

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Um Sistema para Aceleração de Iões
Positivos a Baixas Energias:
Projecto, Construção e Testes**



Dissertação de Mestrado em Instrumentação e Microelectrónica

Alexandre Manuel da Fonseca Trindade

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra
Coimbra, Setembro de 2006

À Joana

À Miriam

À Ana

Ao Gabriel

Ao Miguel

Ao Rafael

Agradecimentos

Neste momento tão especial da minha vida e da minha carreira profissional, não queria passar sem, de uma maneira muito simples mas com muito significado, agradecer e dedicar esta dissertação e com ela o fim do curso de Mestrado em Instrumentação e Microelectrónica, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para o seu bom termo. Em particular quero agradecer:

À Joana, minha esposa, pelo amor, carinho, apoio, paciência e incentivo que me deu ao longo destes anos e pelo tempo da minha companhia que lhe roubei.

À Miriam, à Ana, ao Gabriel, ao Miguel e ao Rafael, meus filhos, pela alegria, boa disposição e equilíbrio que me deram e também pelo tempo da minha companhia que lhes roubei.

Aos meus pais pelo carinho, confiança e incentivo que sempre me deram e pelo grande esforço económico que fizeram comigo para levar a cabo este Curso de Mestrado.

À minha madrinha Generosa pelo apoio, incentivo e pelo grande esforço económico que também teve comigo.

À minha comunidade que tanto intercedeu por mim.

Aos restantes familiares e a todos os amigos que sempre estiveram comigo e muito me incentivaram.

Também, da mesma forma sentida, queria agradecer ainda às pessoas que se encontram mais próximas profissionalmente, a saber:

- Ao Professor Doutor Carlos Alberto Nabais Conde, orientador da Tese de Mestrado, pela oportunidade que me deu em trabalhar neste projecto, pela confiança e apoio durante todo o curso, pela sua sábia orientação, pela dedicação e empenho, pelos constantes conselhos, sugestões e correcções no decorrer deste curso, e pelo seu apoio que se tornou indispensável à conclusão desta dissertação e do curso de Mestrado.

- Ao Doutor Joaquim Marques Ferreira dos Santos, coordenador deste curso de Mestrado, pela sua amizade, disponibilidade, paciência e enormes ensinamentos demonstrados durante todo tempo em que decorreu este curso.

- À Doutora Filipa Isabel Borges Belo Soares pelos esclarecimentos prestados no decorrer deste projecto, não esquecendo que foi de sua co-autoria a idealização da construção do Acelerador de Iões Positivos e a compra de parte do equipamento utilizado.

- Ao Eng. Diogo Freitas pela sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e pelo grande apoio nos momentos finais da conclusão desta dissertação.

- Ao Bacharel Carlos Manuel Queirós Carvalho e ao Técnico Augusto Ferreira Cordeiro, pelo empenho, disponibilidade e dedicação que sempre deram na elaboração mecânica dos vários componentes necessários a este trabalho.

A todos os meus colegas de laboratório, mas em especial àqueles que diariamente estão comigo e fizeram com que fosse um enorme prazer e uma grande alegria trabalhar neste projecto.

Os trabalhos de investigação para esta dissertação foram suportados pelos seguintes projectos:

- POCTI/FNU/50240/2003 – Intitulado “Positive Ions and Detector Physics - I”;

- POCTI/FP/63430/2005 – Intitulado “Positive Ions and Detector Physics - II”;

Índice

Agradecimentos	3
Índice.....	5
Resumo	6
A – Acelerador de Iões Positivos.....	8
A.I – Introdução	8
A.II – O Acelerador de Iões Positivos	16
A.II.1 – A Fonte de Iões.....	21
A.II.2 – O Tubo Acelerador	28
A.II.3 – A Câmara de Bombardeamento Iónico	32
A.II.4 – A Unidade de Electrónica Flutuante.....	34
A.II.5 – O Sistema de Vácuo.....	47
A.III - Previsão dos Resultados	51
A.IV – Resultados	55
A.V – Análise dos Resultados	64
A.VI – Problemas Ocorridos.....	69
A.VII – Conclusões, Trabalho Futuro e Aplicações	72
B – Sistema de Purificação de Gases.....	75
B.I. – Introdução	75
B.II – Projecção e Montagem	77
B.III – Conclusões, Trabalho Futuro e Aplicações.....	84
Referências.....	86
Anexo 1	88
Anexo 2	102
Anexo 3	106
Anexo 4.....	111

Resumo

Os trabalhos de investigação e desenvolvimento para esta dissertação foram realizados em duas áreas interligadas mas distintas: a construção de um pequeno acelerador de partículas para iões positivos; a construção de uma linha de purificação de gases, tendo em vista o desenvolvimento de detectores gasosos de radiação a utilizar no acelerador de partículas.

A primeira parte consistiu em construir e colocar em funcionamento um acelerador de partículas de baixas energias (iões positivos e potenciais de aceleração até 50 kV). Para a sua construção foi necessária a compra de parte do equipamento, construção de um módulo de electrónica flutuante e a projecção, concepção e montagem, dos vários componentes mecânicos necessários. A selecção e aquisição da fonte de iões, da fonte de alta tensão, do espectrómetro de massa e das bombas de vácuo já tinham sido efectuadas. A responsabilidade destas aquisições deve-se à Prof. Dra. Filipa Isabel Borges Belo Soares. Também de sua responsabilidade foi a projecção da câmara de bombardeamento iónico e do tubo acelerador.

Após a construção do acelerador de iões, iniciaram-se os testes de funcionamento usando deutério. No decorrer dos primeiros testes de funcionamento foram medidas correntes totais devidas aos iões positivos de D^+ , DD^+ e DDD^+ (nesta fase não se pôde fazer a separação destes iões) recolhidas num alvo colocado na base da câmara de bombardeamento iónico com 2 cm de diâmetro. Foram feitas medidas para as correntes dos iões de deutério em função da corrente de aquecimento do filamento da fonte de iões, da pressão no interior da fonte de iões e em função das várias tensões na fonte de iões (fonte, extractor e focagem). As pressões de deutério, no interior da fonte de iões, para as quais se realizaram medidas variaram entre $5,0 \times 10^{-7}$ e $9,5 \times 10^{-5}$ Torr. A corrente de aquecimento do filamento estava limitada a 1,75 A. Os testes foram realizados com tensões na fonte de iões (fonte, extractor e focagem) compreendidas entre

1,45 kV e 2,80 kV. Dentro destas condições a corrente total dos iões de deutério atingiu valores máximos na ordem de 7×10^{-8} A.

A segunda parte (menos extensa) consistiu na construção de um sistema para a purificação de gases. Também nesta parte houve a necessidade da selecção e compra de equipamento e de vários componentes de vácuo, e da projecção, concepção e montagem dos vários componentes mecânicos necessários.

O sistema de purificação de gases foi construído de modo a ser possível colocar em simultâneo três ou mais garrafas de gás, para facilitar a realização de misturas gasosas. No mesmo sistema está implementado um reservatório de gás com um volume de aproximadamente 1 dm^3 e uma câmara para recolha de gás. É um sistema concebido para fazer o enchimento de detectores com pressões até 5000 Torr, com uma precisão de 1 Torr.

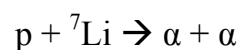
No início deste trabalho já se encontrava instalado e em funcionamento um sistema de alto vácuo, incluindo um espectrómetro de massa para análise do gás residual. A instalação e colocação em funcionamento deste equipamento foram realizadas por mim no decorrer do projecto final do curso de Eng. Física e, como já foi referido, a sua selecção e aquisição foi da responsabilidade da Prof. Dra. Filipa Isabel Borges Belo Soares. As especificações deste equipamento serão dadas mais à frente.

A

Acelerador de Iões Positivos

A.I – Introdução

Estávamos no ano de 1932 quando John Douglas Cockroft e Ernest Thomas Sinton Walton desenvolveram um sistema acelerador de partículas que realizou uma das mais importantes experiências em física nuclear: a primeira desintegração artificial da história [Cockroft, 1932]. Acelerando prótons a 125 keV observou-se a seguinte desintegração:



Esta experiência veio a tornar-se numa chave que abriu muitas portas à ciência, potenciando a importância dos sistemas que aceleram partículas. Esta contribuição, para a ciência em geral e para a física em particular, veio a ser merecedora da distinção com o Prémio Nobel no ano de 1951, sob o título ‘Transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles’ [Cockroft, 1951].

Os aceleradores de partículas são sistemas desenhados de forma a acelerar, a elevadas energias cinéticas, partículas electricamente carregadas, tais como electrões, prótons e iões (tanto positivos como negativos), as quais podem ser utilizadas para bombardearem alvos contendo outras partículas. Em resultado desse bombardeamento são inúmeros os trabalhos de investigação que têm sido e podem ser efectuados, dependendo do tipo de partículas aceleradas, da energia dessas partículas e do tipo de partículas que serão bombardeadas.

O primeiro acelerador de partículas bem sucedido foi um acelerador linear de dois estágios construído em 1928 por R. Wideroe. A este primeiro acelerador foi seguido o acelerador electrostático de R. J. Van de Graaff (1931), o ciclotrão de E. O. Lawrence (1931) e o, já referido, acelerador de Cockroft-Walton em 1932. Desde essa época foram sendo melhorados estes aceleradores, aumentadas as energias de aceleração e inventados outros tipos de aceleradores de partículas. Durante três décadas as energias dos aceleradores de partículas foram aumentando por um factor de dez a cada seis anos [Livingston, 1962]. A figura seguinte mostra a evolução em energia dos vários tipos de aceleradores em função do tempo.

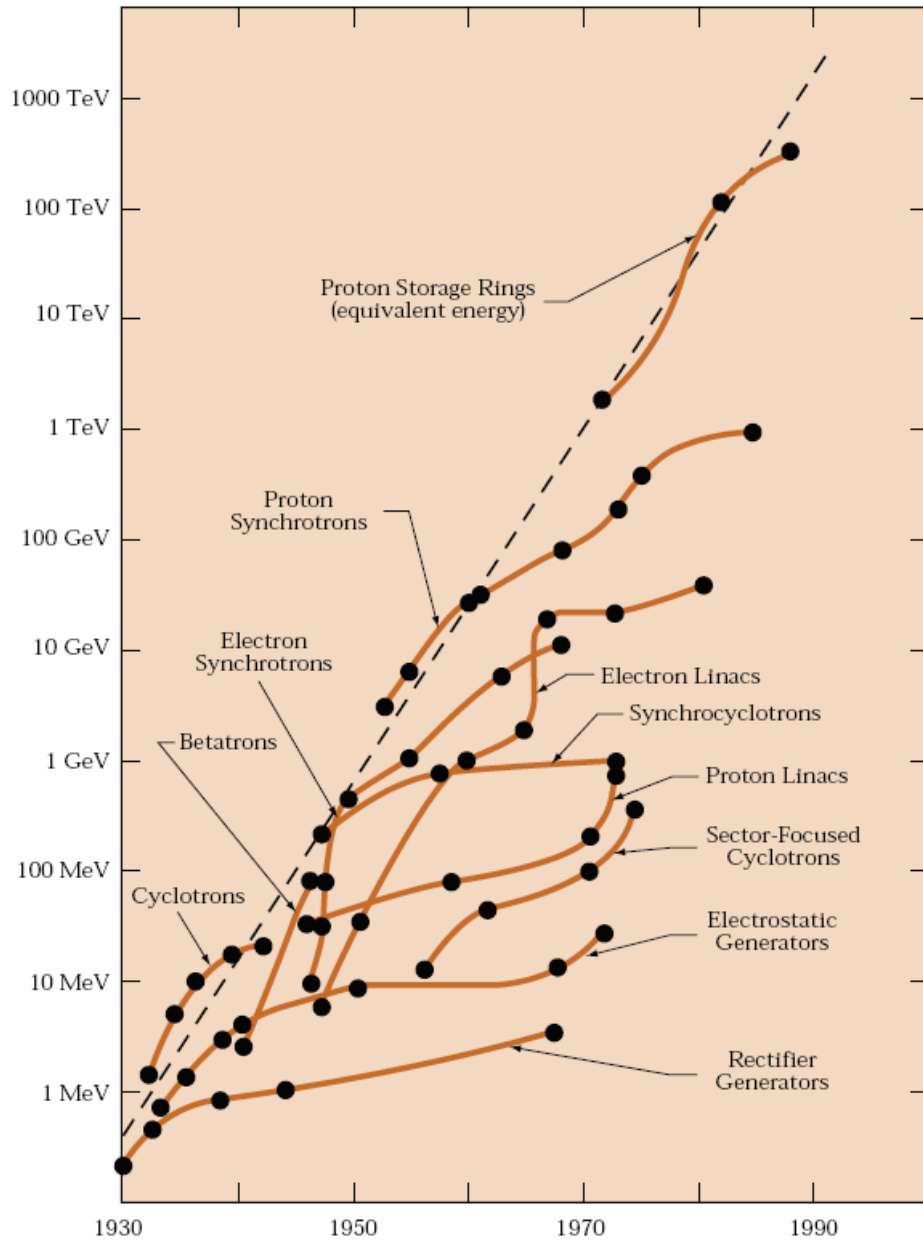


Figura 1 – Evolução, em energia, dos vários modelos de aceleradores de partículas em função do tempo. Figura tirada de [Panofsky, 1997].

