual representa uma superfície equipotencial particular), os vetores força elétrica tomam direções cada vez mais divergentes em relação ao eixo de simetria, fazendo com que grande parte das partículas emitidas pelo filamento se mova para fora deste eixo. Observa-se também que, na mesma região frontal ao filamento emissivo, à medida que nos deslocamos verticalmente em relação ao eixo de simetria, os vetores força elétrica apresentam magnitudes cada vez maiores (note que a densidade das linhas que representam as superfícies equipotenciais se torna cada vez maior quando nos movemos nesta direção), fazendo com que grande parte das partículas emitidas pelo filamento se mova para fora do eixo de simetria.

A verificação da lei de Child – Langmuir (gráficos apresentados nas figuras 6.2 e 6.3) confirma que o progressivo aumento dos valores da tensão de extração resulta no progressivo aumento do número de íons positivos extraídos do filamento (aumento progressivo da corrente de emissão). Supondo que as partículas são emitidas isotropicamente de cada ponto da substância emissiva e considerando os aspectos relativos à magnitude crescente das forças de atuação divergente a partir do eixo de simetria da lente (discutidos no parágrafo anterior), concluímos que a maior parte das partículas que constitui o aumento de corrente emitida (em um determinado acréscimo no valor de tensão de extração) não atravessa a abertura central do segundo eletrodo do sistema de extração, mas colide com a periferia desta abertura central. Este fato é comprovado na figura 6.8, à qual mostra a mancha - resultante do grande número destas colisões - que circunda a periferia deste eletrodo de extração após a realização destas medições (compare com figura 3.9 (a)).



Figura 6.8 Mancha resultante do grande número de íons que colidiram com a periferia da abertura central do segundo eletrodo do sistema de extração

A importância das dimensões dos anteparos utilizados na detecção da corrente iônica é claramente indicada no gráfico da figura 6.6. As intensidades de corrente detectada pelo anteparo B são maiores que as intensidades de corrente detectada pelo anteparo A, uma vez

que o diâmetro maior do anteparo B possibilita a interceptação das partículas contidas num ângulo sólido maior do que o permitido pelo diâmetro do anteparo A.

Os gráficos apresentados nas figuras 6.9 e 6.10 apresentam a variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para as configurações 3 e 4, respectivamente (ou seja, utilizamos os anteparos A e B na coleta de parte dos íons emitidos do filamento emissivo cuja porção superior está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo do sistema de extração). Comparando as detecções associadas às duas geometrias particulares do sistema de extração, notamos que as intensidades da corrente iônica detectada para esta geometria (valores da ordem de μA) são muito maiores em relação às intensidades detectadas para a geometria anterior (valores da ordem de ηA). Para as configurações 3 e 4, podemos observar um progressivo crescimento na intensidade da corrente iônica detectada à medida que aumentamos os valores de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração (este crescimento ocorre de maneira global, pois existem quedas localizadas na intensidade da corrente detectada em ambos os gráficos; podemos notar também que tal crescimento contém acréscimos e decréscimos locais na sua taxa de variação).

A interpretação destes fatos pode ser elucidada mediante as simulações realizadas através do software SIMION 7.0 para esta geometria do sistema de extração com alguns valores de voltagem aplicados entre os dois eletrodos deste sistema (veja figuras 6.11).

Estas simulações indicam que o aumento dos valores da tensão de extração não resulta em modificações sensíveis na trajetória das partículas carregadas (linhas pretas). Por esta razão, concluímos que, para esta geometria do sistema de extração, o aumento dos valores da tensão de extração não modifica sensivelmente a forma das superfícies equipotenciais e, conseqüentemente, não altera a direção dos vetores força elétrica que determinam as propriedades focalizadoras desta lente eletrostática.

As propriedades de focalização associadas a esta geometria particular do sistema de extração podem ser analisadas através da figura 6.5. Nesta figura (na qual a tensão de extração possui um valor fixo) observa-se que, à medida que percorremos horizontalmente a região frontal ao filamento emissivo - a partir deste mesmo filamento - as linhas de potencial exercem inicialmente um forte efeito convergente sobre as partículas carregadas (à medida que nos afastamos do eixo de simetria da lente percorrendo qualquer uma das primeiras linhas equipotenciais, os vetores força elétrica tomam direções cada vez mais convergentes em relação ao eixo de simetria) e, em seguida, um suave efeito divergente sobre estas, fazendo com que as partículas emitidas do filamento se movam em direção ao eixo de simetria da lente; desta maneira, esta geometria particular caracteriza o sistema de extração como uma lente eletrostática convergente.