De um modo geral, os aceleradores são constituídos por uma fonte de electrões ou de iões, um campo electromagnético para os acelerar, elementos para a focagem do feixe (campos electromagnéticos) e um alvo. A maior parte do sistema encontra-se no interior de um sistema em alto vácuo.

Actualmente existe uma grande e variada panóplia de aceleradores de partículas operando com energias que vão até aos TeV. A energia de aceleração é a principal característica dos aceleradores e com ela define-se o objecto de

investigação. São necessárias energias na ordem das centenas de keV, ou superiores, para as partículas penetrarem no interior do núcleo do átomo e desencadearem uma desintegração nuclear. Através de colisões das partículas aceleradas com a matéria, torna-se a possível criação de partículas: com energias de algumas centenas de MeV é possível a criação de múons e para energias na ordem dos GeV é possível a criação, por exemplo, de antiprotões.

O método mais simples para acelerar partículas carregadas electricamente é colocá-las sob um campo eléctrico criado por dois eléctrodos, onde um deles está a um potencial electrostático superior ao outro. A partícula adquire uma energia cinética qV (eV), onde q é a carga eléctrica da partícula em unidades de carga do electrão (em módulo) e V o potencial eléctrico entre os dois eléctrodos. Este método para acelerar partículas tem uma limitação no potencial de aceleração que é o potencial eléctrico de descarga (*electrical breakdown*) no tubo acelerador e do meio onde se encontra o terminal de alta tensão.

Os aceleradores de partículas podem ser classificados em três grandes grupos: os aceleradores DC (tensão contínua); os aceleradores lineares, onde não são aplicados campos magnéticos; os aceleradores circulares, onde são aplicados campos magnéticos.

No grupo dos aceleradores DC destacam-se os que usam multiplicadores de tensão, onde se inclui o acelerador de Cockroft-Walton e os electrostáticos, onde se inclui o acelerador Van de Graaff.

É no grupo dos aceleradores circulares que se situam os aceleradores de maiores energias. A este grupo pertencem, por exemplo, o ciclotrão, o sincrotrão, o sincro-ciclotrão e o betatrão, entre outros.

Nesta dissertação não é possível nem conveniente aprofundar o funcionamento dos vários aceleradores de partículas, por isso, irá ser de forma breve que se irá descrever os principais aceleradores DC, o acelerador Cockroft-Walton e o Van de Graaff, por serem do mesmo grupo de aceleradores que o acelerador de iões positivos construído neste trabalho.

O acelerador **Cockroft-Walton** é um acelerador que utiliza um multiplicador de alta tensão de Greinacher para se obterem as altas tensões

necessárias ao seu funcionamento (centenas de kV, no máximo poucos MV). O multiplicador de tensão Greinacher é constituído por um transformador de alta tensão alternada e a multiplicação da tensão é feita por múltiplos estágios construídos com diodos e condensadores, onde quanto mais estágios tiver, maior é a multiplicação do potencial (figura 2).

Aplicadas as altas tensões no topo do tubo acelerador, o funcionamento do acelerador de partículas é bastante simples: no topo do tubo acelerador, uma fonte de iões gera os iões que de imediato são acelerados, através de um tubo acelerador, em direcção a um alvo. O tubo acelerador encontra-se em vácuo para minimizar as colisões dos iões, com outras partículas, no seu percurso em direcção ao alvo. A energia cinética das partículas é dada por qV , tal como já foi referido. O esquema genérico está apresentado na figura seguinte.

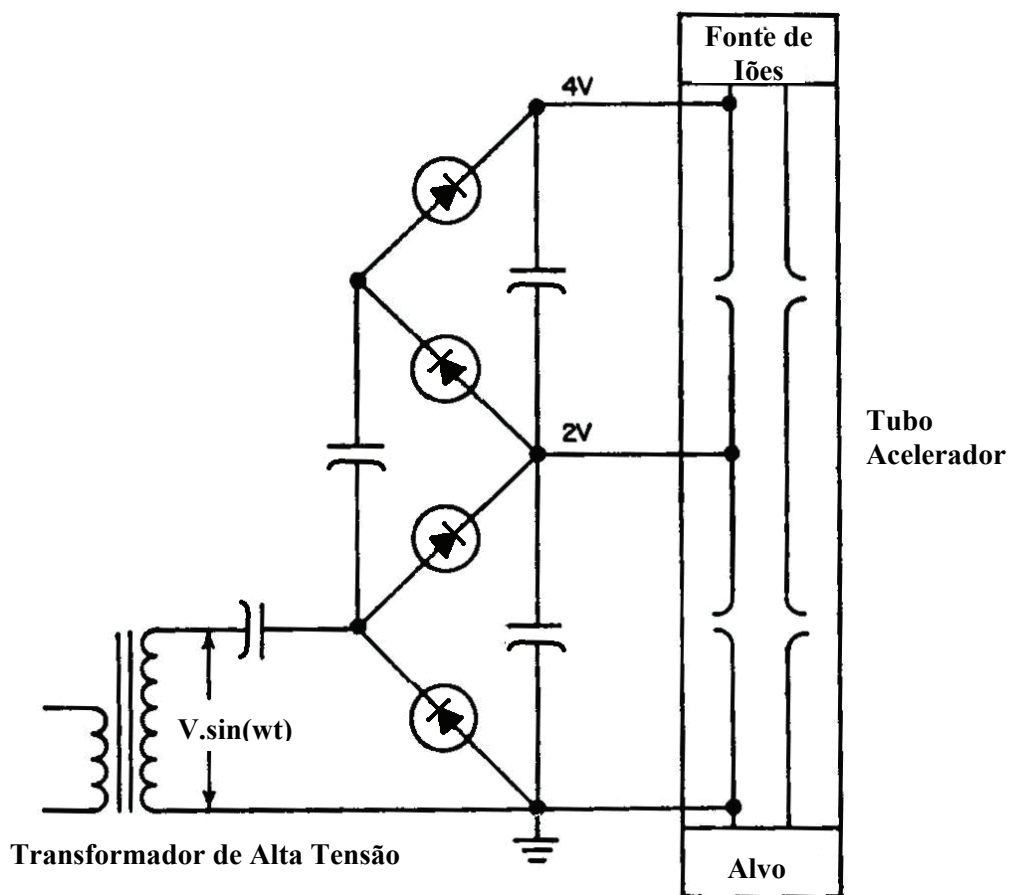


Figura 2 – Esquema do acelerador Cockroft-Walton que usa um multiplicador de alta tensão Greinacher. Figura tirada de [Gray, Pg. 8-323, 1972].

Outro tipo de acelerador de partículas electricamente carregadas usando altas tensões contínuas é o acelerador de **Van de Graaff**. O acelerador Van de Graaff usa os princípios simples da electrostática (gerador de Van de Graaff) para construir um dispositivo para a alta tensão. A estrutura principal usa uma esfera metálica que irá ser colocada a alta tensão positiva, que está suportada por uma coluna isoladora (figura 3). Uma fonte de alta tensão positiva ligada à terra, através de agulhas, provoca descargas eléctricas da correia para a fonte de alta tensão, ficando a correia positivamente carregada. Através de um motor, a correia mantém-se em rotação, transportando as cargas positivas para o interior da esfera principal. Um colector de cargas no interior da esfera transporta electrões da esfera para a correia que se encontra em défice de electrões. A remoção destes electrões da esfera principal faz com que passe a haver um excesso de cargas positivas. Esse excesso de cargas positivas, originado pela remoção de electrões, coloca a esfera a um potencial electrostático positivo. O potencial electrostático vai aumentando na medida em que se vão retirando electrões à esfera principal. O potencial máximo que se consegue obter está limitado pelas fugas de corrente que o sistema possa ter ou pelo potencial eléctrico de descarga do meio (*electrical breakdown*) [Van de Graaff, 1933].

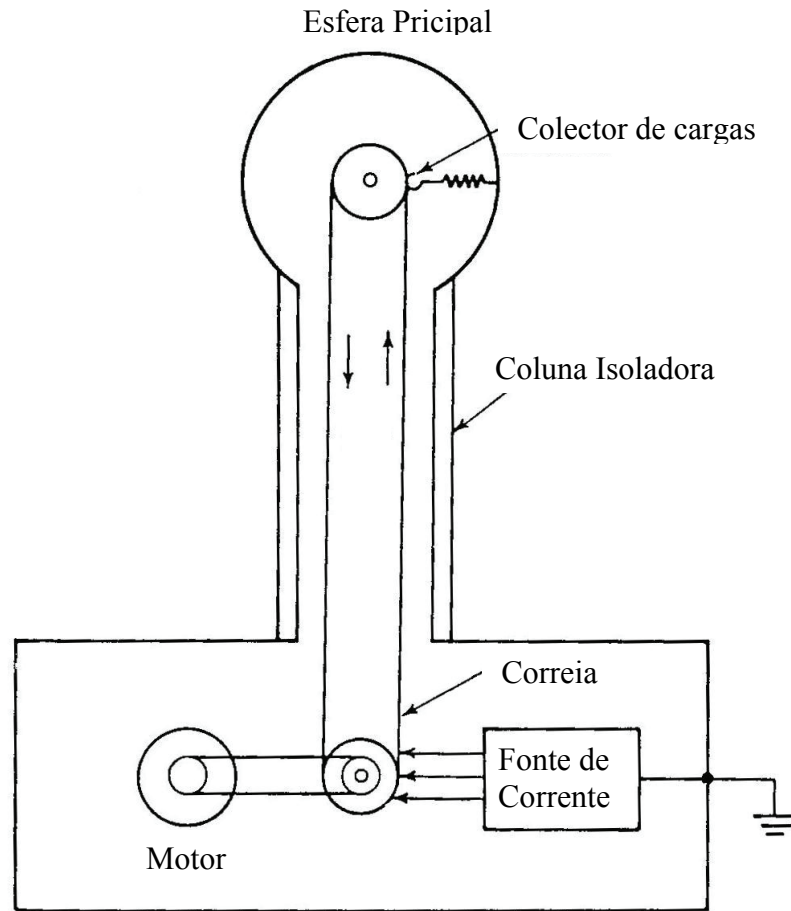


Figura 3 – Esquema do gerador de Van de Graaff. [Gray, Pg. 8-324, 1972]

Neste esquema está representado o sistema electrostático com o qual se conseguem os potenciais elevados (até dezenas de MV) para a aceleração das partículas.

No interior da esfera principal e ao mesmo potencial, encontra-se uma fonte de iões. Os iões ao serem gerados são de imediato acelerados, através de um tubo acelerador sob vácuo, em direcção a um alvo. O funcionamento do tubo acelerador é semelhante ao acelerador Cockroft-Walton.

Com a grande importância que os aceleradores de partículas vinham tendo, na ciência em geral e na física em particular, na década de 50 do passado século houve a vontade de parte dos professores de Física da Universidade de Coimbra em instalar um acelerador Van de Graaff de 6 MV. Era um projecto de grande envergadura, para o qual foram feitas algumas obras com vista à sua

colocação. De destacar a escavação efectuada no pátio junto ao agora Dep. de Física e a preparação da construção de uma torre para colocação, no seu interior, do acelerador de Van de Graaff. Por vários motivos foi um projecto que nunca veio a ser concretizado.

Na década de 60, oferecido pela Universidade de Manchester, chegou um antigo acelerador Van de Graaff de 2 MV para ser instalado no edifício do Dep. de Física da Universidade de Coimbra, que ainda se encontrava em construção. Com os sucessivos atrasos na conclusão do edifício do Dep. de Física (algo que só ocorreu em 1975) este acelerador nunca chegou a ser posto em funcionamento.

O interesse do orientador desta dissertação, o Prof. Dr. Carlos Alberto Nabais Conde, na instalação de um acelerador de partículas no Dep. de Física já vem desde essa altura, pois era um dos professores entusiastas para a aquisição do acelerador Van de Graaff na década de 50. Por dificuldades orçamentais, pela falta de espaço disponível, mas sobretudo, pelo interesse científico, o Prof. em questão interessou-se pela construção de um pequeno acelerador de iões positivos (até 50 kV). No final dos anos 90 começou a ser elaborado o projecto de construção e a ser adquirido a fonte de iões e algum do equipamento de vácuo.

Passado meio século, é com grande entusiasmo que finalmente se vê nascer um acelerador de iões positivos no Dep. De Física da Universidade de Coimbra.

Um pequeno acelerador de iões positivos de baixas energias, como este que acaba de ser instalado, tem a possibilidade estudar a fluorescência de raios X induzidos por partículas carregadas e medir as respectivas secções eficazes. Eventualmente, trabalhando com outros grupos, também se abre a possibilidade estudar as perdas de energia dE/dx dos iões na matéria. Aumentando o potencial do acelerador até 150 kV podem ser gerados neutrões para experiências de física de neutrões rápidos e a sua detecção.

Este acelerador vem desta forma abrir os horizontes de investigação do Grupo de Investigação Atómica e Nuclear (GIAN) do Dep. Física.

A.II – O Acelerador de Iões Positivos

O acelerador de iões positivos é constituído por vários módulos com funções distintas (figura 4) onde, em cada um, irão ocorrer processos físicos diferentes. Os módulos são os seguintes: uma fonte de iões alimentada por um módulo de electrónica flutuante; um tubo acelerador dos iões, em que a aceleração iónica ocorre devido a campos eléctricos; uma câmara de bombardeamento iónico, local onde se colocam os alvos a ser bombardeados pelos iões.

A fonte de iões está localizada no topo deste acelerador de iões positivos. É nela que é admitido o gás que irá ser ionizado. Na fonte de iões decorre o processo de ionização do gás e dela são extraídos os iões positivos.

Por baixo da fonte de iões está colocado o tubo acelerador. Neste local e, através de campos eléctricos, os iões irão ser acelerados até às energias previamente definidas (energias que poderão ir até 50 keV para iões monocarregados positivamente).

Os iões gerados na fonte de iões e acelerados no tubo acelerador irão agora interagir, por colisão, com os alvos colocados na câmara de bombardeamento iónico. Essa câmara encontra-se na base do acelerador de iões.

Associado ao acelerador de iões, está um sistema de alto vácuo, que inclui um espectrómetro de massa para a análise do gás residual no interior do acelerador.

A medição da pressão no interior do acelerador de iões é feita em dois locais diferentes por dois vacuómetros do tipo *Penning* (um na fonte de iões e outro à saída da câmara de bombardeamento iónico).

A altura total do acelerador de iões positivos é da ordem de 90 cm.

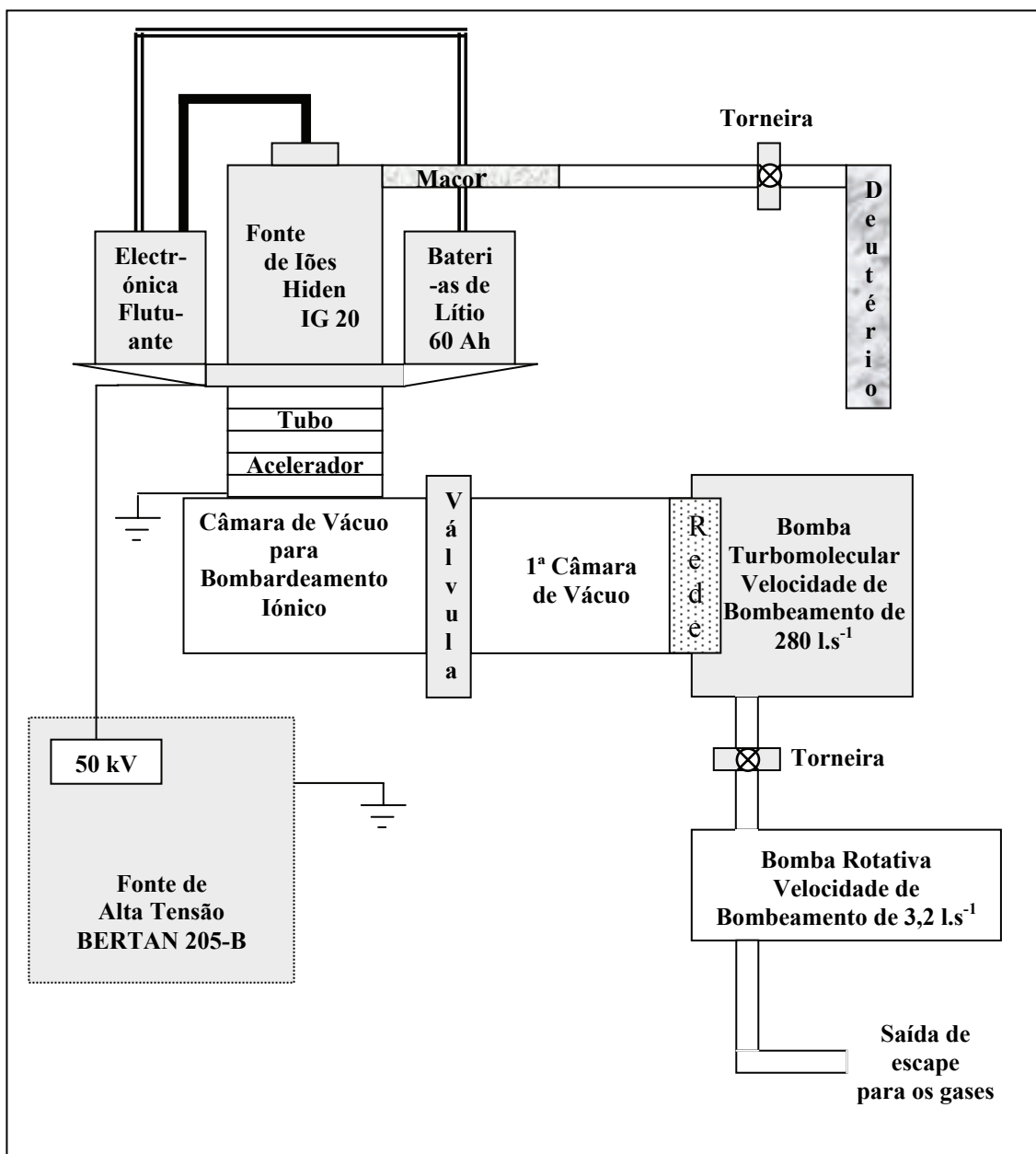


Figura 4 – Esquema genérico do sistema onde está incluído o acelerador de íons. Neste esquema está representado o sistema de alto vácuo (bomba rotativa, bomba turbomolecular, rede de protecção à bomba turbomolecular e 1ª câmara de vácuo). Separado por uma válvula de 6 polegadas de diâmetro (DN160 CF) está representado o acelerador de íons que inclui a fonte de íons, o tubo acelerador, a câmara de bombardeamento iónico e o sistema de alimentação do gás que foi utilizado no decorrer deste trabalho (deutério). Também está representado o módulo de electrónica flutuante e a fonte de alta tensão para o tubo acelerador de íons, bem como as baterias que alimentam o módulo de electrónica flutuante. Este esquema não está à escala nem está completo. Nele está contido o equipamento principal do acelerador de íons e do sistema de alto vácuo ao qual ele está associado.

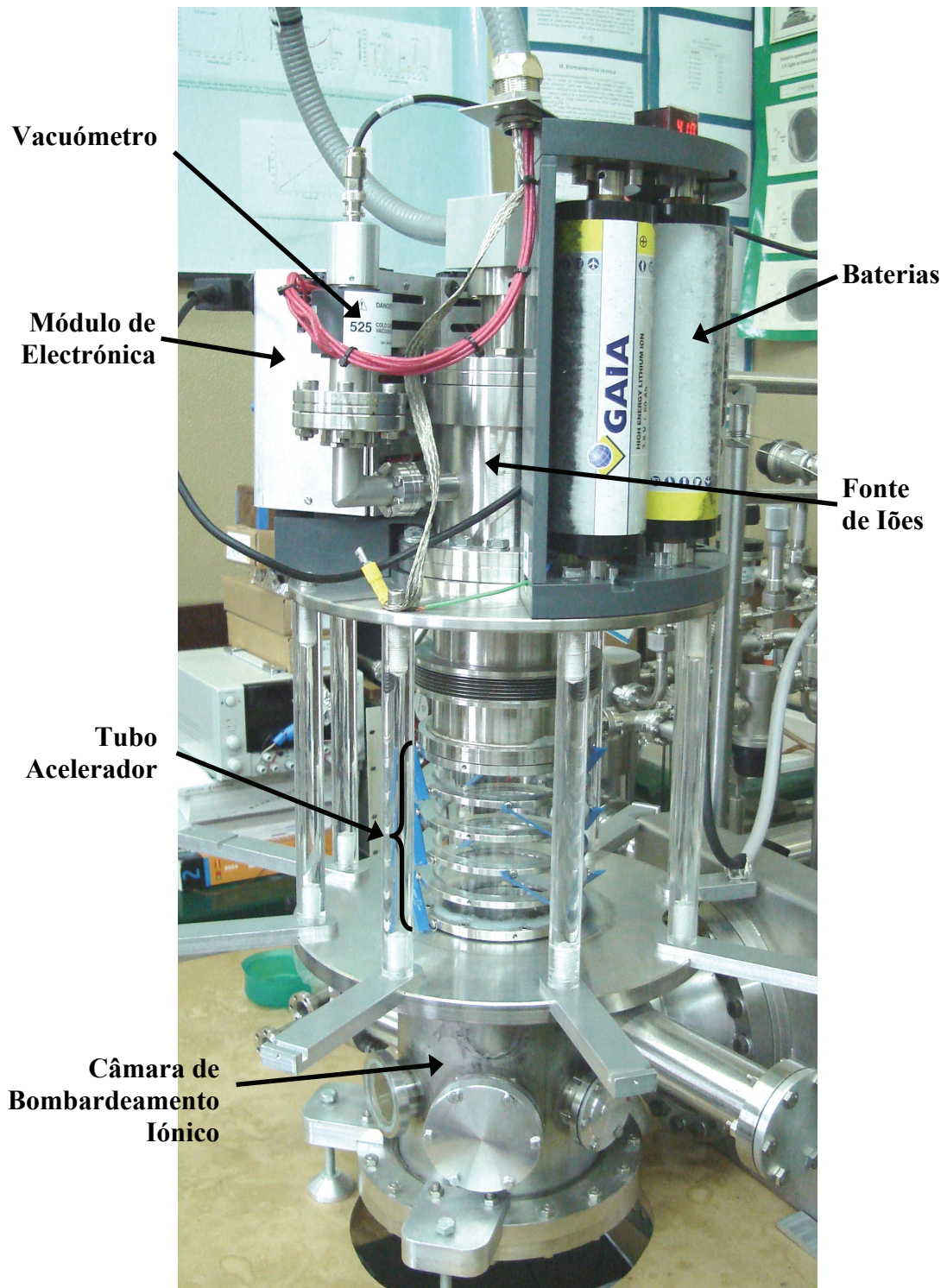


Figura 5 – Fotografia geral do acelerador de iões positivos. Esta imagem engloba a fonte de iões que se encontra no topo da imagem. À direita da fonte de iões estão as baterias que alimentam a electrónica da fonte de iões. Do lado esquerdo da fonte de iões está colocado um vacuómetro do tipo *Penning* para medir a pressão no interior da fonte de iões. Por trás do vacuómetro está o módulo de electrónica flutuante, de onde saem as altas tensões e as correntes (cabos vermelhos) necessárias ao funcionamento da fonte de iões. No centro da imagem está o tubo onde se dá a aceleração dos iões (tubo acelerador). Em baixo encontra-se a câmara de bombardeamento iónico. A altura total do acelerador de iões positivos ronda os 90 cm.