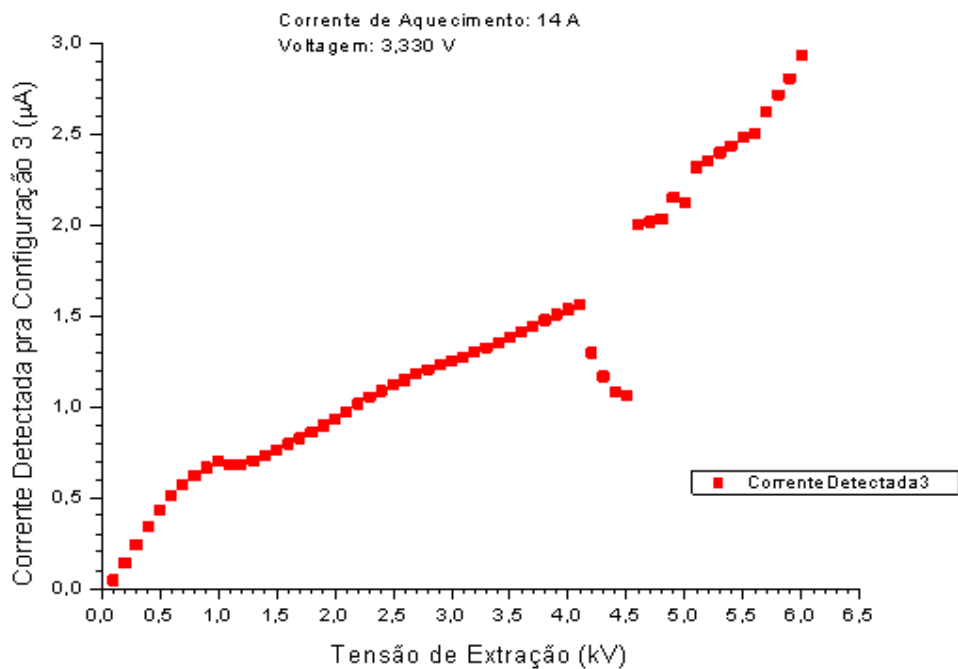


Figura 6.9 Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para a configuração 3

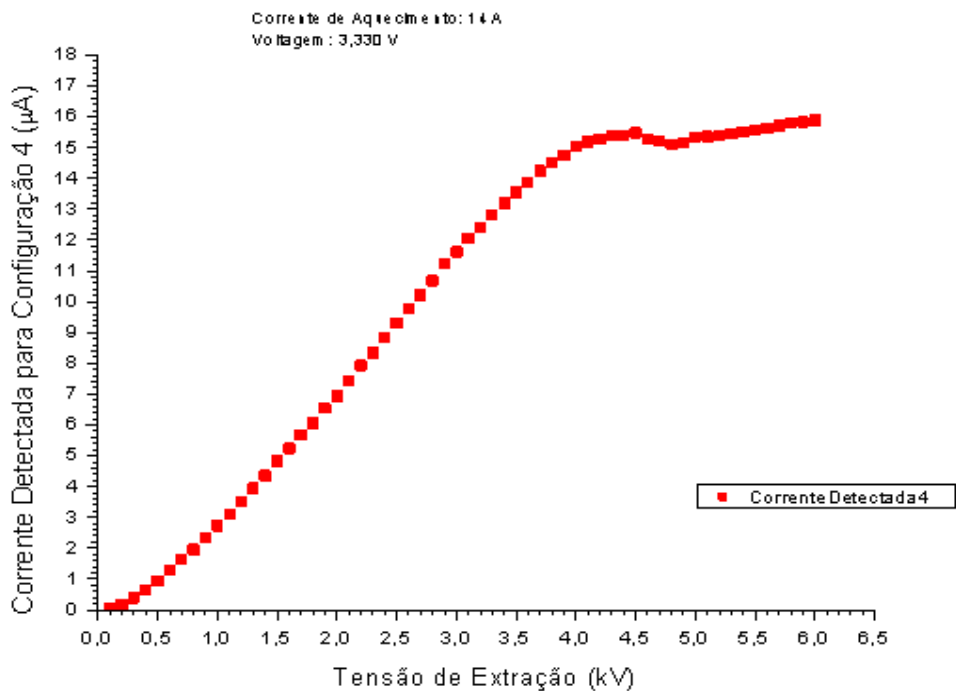
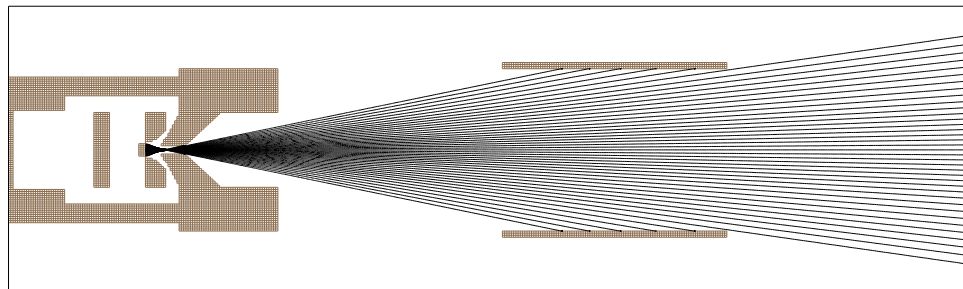
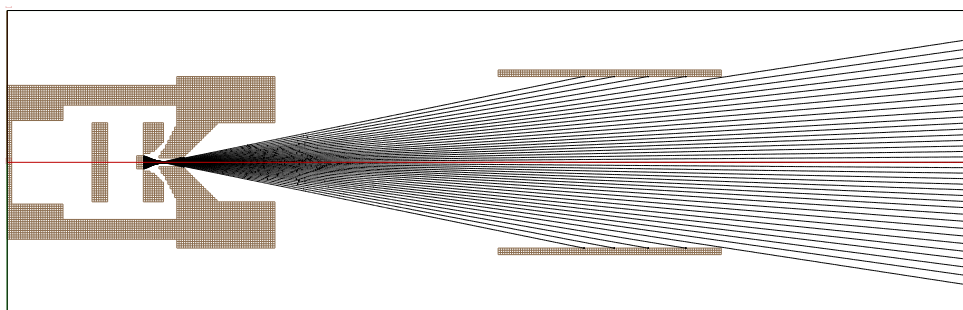