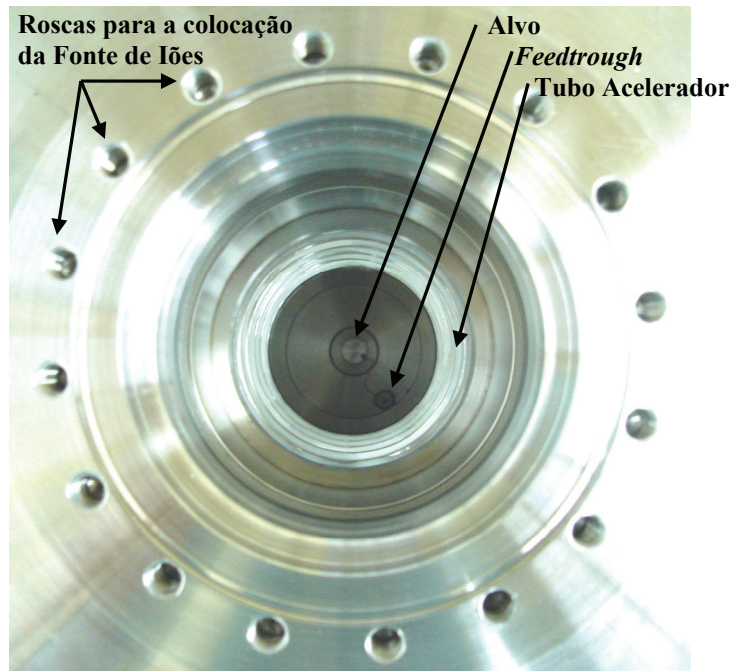


Figura 6 – Vista de topo do interior do acelerador de iões. A profundidade desta imagem ronda os 50 cm.

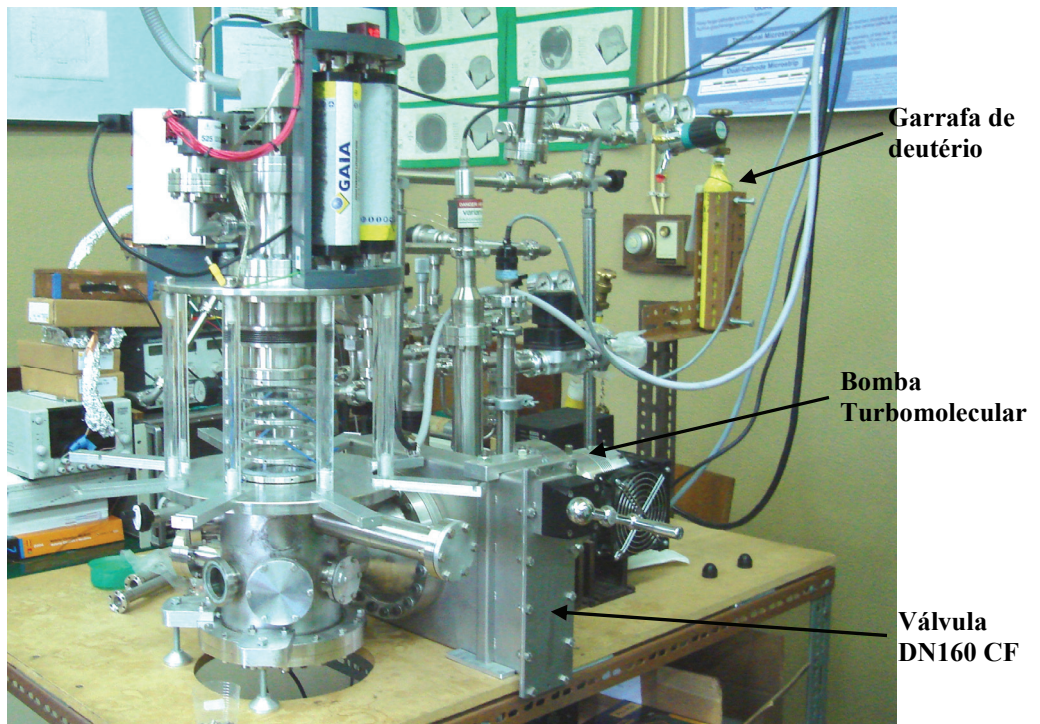


Figura 7 – Vista geral do sistema acelerador de iões positivos com o sistema de alto vácuo associado. Nesta imagem está visível o acelerador de iões (à esquerda) e o sistema de alto vácuo (à direita). Estes dois módulos estão separados por uma válvula da marca VARIAN, modelo DN160 CF. No canto superior direito está o suporte para a garrafa de gás que irá ser introduzido na fonte de iões (no caso desta fotografia tratava-se de uma garrafa de deutério).

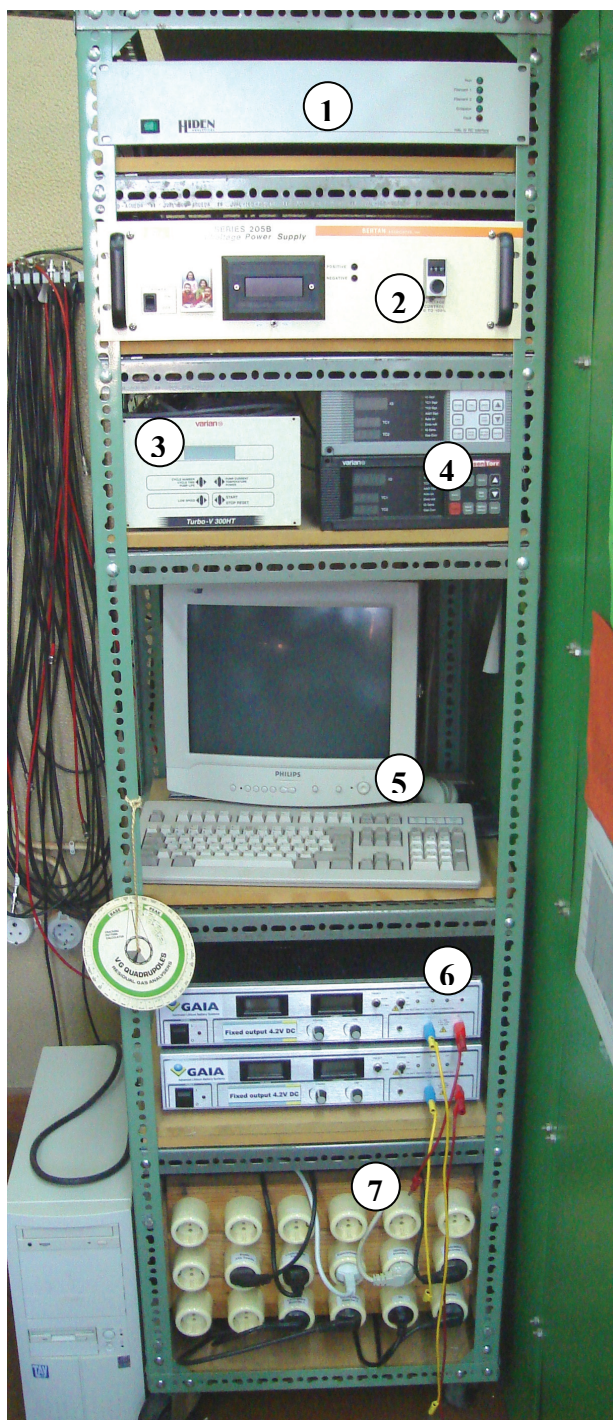


Figura 8 – Fotografia da *rack* de apoio ao equipamento associado ao acelerador de iões e ao sistema de alto vácuo. 1 – Unidade de controlo do analisador de gases residuais por espectrometria de massa quadrupolar da marca HIDEN, modelo HAL IV RC; 2 – Fonte de alta tensão para o tubo acelerador. É uma fonte da marca BERTAN, modelo 205-B; 3 – Controlador da bomba turbomolecular; 4 – Duas unidades de leitura de pressão da marca VARIAN, modelo CC2 senTorr; 5 – Computador que, através do *software* apropriado, é utilizado como controlador do espectrómetro de massa; 6 – Carregadores de baterias da marca GAIA; 7 – 18 tomadas de 220 V AC, para a alimentação do equipamento.



A.II.1 – A Fonte de Iões

A fonte de iões é um equipamento fundamental no funcionamento de um acelerador de iões. É nela que se dá a ionização do gás, a extracção dos iões e a focagem do feixe de iões. Todo o sistema é construído com base nas suas características técnicas e físicas.

A fonte de iões que já havia sido adquirida para fazer parte deste acelerador de iões positivos de baixas energias é da marca HIDEN, modelo IG20. É uma fonte de iões onde o processo de ionização é feito por bombardeamento de electrões acelerados.

O fabricante desta fonte de iões também vende um módulo de electrónica que fornece as altas tensões e as correntes, necessárias ao seu funcionamento. No entanto esse módulo não foi adquirido, pois era um módulo que não funcionava com tensões de referência flutuantes. O trabalho para o qual se pretendia utilizar obrigava a utilização de um módulo de electrónica flutuante.

A fonte de iões tem, em cima, uma entrada do tipo DN16 CF para a introdução do gás que irá ser utilizado no acelerador de iões. Tem uma outra entrada similar na qual está instalado um vacuómetro do tipo *Penning* (imagem da direita), de modo a tornar possível a



monitorização da pressão no interior da fonte de iões. O acoplamento ao resto do sistema é feito por uma ligação do tipo DN100 CF. No topo da fonte de iões está um passador (*feedthrough*) com seis vias: três vias para as altas tensões (1-fonte, 4-extractor e 2-focagem), duas vias para as correntes dos filamentos (3 e 6) e uma via para a tensão de referência (5), que pode ser a terra ou altas tensões (imagem da esquerda). Esse passador é ligado a uma tomada que faz a ligação ao módulo de electrónica flutuante.

As dimensões da fonte de iões são aproximadamente 20 cm de altura e 15 cm de diâmetro.

Para a instalação da fonte de iões foi preciso projectar uma plataforma que iria fazer a ligação entre a fonte de iões e o tubo acelerador. Nessa mesma plataforma teria de haver espaço para a colocação do módulo de electrónica flutuante e para as baterias que iriam alimentar esse módulo. Essa plataforma foi projectada em aço inox com 30 cm de diâmetro (ver desenho “plataforma” que se encontra no Anexo 1).

Para a introdução do gás no interior da fonte de iões construiu-se uma linha de alto vácuo, na qual se encontra instalada uma válvula de agulha e um manorredutor para a instalação da garrafa do gás a ionizar. O isolamento eléctrico desta linha de alto vácuo é feito recorrendo a um tubo para alto vácuo construído em MACOR® (cerâmica isoladora).

O esquema do interior da fonte de iões é apresentado na figura 9.

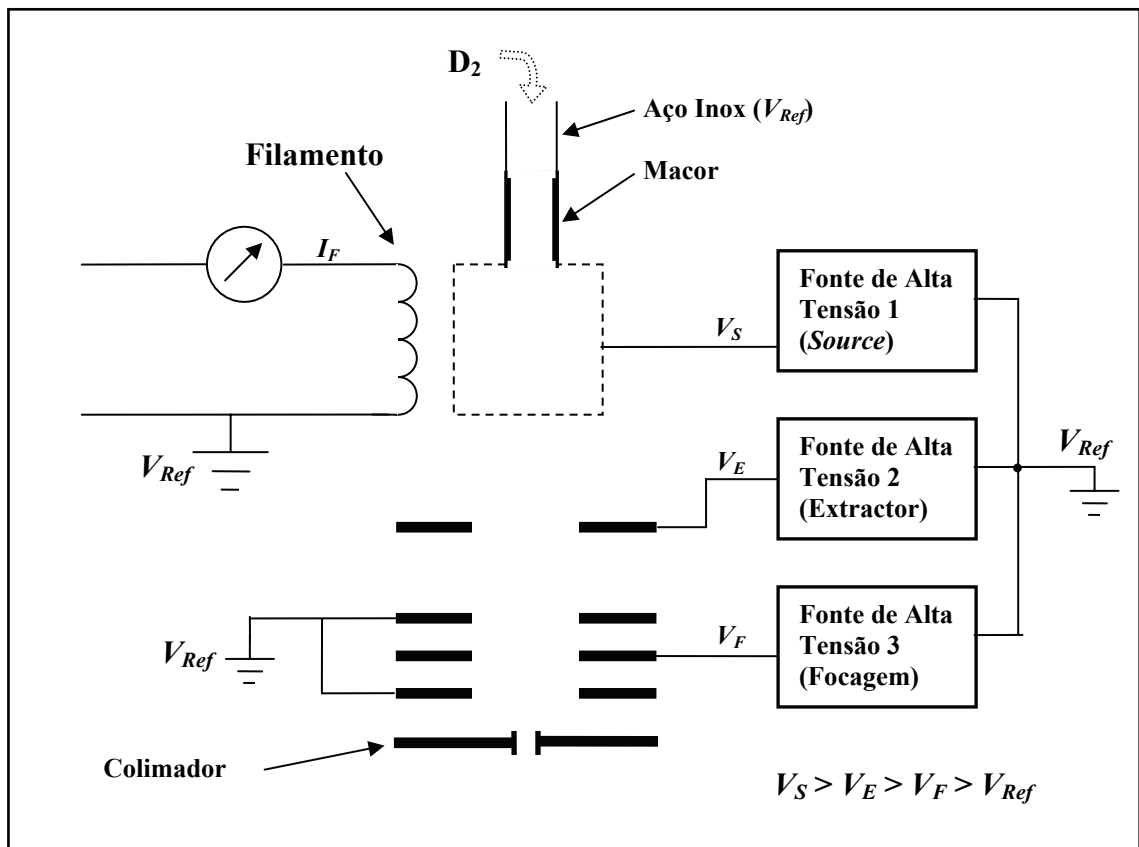


Figura 9 – Esquema genérico do interior da fonte de iões.

Sucintamente, descreve-se o seu funcionamento do seguinte modo:

- Introdução do gás a ser ionizado: em funcionamento, a pressão no interior da fonte de iões, por indicação do fabricante, não deve ser superior a 10^{-4} Torr, para não se correr o risco de danificar o filamento da fonte de iões. O controlo do fluxo de gás é feito por uma válvula de agulha. O gás é introduzido na fonte de iões e nela é conduzido por tubagens que o levam a passar junto de um filamento de irídio.
- Através do passador de seis vias, são aplicadas as altas tensões apropriadas na fonte (*source*), no extractor e na focagem, corrente num dos filamentos (a fonte tem dois, mas utiliza um de cada vez) e a ligação à tensão de referência.
- A corrente ao passar no filamento, por efeito Joule, aquece-o e são emitidos, por efeito termoiónico, electrões da superfície do filamento.

- Os electrões são acelerados em direcção a uma gaiola (fonte) que está a uma tensão positiva (fonte de alta tensão 1), ficando no seu interior (ou entrando e saindo) até serem recolhidos por essa mesma gaiola. Nesse percurso, através de colisões, são ionizados positivamente átomos do gás que se encontra no interior da fonte.
- Os átomos ionizados positivamente são extraídos para fora da fonte (*source*) pelo extractor, pelo facto do seu potencial ser inferior ao da fonte (fonte de alta tensão 2).
- À saída do extractor encontram-se três eléctrodos com tensões de $0\text{ V} - V_F - 0\text{ V}$, respectivamente (V_F é a designada tensão de focagem). Estes três sectores formam uma lente electrostática de Einzel. Esta lente tem por função a focagem do feixe de iões (fonte de alta tensão 3). A saída dos iões do interior da fonte de iões processa-se através de um colimador. Como só uma pequena percentagem das partículas constituintes do gás é ionizada ($< 1\%$), existe um grande número de partículas não ionizadas. À saída do extractor, a tubagem pelo qual circula o gás é feita de rede, permitindo a saída do gás não ionizado do interior da região de focagem dos iões.

Findo este processo encontram-se na base da fonte de iões os iões positivos que irão ser utilizados no processo de bombardeamento iónico.

O interior da fonte de iões, onde se encontram todos os componentes descritos no funcionamento, pode ser retirado, ficando acessível para eventuais reparações, tais como, substituições dos filamentos ou outros procedimentos de reparação e manutenção. A figura seguinte mostra, em pormenor, o interior da fonte de iões.

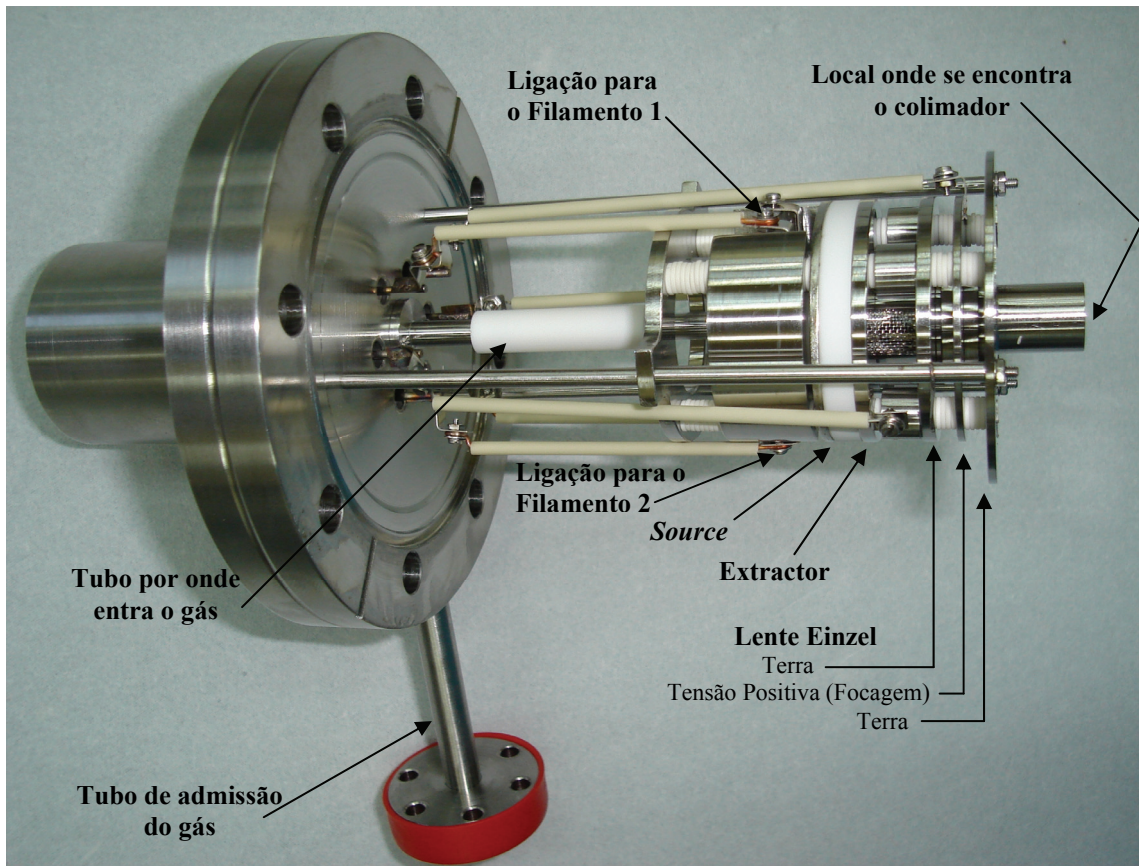


Figura 10 – Imagem do “núcleo” da fonte de íons. Nela estão indicadas as principais componentes que fazem parte do interior da fonte de íons (apenas são visíveis as ligações para os filamentos, os filamentos em si não são visíveis).

O número de átomos e moléculas ionizados durante o processo de ionização no interior da fonte de íons depende directamente da corrente de aquecimento do filamento, da pressão do gás no interior da fonte, da natureza do gás e da energia dos electrões. Da corrente do filamento está dependente o número de electrões que são emitidos pelo filamento. Da pressão, da natureza do gás e da energia dos electrões está dependente a secção eficaz de ionização dos átomos ou moléculas presentes no interior da fonte de íons.

Nem todas as partículas que são ionizadas chegam à câmara de bombardeamento iónico. Essa eficiência depende das tensões colocadas no extractor, na focagem, das impurezas presentes no acelerador e, também, da pressão no interior do acelerador.

O extractor tem a função de extrair os íons do interior da fonte (*source*). Esta tensão terá que ser obrigatoriamente inferior à tensão da fonte. A tensão de focagem tem por missão focar o feixe no alvo. Do valor desta tensão depende a

largura do feixe. Se essa largura for superior à dimensão de abertura do colimador, existirão iões que não irão colidir com o alvo por não terem passado no colimador. Ao combinarem-se com as impurezas os iões podem perder-se. Mesmo sem se combinarem, os iões podem-se perder através de colisões elásticas com outras partículas (processos de difusão) ou recombinarem-se com electrões. A probabilidade de existirem colisões aumenta com o aumento da pressão no interior do acelerador de iões.

Nesta fase do projecto, a interacção dos iões na câmara de bombardeamento iónico será feita pela colisão dos iões num alvo plano e circular com um diâmetro de 2 cm. Essa recolha iónica irá originar uma corrente positiva. A ordem de grandeza dessa corrente, numa primeira aproximação, pode ser estimada teoricamente.

Como

$$(1) \quad I = \frac{dQ}{dt} \quad A$$

o número de electrões que sai do filamento por unidade de tempo (N_{e^-}) em direcção à fonte é dado por:

$$(2) \quad \frac{I}{q} = N_{e^-} \quad \text{electrões/s}$$

I – Corrente de electrões recolhida na fonte (*source*)

O número de partículas (N_p) que se encontram no interior da fonte por unidade de volume para gases ideais é dado por:

$$(3) \quad N_p = P \times \frac{6,0 \times 10^{23}}{22,4 \times 10^3 \times 760} \quad \text{partículas/cm}^3$$

P – Pressão no interior da fonte em Torr

O número de partículas ionizadas pelos electrões por unidade de tempo é dado pela seguinte expressão:

$$(4) \quad N_i = N_e \times N_p \times x \times \sigma \quad \text{iões/s} \quad (\text{se } N_i \ll N_e)$$

x – Distância percorrida pelos electrões até serem recolhidos na fonte, em cm

σ – Secção eficaz do gás para os electrões, em cm^2

Estes iões, ao colidirem no alvo irão induzir uma corrente designada por I_{Alvo} . O valor dessa corrente calculado a partir das expressões atrás referidas, será sempre uma aproximação, pois nem todas as partículas irão chegar ao alvo, por outro lado, também os electrões secundários gerados no processo de ionização podem iniciar novos processos de ionização de outras partículas. Deste modo, o cálculo da corrente iónica no alvo será sempre uma estimativa e irá ser calculada no capítulo A.III.