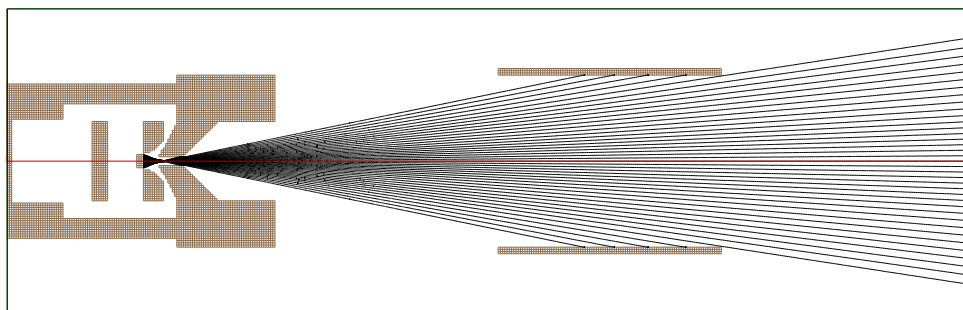
Figura 6.10 Variação da intensidade da corrente iônica detectada em função da voltagem aplicada entre os dois eletrodos do sistema de extração para a configuração 4



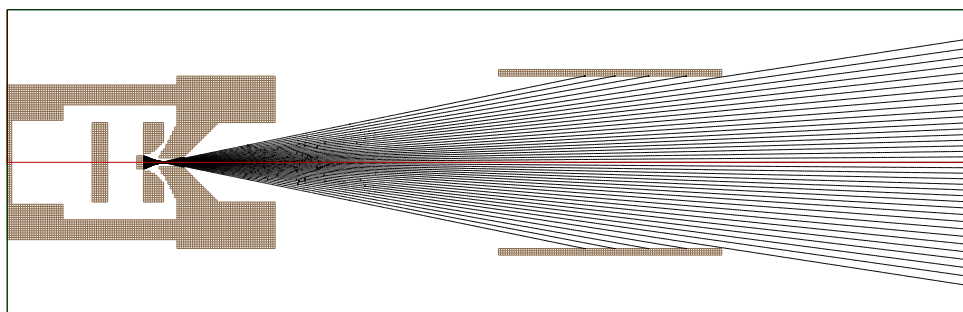
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.11 Simulações para a particular geometria do sistema de extração com os seguintes valores de diferença de potencial aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração: a) 100 V, b) 1100 V, c) 3100 V, d) 5500 V (SIMION 7.0)

A verificação da lei de Child – Langmuir (gráficos apresentados nas figuras 6.2 e 6.3) confirma que o progressivo aumento dos valores da tensão de extração resulta no progressivo aumento do número de íons positivos extraídos do filamento (aumento progressivo da corrente de emissão). Supondo que as partículas são emitidas isotropicamente de cada ponto da substância emissiva e considerando o forte efeito focalizador exercido pelas forças perpendiculares às superfícies equipotenciais em cada ponto onde estas superfícies estão definidas, concluímos que a maior parte das partículas que constitui o aumento de corrente emitida (em um determinado acréscimo no valor de tensão de extração) atravessa a abertura central do segundo eletrodo do sistema de extração e penetra na câmara de detecção; o anteparo utilizado consegue coletar parte destas partículas que transpuseram o sistema extrator. Este fato é comprovado nas figuras 6.12, à qual mostra manchas - resultantes das colisões entre os íons positivos e o sistema de detecção - difundidas sobre os anteparos A e B utilizados e sobre a face interna do flange de adaptação após a realização destas medições.