Na tabela seguinte estão as indicações dadas pelo fabricante para a utilização da fonte de iões, bem como um exemplo típico para utilização de árgon para o bombardeamento iónico.

Variáveis	Valores Típicos	Exemplo
Corrente de emissão electrónica	0 a 30 mA	10 mA
Corrente no Filamento	4,5 A	3,5 A
Energia dos Iões	500 a 5000 eV	5000
Pressão na Fonte	8×10^{-5} Torr	8×10^{-5} Torr
Corrente Iónica	0 a 800 nA	600 nA
Espécies de Iões	Gases Inertes	Ar

Tabela 1 – Tabela indicativa dos parâmetros de operação da fonte de iões e os valores típicos de operação utilizando o árgon a uma pressão de 8×10^{-5} Torr e uma corrente no filamento de 3,5 A (dados fornecidos pelo fabricante da fonte de iões).

Por indicação do fabricante, a tensão aplicada na fonte (V_S) pode ir até 5 kV, a tensão no extractor (V_E) deve ser de $V_S - 300$ V e a tensão de focagem (V_F) será 60% da tensão V_S . A corrente de aquecimento do filamento (I_F) poderá ir até 4,5 A. A pressão no interior da fonte de iões não deve ultrapassar 10^{-4} Torr.



A.II.2 – O Tubo Acelerador

O tubo acelerador tem a função de acelerar os iões positivos gerados na fonte de iões. Colocando uma tensão positiva (V_{Ref}) no topo do tubo acelerador e estando a base a 0 V, dado os iões terem carga positiva, são acelerados pelo campo eléctrico gerado no interior do tubo acelerador.

Para a construção deste tubo acelerador já haviam sido adquiridos os anéis em vidro. Foi necessário projectar e conceber anéis em aço inox para, com os anéis de vidro, construir o tubo acelerador. Para a instalação do tubo acelerador na base da fonte de iões e por cima da câmara de bombardeamento iónico foi necessário projectar os anéis do topo e da base com as características necessárias a essa instalação (ver os desenhos que se encontram no Anexo I).

Este tubo acelerador é assim constituído por seis anéis em aço inox, separados por 5 anéis de vidro. A construção do tubo acelerador foi feita colando os anéis de aço inox e os anéis de vidro alternadamente. A colagem foi feita com uma cola isoladora específica para utilizações em sistemas de alto vácuo, da marca TRA-BOND, modelo BB-2116. O tubo acelerador tem um diâmetro interior de 88 mm. A altura total do tubo acelerador é da ordem de 110 mm.

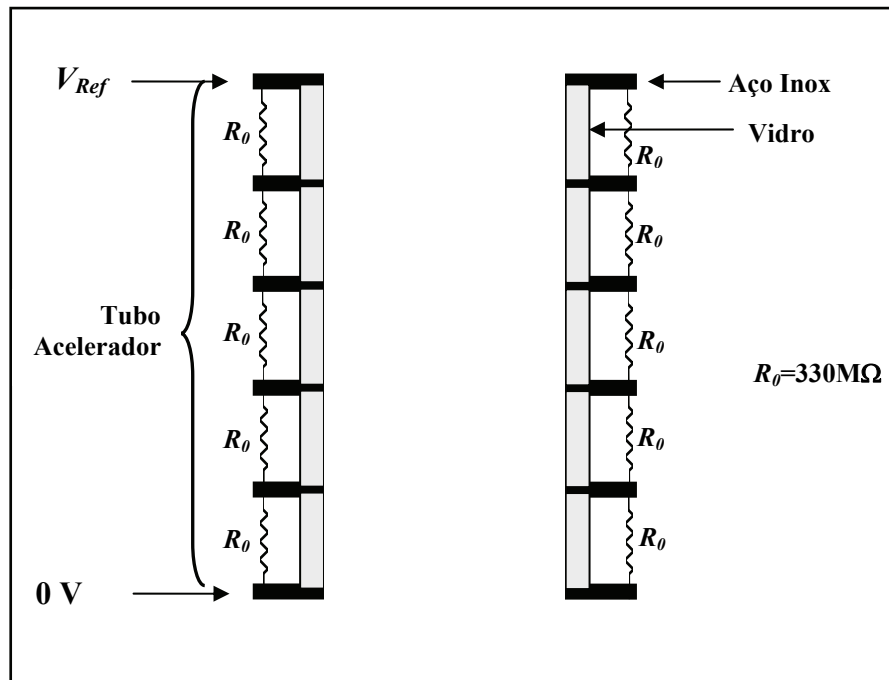


Figura 11 – Esquema do tubo acelerador.

Os anéis de aço inox estão ligados entre si por duas resistências (R_0) em paralelo de $330 \text{ M}\Omega$ cada. Estas resistências fazem com que a queda de tensão seja igual de anel para anel.

As resistências são de elevado valor óhmico para que a potência dissipada seja mínima, pois a fonte de alta tensão apenas pode debitar correntes até $0,3 \text{ mA}$. Com um total de 10 resistências em paralelo duas a duas, temos uma resistência total entre o topo e a base do tubo acelerador de $825 \text{ M}\Omega$. Colocando a tensão máxima que pode ser fornecida pela fonte de alta tensão (50 kV), a corrente que atravessa as resistências é de $0,06 \text{ mA}$, muito abaixo da corrente máxima de operação da fonte de alta tensão. A fonte de alta tensão é da marca BERTAN, modelo 205-B.

Na construção do tubo acelerador havia a necessidade que as linhas de campo eléctrico na região do eixo vertical que passa no centro do tubo acelerador (local por onde irão passar os iões acelerados) fossem uniformes e segundo o eixo do tubo acelerador, para que os iões não sofressem desvios na sua trajectória. Foi com base nisso que se optou por um tubo acelerador constituído por anéis. Como os anéis de vidro têm 17 mm de altura e 88 mm de diâmetro interior, a distância entre dois anéis condutores é muito menor que o diâmetro

interior do anel. Esse facto leva a que o efeito de bordo dos campos eléctricos no centro do tubo acelerador seja desprezável, considerando, desta forma, que o campo eléctrico na região central do tubo acelerador (junto ao eixo vertical) é constante.

A figura seguinte representa a simulação dos vectores de campo eléctrico recorrendo ao programa informático Maxwell SV, versão 9.0. O topo da imagem (região 1) corresponde ao local onde se encontra a fonte de iões e a base da imagem (região 2) corresponde à câmara de bombardeamento iónico. O material de cor azul corresponde ao aço inox e o vermelho corresponde ao vidro.

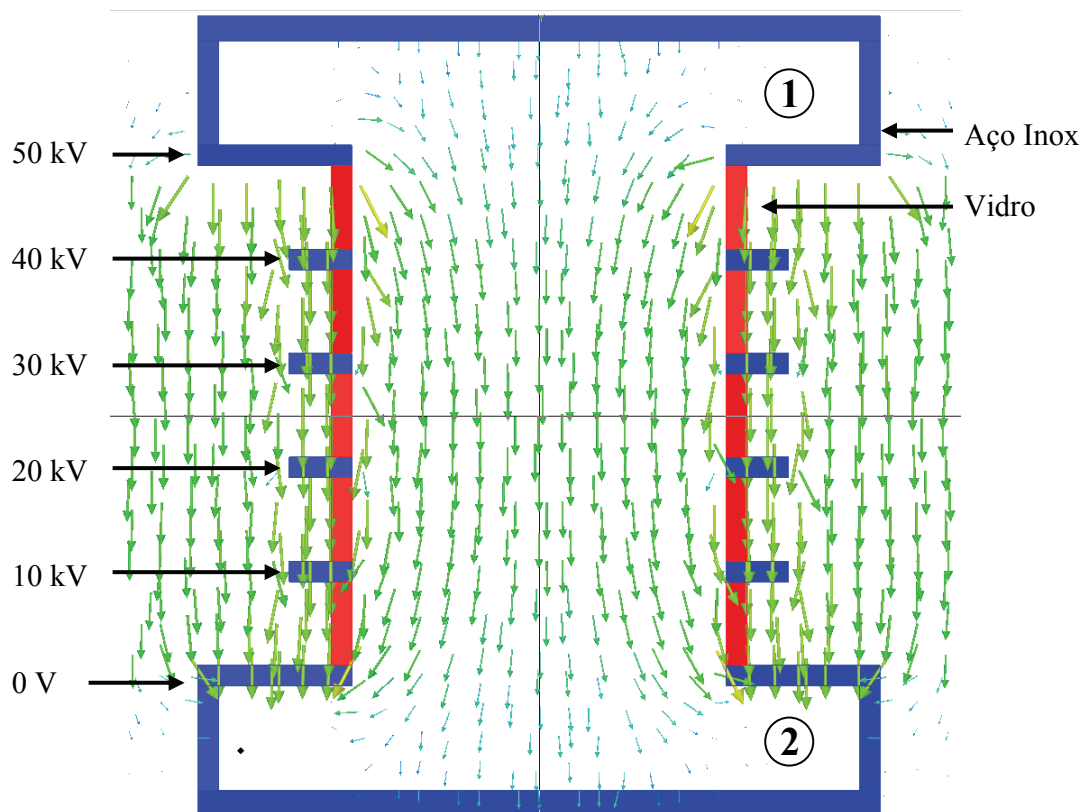


Figura 12 – Simulação dos vectores do campo eléctrico no interior do tubo acelerador, recorrendo ao programa informático Maxwell SV, versão 9.0.

Nesta figura podem ser observados os vectores de campo eléctrico no interior do tubo acelerador e constatar que na região central (junto ao eixo vertical) esses vectores têm a direcção axial, como se pretendia.

Como o tubo acelerador tem na sua constituição anéis de vidro torna-se bastante frágil (figura 13). Como a fonte de iões, as baterias e o módulo de

electrónica, são equipamentos a colocar no topo do tubo acelerador, foi necessário apoiar a plataforma que suporta todo este equipamento, para que não seja exercida pressão no tubo acelerador. Assim, apoiou-se a plataforma em oito pilares de *Perspex*, que é um material isolador. Para fazer a ligação entre essa plataforma e o tubo acelerador, adquiriu-se um fole (*bellows*) que tem a função de ajustar, sem esforço mecânico, as ligações entre a plataforma superior do tubo acelerador e o tubo propriamente dito. Na base do tubo acelerador encontra-se a câmara de bombardeamento iónico.

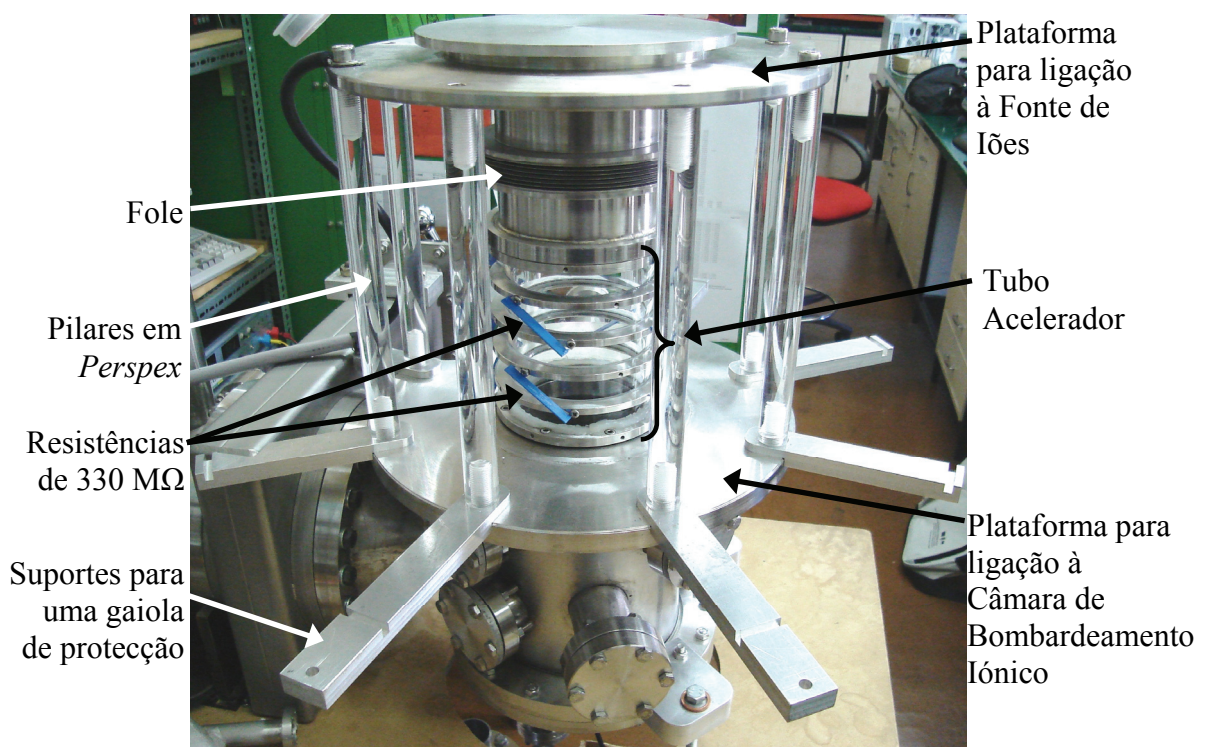
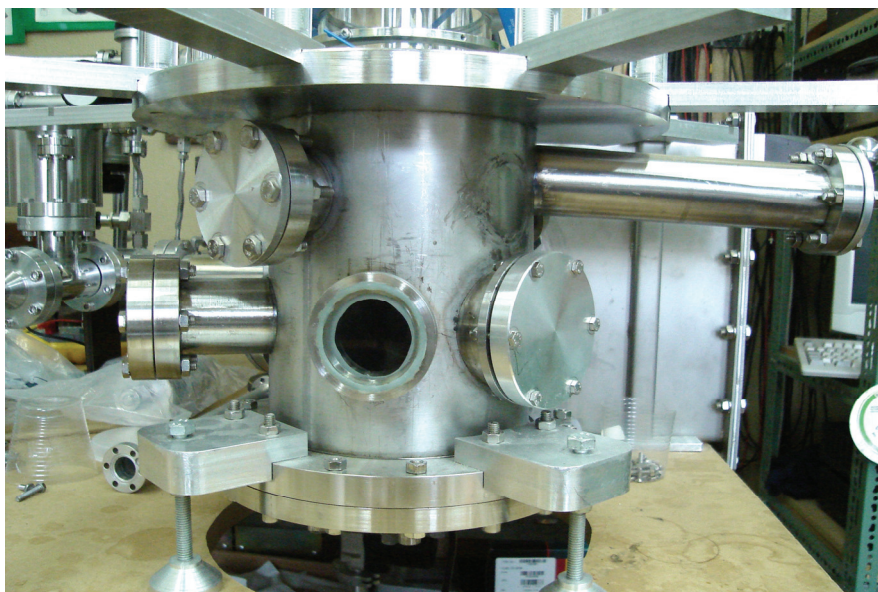


Figura 13 – Tubo acelerador, fole, resistências, suportes para a colocação de uma gaiola de protecção às altas tensões e plataformas para as ligações à fonte de iões e à câmara de bombardeamento iónico.



A.II.3 – A Câmara de Bombardeamento Iónico

Na câmara de bombardeamento iónico é onde se irá dar a colisão dos iões, provenientes da fonte de iões, com um alvo. É uma câmara constituída por diversas aberturas (seis ao todo) nas quais podem ser instalados vários detectores de radiação. Tem duas janelas de vidro, para ser possível a observação do interior da mesma. Tem ainda um tubo, no qual se pode colocar um espectrómetro de massa.

Na base da câmara de bombardeamento iónico está colocado um passador (*feedthrough*) que faz a ligação eléctrica do interior com o exterior da câmara para eventuais recolhas de sinais eléctricos. A base é constituída por três *flanges*: uma maior que torna possível o acesso pleno ao interior da câmara. Uma *flange* mais pequena, onde está instalado o passador. A mais pequena, do tipo DN40 CF serve para a colocação dos alvos no interior da mesma (figura 14). As dimensões da câmara são de aproximadamente 28 cm de altura e 20 cm de diâmetro.

No início deste nosso trabalho já estava construída parcialmente a câmara de bombardeamento iónico.

Para a colocação desta câmara no acelerador de iões foi necessário projectar e instalar uma plataforma para o topo da câmara de bombardeamento iónico, na qual irá ser colocado o tubo acelerador, fazer as colagens das duas janelas de vidro e projectar e instalar a base da câmara de modo a tornar fácil o acesso ao seu interior. Os desenhos destas peças encontram-se no Anexo I.

A figura seguinte mostra a base da câmara de bombardeamento iónico vista pelo interior e pelo exterior do acelerador de iões.

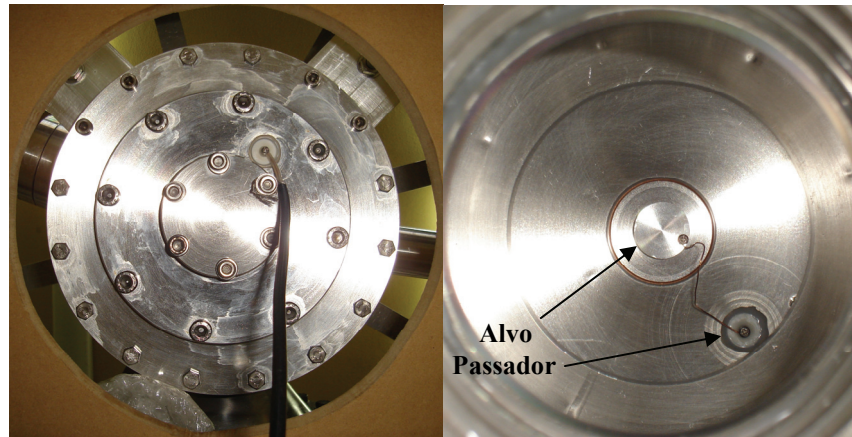
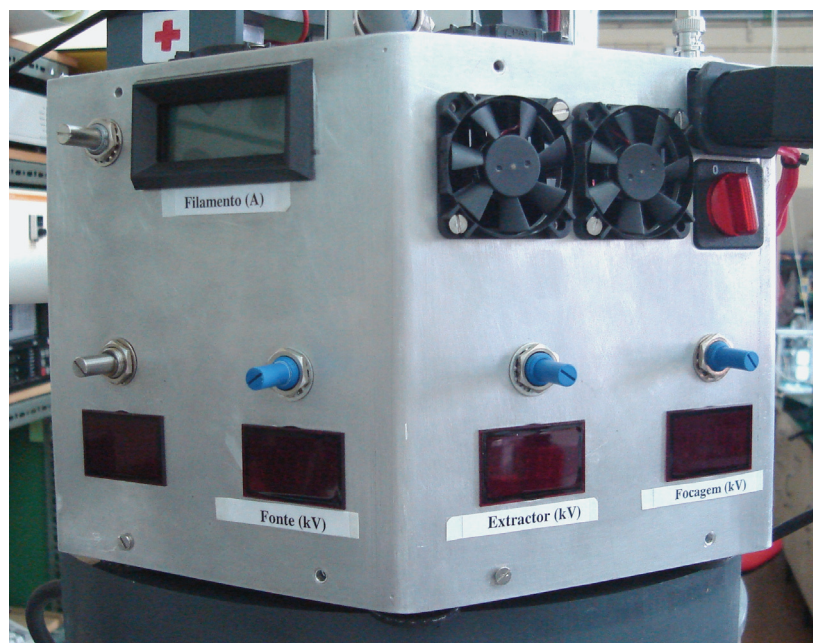


Figura 14 – Vista da base do acelerador de iões. À esquerda é a vista da base pelo exterior do acelerador. Nesta imagem é possível distinguir as três *flanges* que a constituem e o passador que se encontra ligado ao alvo. À direita encontra-se a vista da base pelo seu interior. Nesta imagem distingue-se o alvo que se encontra no centro com ligação ao passador. Este alvo servirá para a recolha dos iões. É um alvo que está isolado electricamente do acelerador por estar apoiado num suporte em MACOR®.

No topo da câmara de bombardeamento iónico estão colocados oito suportes (figura 13). Estes suportes servirão para a futura instalação de uma “gaiola” de protecção das altas tensões colocadas no topo do acelerador. Irá estar ligada à terra, fazendo a protecção do equipamento instalado contra eventuais descargas eléctricas, bem como dos utilizadores do acelerador. Também serve de protecção contra um contacto directo accidental com as altas tensões.



A.II.4 – A Unidade de Electrónica Flutuante

A necessidade de colocar tensões elevadas no topo do acelerador de iões (dezenas de milhar de volt) implica a necessidade de ter disponível um módulo de electrónica, para alimentar a fonte de iões, com uma tensão de referência igual à tensão colocada no topo do tubo acelerador (V_{Ref}), pois era a tensão a que iria ficar a fonte de iões. Para satisfazer esta necessidade foi projectada e construída uma unidade de electrónica flutuante alimentada por baterias. As baterias também teriam de ter dimensões e peso reduzidos, pois a sua localização teria de ser no topo do acelerador de iões, juntamente com o módulo de electrónica e a fonte de iões.

Para o estudo do consumo energético do módulo de electrónica havia a necessidade de saber qual a temperatura de funcionamento do filamento (de irídio) e a respectiva resistência eléctrica. A indicação do fabricante é de que a 4,5 A a temperatura do filamento situar-se-á em torno dos 1400°C. A medida da resistência à temperatura ambiente é de aproximadamente 0,2 Ω . Utilizando a

expressão seguinte, calculou-se a resistência eléctrica do filamento à temperatura de 1400°C. A seguinte expressão é uma aproximação por defeito, mas serve perfeitamente dadas as aproximações consideradas.

$$(5) \quad R = R_0 \times (1 + \alpha \times T)$$

R_0 – Resistência a 0°C $\approx 0,2\Omega$

α – Coeficiente de temperatura (0,0039 C⁻¹ para o irídio)

T – Temperatura (°C)

Fazendo os cálculos determina-se que a resistência eléctrica do filamento a 1400°C é aproximadamente 1,3 Ω . Como a resistência medida à temperatura ambiente tem pouco rigor (devido à falta de precisão do ohmímetro) e como a temperatura do filamento só se atinge com correntes de 4,5 A, fizeram-se os cálculos admitindo uma resistência de referência para o filamento de 1 Ω .

A unidade de electrónica tinha de ter as seguintes características: quatro fontes de alta tensão (até 5 kV) e uma fonte de corrente para o filamento da fonte de iões (até 5 A). As fontes de tensão utilizadas são de baixa potência (1 W) e a potência da fonte de corrente na ordem de 25 W (a resistência de referência para o filamento é de 1 Ω). A potência consumida pela fonte de iões pode assim ir até um valor na ordem de 30 W.