A importância das dimensões dos anteparos utilizados na detecção da corrente iônica é claramente indicada pelas manchas mostradas nas figuras 6.12. As intensidades de corrente detectada pelo anteparo B são maiores que as intensidades de corrente detectada pelo anteparo A, uma vez que o diâmetro maior do anteparo B possibilita a interceptação das partículas contidas num ângulo sólido maior do que o permitido pelo diâmetro do anteparo A.

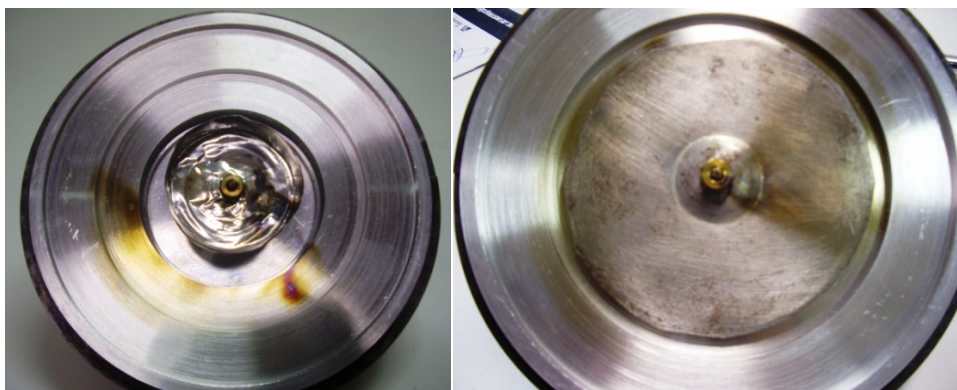


Figura 6.12 Manchas (resultantes das colisões entre os íons positivos e o sistema de detecção) difundidas sobre os anteparos A e B utilizados e sobre a face interna do flange de adaptação

6.4 Análise dos Resultados e Discussões Correlatas

As diversas medições referentes à emissão da fonte termoiônica, focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica que foram realizadas e apresentadas neste capítulo nos permitiram encontrar a configuração mecânica e elétrica que otimiza o funcionamento da fonte termoiônica e dos sistemas de extração e detecção.

Os estudos de emissão da fonte termoiônica nos mostraram que o aumento da máxima intensidade de corrente de emissão é obtido através do aumento dos valores de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração e da intensidade da corrente de aquecimento do filamento emissivo. Com o objetivo de evitar o aquecimento excessivo do filamento, o valor de corrente de aquecimento que otimiza o funcionamento da fonte termoiônica é 14 A.

Os estudos relacionados à focalização do feixe extraído e as medições concernentes à detecção da corrente iônica nos mostraram que a geometria do sistema de extração altera drasticamente as propriedades focalizadoras deste sistema e, conseqüentemente, a intensidade da corrente iônica coletada pelo detector. A configuração que otimiza o funcionamento dos sistemas de extração e detecção é aquela cuja geometria do sistema de extração apresenta a porção superior do filamento emissivo localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração. Nesta geometria, a distribuição das superfícies equipotenciais situadas na região entre os dois eletrodos exerce uma ação convergente sobre o feixe iônico, caracterizando o sistema de extração como uma lente eletrostática convergente. A coleta dos íons que penetram na câmara de detecção pode ser otimizada através da utilização do anteparo B, o qual, devido ao seu diâmetro maior, possibilita a interceptação das partículas contidas num ângulo sólido maior. Nesta configuração, à medida que aumentamos os valores de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração, obtemos progressivo crescimento na intensidade da corrente iônica detectada.

A respeito da emissão termoiônica, os filamentos emissivos preparados a partir da mistura dos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptite (segundo a proporção indicada na equação 3.1) não apresentaram grandes diferenças entre si.

As figuras 6.13 mostram o aspecto físico da mistura utilizada como substância emissiva após a realização das medidas. Tal aspecto indica que não houve fundição da mistura, ou seja, a intensidade da corrente de aquecimento (14 A) não foi suficiente para atingir a temperatura de vitrificação (1450 °C) e, conseqüentemente, realizar a síntese do composto ternário Li- β -eucryptite. No entanto, tal afirmação só pode ser comprovada através de uma medição direta da temperatura do filamento emissivo. Pode-se estudar a possibilidade de inserirmos um medidor de temperatura (um pirômetro óptico, por exemplo) próximo ao filamento emissivo, cujo display pode ser visto através de uma janela óptica (a inserção de um medidor de temperatura nos permitiria observar a lei de Richardson

$$I = A e^{-q\phi/kT} \quad (6.2)$$

que nos fornece a função trabalho ϕ da substância emissiva mediante o coeficiente angular da reta obtida com os dados coletados – corrente de emissão I e inverso da temperatura T do filamento emissivo – dispostos em um gráfico com escala logarítmica para o eixo correspondente aos valores de corrente de emissão).

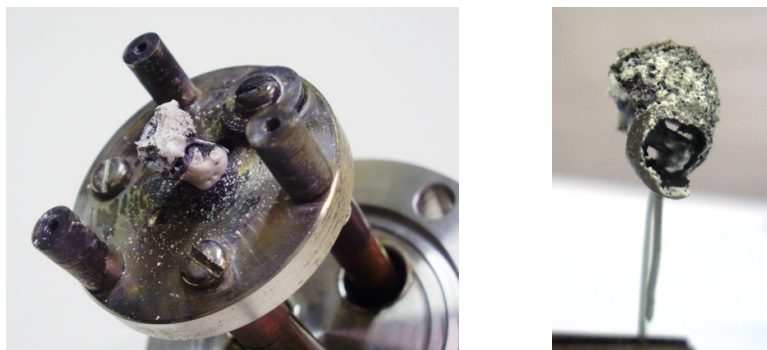


Figura 6.13 Aspecto físico da substância emissiva após a realização das medições

O aspecto físico da substância emissiva (figuras 6.13), após a realização das medições, indica que a pasta fixada na parte superior do filamento de W foi modificando seu formato durante o aquecimento deste filamento. A modificação na forma da substância emissiva pode ter alterado momentaneamente a distribuição das superfícies equipotenciais na região entre os eletrodos do sistema de extração e ser responsável pelas oscilações mais intensas (gráfico da figura 6.6 para a configuração 2) e pelas quedas repentinas (gráficos das figuras 6.9 e 6.10 para as configurações 3 e 4, respectivamente) na intensidade da corrente iônica detectada.

Comparando as características de emissão da substância emissiva Li- β -eucryptite descritas no tópico 3.1 com as características de emissão da mistura dos reagentes utilizados na síntese deste composto, concluímos que a emissão da mistura não é tão intensa (sempre inferior a 120 μ A) quanto a emissão do composto Li- β -eucryptite na forma vítrea (2 – 3 mA [21]). As intensidades das correntes emitida e detectada associadas á mistura dos reagentes são suficientes para os estudos de determinação de secções de choque, mas são insuficientes para os estudos de análise e modificação de superfícies.

A ausência de um espectrógrafo de massa nos impediu de determinar precisamente a composição e a pureza do feixe obtido. No entanto, nossos estudos de focalização do feixe extraído e detecção da corrente iônica são muito relevantes, uma vez que partículas com energias cinéticas iniciais iguais, ao atravessarem campos eletrostáticos, seguem as mesmas trajetórias, independente de suas massas e cargas. Isto se deve ao fato de que a expressão final das funções que descrevem a deflexão das partículas submetidas a campos eletrostáticos não inclui nem suas massas nem suas cargas. Assim, elétrons e quaisquer íons positivamente ou negativamente carregados seguirão as mesmas trajetórias [13], [18], [19].

Os próximos passos a serem tomados compreendem a superação das dificuldades logísticas que nos impediram de realizar a síntese do composto ternário Li- β -eucryptite e a inserção da tubulação cerâmica necessária para a execução do estágio de aceleração dos íons extraídos. O projeto completo do acelerador prevê a inserção de campos elétricos e magnéticos (para análise do feixe em carga e momento) e a inclusão de um alvo estendido gasoso ‘Stripper’ (para o estudo de troca de carga do feixe e caracterização dos diversos estados de carga obtidos). Com a inserção do trocador de carga será possível obter medidas de

secção de choque de captura simples e dupla de Li^+ em diferentes alvos gasosos para verificar a possibilidade de se obter feixes neutros e negativos. Os novos estados de carga que vão compor o feixe emergente serão então detectados e analisados em uma nova câmara de detecção. Desta maneira, será possível obter feixes com diferentes estados de carga e realizar medidas de secções de choque de troca de carga de Li^+ em colisões com diferentes alvos gasosos.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho descrevemos a etapa inicial da construção de um acelerador linear eletrostático que será utilizado na determinação de secções de choque envolvendo íons Li^+ e alvos gasosos, bem como no estudo de análises de superfícies. Apresentamos o projeto, o desenvolvimento e os detalhes construtivos do conjunto formado pela fonte termoiônica e pelo sistema de extração deste acelerador.

A mistura formada pelos reagentes utilizados na síntese do composto Li- β -eucryptite é capaz de emitir correntes iônicas de intensidade suficiente para os estudos de determinação das secções de choque entre os elementos citados, porém, tais intensidades são insuficientes para os estudos de análises de superfícies. Por esta razão, a superação das dificuldades logísticas que nos impediram de realizar a síntese do composto Li- β -eucryptite é imprescindível para nossos objetivos de pesquisa.

O circuito elétrico projetado para a execução dos estágios de emissão e extração mostrou ser muito eficaz na execução destes estágios. Posteriormente, a inserção da tubulação cerâmica permitirá a execução do estágio de aceleração dos íons extraídos, uma vez que o circuito elétrico responsável por este estágio já está preparado.

Os estudos de emissão nos permitiram concluir que, levando em consideração o fato de que desejamos evitar o aquecimento excessivo do filamento emissivo, o valor de corrente de aquecimento de 14 A é o que otimiza o funcionamento da fonte termoiônica.

Os estudos de focalização mostraram que o aumento dos valores de tensão de extração não modifica sensivelmente a distribuição das superfícies equipotenciais e, conseqüentemente, não altera de forma sensível a direção dos vetores força elétrica que determinam as propriedades convergentes ou divergentes do sistema de extração. No entanto, verificamos que a geometria do sistema de extração possui um papel fundamental nas propriedades de convergência ou divergência deste sistema. A geometria que otimiza o funcionamento do sistema de extração é aquela em que a porção superior do filamento emissivo está localizada imediatamente abaixo da extremidade inferior da abertura central do primeiro eletrodo de extração. Tal geometria transforma o sistema de extração em uma lente eletrostática convergente.

Para esta geometria, a coleta dos íons que penetram na câmara de detecção pode ser otimizada através da utilização do anteparo de diâmetro maior, o qual possibilita a interceptação das partículas contidas num ângulo sólido maior. Nesta configuração, à medida que aumentamos os valores de tensão aplicados entre os dois eletrodos do sistema de extração, obtemos progressivo aumento na intensidade da corrente iônica detectada.

Este trabalho é o ponto de partida da construção de um acelerador de partículas linear, eletrostático e de baixa energia que permitirá a execução de inúmeros experimentos – em Colisões Atômicas e Física de Superfície – que ampliarão as linhas de pesquisa experimental do Departamento de Física da universidade Federal de Juiz de Fora.

Apêndice 1

Modo de Operação do Sistema de Vácuo do Acelerador Linear Eletrostático

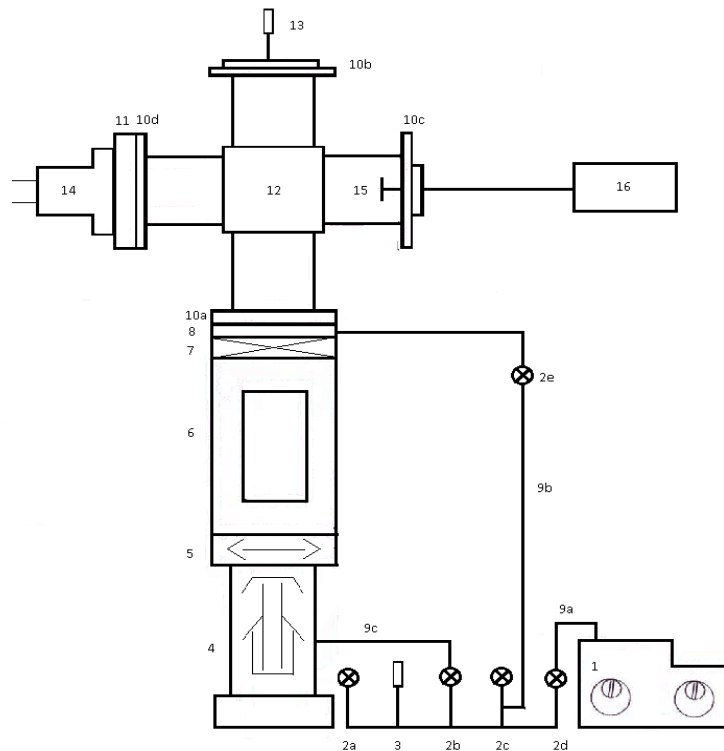


Figura A1.1 Sistemas de vácuo e detecção

Para a evacuação de todo o sistema a partir da pressão atmosférica, o acelerador linear eletrostático deve estar inicialmente nas seguintes condições:

- Válvulas 2a, 2b, 2c, 2d e 7 fechadas
- Bomba mecânica desligada
- Bomba difusora desligada
- Medidor de pressão Pirani desligado
- Medidor de pressão Bayard – Alpert desligado
- Fonte de corrente desligada
- Fonte de tensão (tensão de extração) desligada

- Picoamperímetro desligado

Estando o acelerador linear eletrostático nestas condições, os seguintes procedimentos devem ser realizados para a obtenção de médio e alto vácuo em todo o acelerador:

- Ligar a bomba primária
- Abrir válvulas 2d e 2e
- Ligar o medidor de pressão Pirani (a faixa de valores de pressão correspondentes ao médio vácuo será alcançada quando o medidor de pressão Pirani indicar uma pressão cujo valor é da ordem de 10^{-2} torr; somente quando este valor é alcançado, pode-se partir para a execução das próximas etapas)
- Ligar a água de arrefecimento da bomba difusora
- Abrir válvula 2b (após a abertura desta válvula, espera-se que o medidor de pressão Pirani indique um aumento na pressão. Deve-se esperar que o valor de pressão indicado antes da abertura da válvula 2b seja novamente alcançado)
- Ligar a bomba difusora e esperar por aproximadamente trinta minutos para o seu devido aquecimento
- Completar o reservatório do acessório Cold Trap com N_2 líquido
- Fechar a válvula 2e
- Abrir válvula 7
- Ligar o medidor de pressão Bayard – Alpert

Quando valores de pressão da ordem de 10^{-6} torr forem alcançados, as medições podem ser realizadas; liga-se a fonte de corrente que alimenta o filamento emissivo, a fonte de tensão que alimenta os eletrodos da fonte termoiônica e o picoamperímetro que possibilita a leitura da corrente iônica detectada pelo copo de Faraday.

Para a descompressão e abertura da câmara de detecção, os seguintes procedimentos devem ser realizados:

- Desligar a fonte de corrente, a fonte tensão de extração e o picoamperímetro
- Desligar o medidor de pressão Bayard – Alpert
- Fechar válvula 7
- Desligar a bomba difusora e esperar por aproximadamente cinco minutos para que a bomba mecânica complete seu bombeamento
- Fechar válvula 2b
- Fechar válvula 2d
- Abrir válvulas 2e e 2c
- Abrir a câmara de detecção

Para a reevacuação da câmara de detecção, os seguintes procedimentos devem ser realizados:

- Fechar a câmara de detecção

- Fechar válvula 2c
- Abrir válvula 2d (deve-se esperar que a pressão indicada pelo medidor Pirani alcance valores pertencentes a faixa de médio vácuo; somente quando este valor é alcançado, pode-se partir para a execução das próximas etapas)
- Abrir válvula 2b (após a abertura desta válvula, espera-se que o medidor de pressão Pirani indique um aumento na pressão. Deve-se esperar que o valor de pressão indicado antes da abertura da válvula 2b seja novamente alcançado)
- Ligar a bomba difusora e esperar por aproximadamente trinta minutos para o seu devido aquecimento
- Fechar a válvula 2e
- Abrir válvula 7
- Ligar o medidor de pressão Bayard – Alpert
- Ligar a fonte de corrente, a fonte de tensão e o picoamperímetro

Referências Bibliográficas

- [1] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, Quantum Mechanics, Second edition, John Wiley & Sons (1977)
- [2] D. Bohm, Quantum Theory, Second Edition, Dover Publications, INC., New York (1989)
- [3] E. Merzbacher, Quantum Mechanics, Second Edition, John Wiley & Sons (1970)
- [4] V. Grill, J. Shen, C. Evans and R. G. Cooks, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 72, NUMBER 8 (2001) 3149 - 3179
- [5] H.H. Brongersma, M. Draxler, M. de Ridder, P. Bauer, Surface Science Reports **62** (2007) 63–109
- [6] E. Taglauer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **98** (1995) 392-399
- [7] T. Kravchuk, Yu. Bandourine, A. Hoffman, V. A. Esaulov, Surface Science **600** (2006) L265–L268
- [8] C.W. Zou, M. Li, H.J. Wang, M.L. Yin, C.S. Liu, L.P. Guo, D.J. Fu, T.W. Kang, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **267** (2009) 1067–1071
- [9] M. Sasao, K. A. Connor, K. Ida, H. Iguchi, A. A. Ivanov, M. Nishiura, D. M. Thomas, M. Wada, and M. Yoshinuma, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 33, NO. 6, (DECEMBER 2005) 1872 - 1900
- [10] L. I. Krupnik, A. D. Komarov, A. S. Kozachek, A. V. Melnikov, and I. S. Nedzelskiy, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 36, NO. 4, (AUGUST 2008) 1536 - 1544
- [11] I. Murakami, J. Yan, H. Sato, M. Kimura, R. K. Janev, T. Kato, Atomic Data and Nuclear Data Tables **94** (2008) 161–222
- [12] E. Wilson, An Introduction to Particle Accelerators, First edition, Oxford University Press (2001)
- [13] H. M. Nussenzveig, Curso de Física Básica, Vol.1 e 3, Quarta Edição, Blücher LTDA (2008)
- [14] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. (1998)
- [15] G. D. Alton, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **73** (1993) 221-288
- [16] N. P. A. Junior, C. V. Aquino, Eletromagnetismo I, UNESP (2005)
- [17] G. M. Sandonato, Tese de Mestrado, UFSCar (1983)

- [18] V. Ovalle, D. R. Otomar, J. M. Pereira, N. Ferreira, R. R. Pinho, A. C. F. Santos, *Eur. J. Phys.* **29** (2008) 251–256
- [19] A. C. F. Santos, *Ótica de Partículas Carregadas*, UFRJ (2008)
- [20] J. H. Moore, C. C. David, M. A. Coplan, *Building Scientific Apparatus*, Fourth edition, Cambridge
- [21] M. Ueda, R. R. Silva, R. M. Oliveira, H. Iguchi, J. Fujita, K. Kadota, J. , *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, (1997) 2711
- [22] J. L. Hundley, *Phys. Ver.* **30**, (1927) 864
- [23] K. T. Bainbridge, *J. Franklin Inst.* **122**, (1931) 317
- [24] J. P. Blewett, E. L. Jones, *Phys. Rev.* **50**, (1936) 464
- [25] M. Lambert, J. P. Thomas, J. P. Buchet, *Inst. Phys. Conf. ser. No. 38*, (1978): Chapter 2
- [26] M. Ueda, R. R. Silva, H. Iguchi, J. Fujita, K. Kadota, *Fusion Engineering Design* 34 – 35 (1997) 683 – 686
- [27] D. M. Thomas, W. P. West, *Rev. Sci. Instrum.* **59**, (1988) 1735
- [28] W. Shi, J. Jacobi, H. Knopp, S. Schippers, A. Müller, *XXIII International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions*, (2003)
- [29] N. A. Lange, *Handbook of Chemistry*, Ninth Edition, Handbook Publishers, Inc. (1956)
- [30] B. H. Mahan, *University Chemistry*, Second Edition, Addison-Wesley Publishing, Inc (1972)
- [31] A. Martignoni, *Transformadores*, Terceira Edição, Globo, (1977)
- [32] P. A. Tipler, *Physics for Scientists and Engineers*, Third Edition, Worth Publishers, Inc. (1991)
- [33] Halliday, Resnick, Walker, *Fundamental of Physics*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. (1996)
- [34] S. G. S. Filho, *Eletrônica Experimental*, Volume 1, Primeira edição, EPUSP (1999)
- [35] W. Schmidt, *Materiais Elétrico Volume 2*, Terceira Edição, Blucher (2010)
- [36] I. Roditi, *Dicionário Houaiss Física*, Segunda Edição, Objetiva (2005)
- [37] S. Gama, *Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo*, IFGW – UNICAMP (2002)
- [38] A. Roth, *Vacuum Technology*, North-Holland Publ. Co. (1982)

[39] J. W. Swart, Oficina de Microfabricação: Projeto e Construção de CI's MOS (capítulo 12), CCS – UNICAMP (2006)

[40] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher, Theory and Practice of Vacuum Technology, Fried. Vieweg & Sohn (1989)

[41] A. M. Moutinho, M. E. Silva, M. A. Cunha, Tecnologia de vácuo, Universidade Nova de Lisboa (1980)

[42] M. A. B. Moraes, Ciência e Tecnologia de Vácuo, IFGW – UNICAMP

[43] J. M. Lafferty, Foundations of Vacuum Science and Technology, John Wiley & Sons (1998)

[44] Y. Y. Lao, D. Chernin, D. G. Colombant, T. Ho, Phys. Rev. Letters **66**, (1991) 1446

[45] McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics, The McGraw-Hill Companies, Inc. (2002)