Como o módulo de electrónica consome energia era necessário ter uma ideia do consumo total de energia. Analisando os componentes que se iriam utilizar, fez-se uma previsão de consumo em torno dos 50 W (esta previsão está detalhadamente explicada mais à frente neste capítulo). Para a fonte de iões poder estar a ser alimentada consecutivamente durante um dia de trabalho (8 a 10 horas) teriam de se optar por baterias com grande capacidade mas de dimensão reduzida, porque o espaço físico disponível era bastante limitado. Foi feita uma procura e encontradas no mercado baterias de iões de lítio de 3,6 V, com uma capacidade de 60 A.h (aproximadamente 220 W.h). Estas baterias são da marca GAIA, modelo 60 Ah HE-602030. Com esta capacidade três baterias tinham disponível energia suficiente para alimentar o circuito durante doze horas. A tensão de operação das baterias varia entre 3,0 e 4,2 V. Foi então idealizado um

circuito alimentado por 3 baterias em série (V_1 , V_2 e V_3 nas figuras 15 e 17). A tensão de saída das 3 baterias em série varia entre 9,0 e 12,6 V, dependendo do facto de as baterias estarem totalmente carregadas ou não.

O módulo de electrónica foi construído em dois blocos independentes: um para a alimentação do circuito das fontes de alta tensão (figura 15); outro para alimentar o circuito da fonte de corrente (figura 16).

O circuito que alimenta as fontes de alta tensão foi projectado para funcionar com uma tensão de alimentação de 5 V. Assim, colocou-se um regulador de tensão (LM323K) com uma tensão de entrada compreendida entre 7,5 e 15,0 V (para abranger o intervalo de tensões de saída das três baterias em série) e uma tensão de saída constante de 5 V. A potência máxima de consumo do regulador de tensão ronda os 30 W, sendo potência máxima de saída de 15 W. Deste modo, a eficiência do regulador de tensão situa-se próxima de 50%. O intervalo de tensões de entrada proporciona também a hipótese do circuito ser alimentado por apenas duas baterias, tendo como única desvantagem um menor tempo de operação do sistema (não podendo a tensão total das duas baterias ser inferior a 7,5 V).

Para os geradores de alta tensão foram utilizadas fontes modulares da marca EMCO, modelo C60. Estas fontes são alimentadas com uma tensão de 15 V e uma corrente que pode ir até 200 mA. A potência consumida por cada uma destas fontes modulares pode ir até 3 W. O sinal de saída é proporcional ao sinal de referência à entrada. O sinal de referência à entrada pode variar entre 0 e 5 V. Esse sinal de referência à entrada é multiplicado por um factor de 1200 V/V. Assim, obtém-se um sinal à saída que pode ir até 6 kV. Como a potência máxima de saída é de 1 W, faz com que a corrente máxima de saída para os 6 kV seja de 0,166 mA.

Para o sinal de referência ser variável utilizou-se um regulador de tensão da marca NATIONAL SEMICONDUCTOR, modelo LP3964ADJ-ES, que é controlado por um potenciómetro de 50 k Ω (R_6). A instalação do regulador de tensão LP3964ADJ-ES está associada a um esquema electrónico recomendado pelo fabricante. Esse esquema electrónico é composto pelas resistências R_4 , R_5 e

R_6 (15 k Ω , 16 k Ω e resistência variável de 50 k Ω , respectivamente) e pelos condensadores C_2 e C_3 (1 μ F e 68 pF, respectivamente). A tensão de saída do regulador de tensão ajustável (V_{Out}) é dada pela seguinte relação:

$$(6) \quad V_{Out} = \left(\frac{R_6}{R_5} + 1 \right) \times 1,215 \text{ V}$$

A tensão de saída pode assim ser regulada entre 1,21 e 5 V e a corrente máxima de saída deste regulador de tensão é de 800 mA. Estas tensões irão proporcionar um sinal à saída da fonte de alta tensão com um valor mínimo de 1450 V e um valor máximo de 6000 V.

Como a alimentação da fonte de alta tensão é feita utilizando uma tensão de 15 V, utilizou-se um conversor de tensão DC/DC de 5 V para 15 V, com uma potência de saída de 6 W.

Para monitorizar a tensão de saída da fonte de alta tensão utilizou-se um divisor de tensão com um factor de 1/1000, tornando a leitura em volt uma correspondência com a tensão de saída em milhares de volt. Esse divisor de tensão foi feito com as resistências R_1 , R_2 e R_3 de pequena tolerância (1%) e com valor óhmico de 100 M Ω , 100 k Ω e 100 Ω , respectivamente. Este divisor de tensão para monitorizar a tensão de saída da fontes de alta tensão faz com que a potência dissipada neste processo seja reduzido (inferior a 0,25 W). Essa leitura é feita por um visualizador digital (*display*) da DATEL, modelo DMS 20PC-2-RL. O consumo deste visualizador digital é de 0,3 W (nota: a alimentação do visualizador digital é externa ao divisor de tensão e não está representada no esquema electrónico).

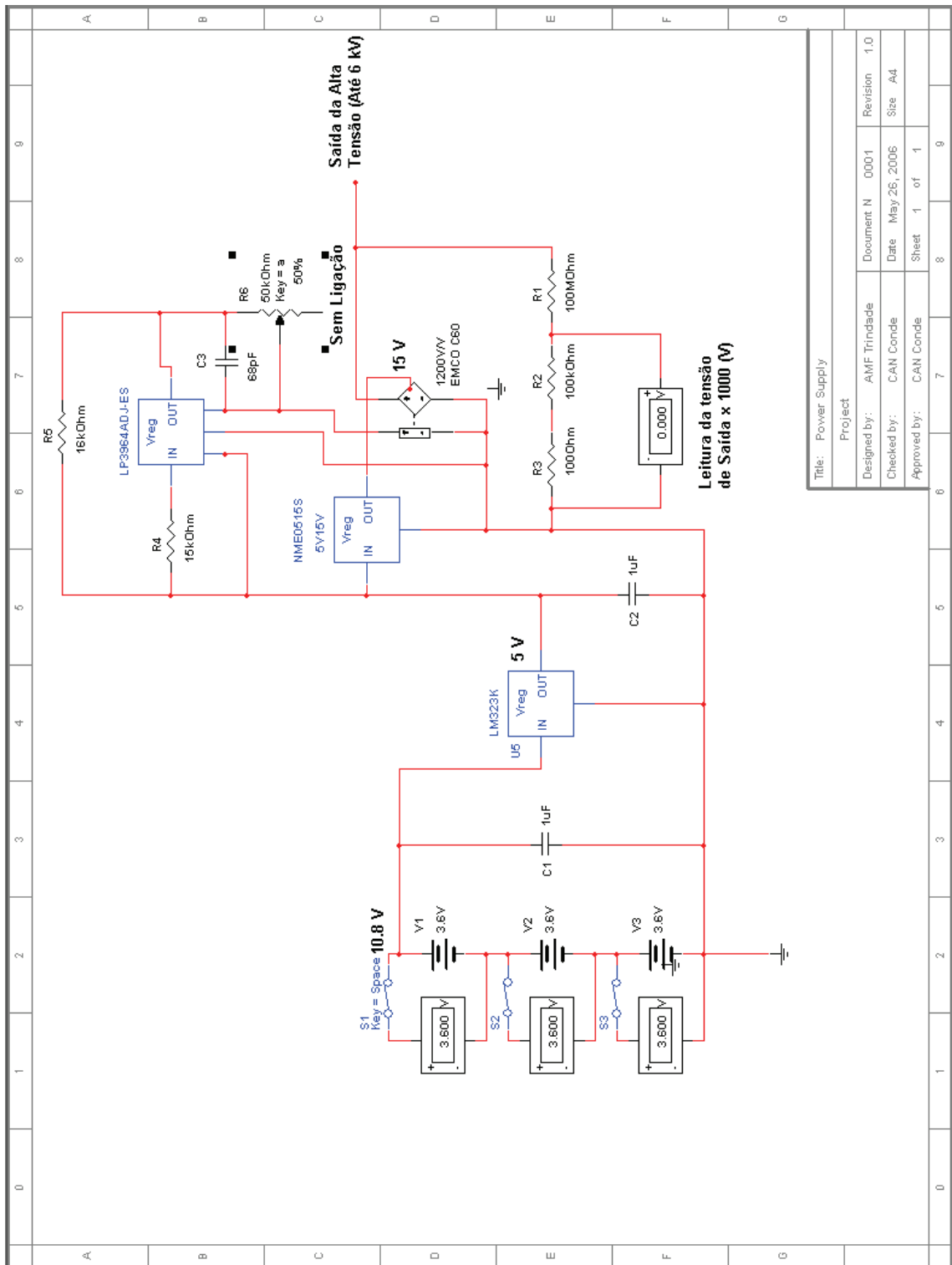
O isolamento nas ligações contendo alta tensão foi feito com silicone com uma tensão de isolamento de 17 kV/cm fornecido pela empresa RS com a referência 692 542.

Os condensadores C_1 e C_2 , com a capacidade de 1 μ F, têm a função de estabilizar a tensão à saída das baterias e à saída do regulador de tensão, respectivamente.

O consumo total máximo de cada módulo para a alta tensão está contabilizado em 3 W para a fonte modular de alta tensão e 0,3 W para o

visualizador digital. O consumo total dos três módulos para a alta tensão situa-se próximo dos 10 W, abaixo dos 15 W de potência máxima fornecida pelo regulador de tensão LM323K. Como a eficiência do regulador de tensão é de aproximadamente 50%, o consumo total das fontes de alta tensão rondará os 20 W.

O esquema seguinte (figura 15) é o esquema electrónico utilizado para a construção de um módulo de alta tensão para a fonte de iões positivos. A fonte de iões positivos utiliza três destes módulos de alta tensão. O esquema dos outros dois é precisamente igual.



Title: Power Supply	
Project	
Designed by: AMF Trindade	Document N 0001
Checked by: CAN Conde	Date May 26, 2006
Approved by: CAN Conde	Sheet 1 of 1
	Revision 1.0
	Size A4

Figura 15 – Esquema electrónico de uma das fontes de alta tensão. Este circuito alimenta as altas tensões da fonte (*source*), do extractor e da focagem da fonte de iões. Para a alimentação de um filtro de Wien a implementar futuramente, o circuito é semelhante, apenas a fonte de alta tensão utilizada será diferente (a tensão máxima poderá ser 1 kV, ao invés dos 6 kV das outras três fontes de alta tensão).

A fonte de corrente é alimentada directamente pelas baterias. Esta fonte de corrente poderia ser construída simplesmente recorrendo a um divisor de tensão, onde a corrente que iria para o filamento da fonte de iões seria regulada por um potenciómetro. As grandes desvantagens na utilização de um circuito deste tipo seriam o consumo elevado de energia e a variação da corrente que a tensão variável das baterias produziria. Assim, optou-se por construir um circuito que só debitará pouco mais que a corrente necessária para o filamento (figura 16). Este circuito foi construído utilizando um amplificador operacional de potência MC33171 e um transístor de potência do tipo par de Darlington MJ11016. Utilizando um divisor de tensão variável, recorrendo a um potenciómetro (R_1 e R_2 de 1 k Ω e 130 k Ω , respectivamente), consegue-se controlar a queda de tensão nos nodos 1 e 3 do potenciómetro. Essa queda de tensão irá ser igual à queda de tensão no ramo do circuito em que se encontra uma resistência R_4 de baixo valor óhmico (10 m Ω). Isso induz a passagem de uma corrente muito mais elevada do que a que passa no potenciómetro. Essa corrente será a corrente que irá passar no filamento da fonte de iões.

O facto de no decorrer do uso das baterias as tensões se tornarem inferiores, levava a que, no divisor de tensão, a queda de tensão se tornasse igualmente inferior. Essa diminuição da queda de tensão teria consequências directas na corrente que iria passar através do filamento da fonte de iões. A estabilidade das tensões no circuito divisor de tensão é assegurada por um díodo Zener de 6,23 V (D_1), modelo 1N4735A, que faz com que a queda de tensão no divisor de tensão seja sempre de 6,23 V, independentemente das tensões de operação das baterias. Assim, a queda de tensão (V) em R_1 é dada por:

$$(7) \quad V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{Zener}$$

logo, a queda de tensão máxima em R_1 é de

$$V_{Max} = \frac{1}{1+130} \times 6,23 = 0,048 \quad V$$

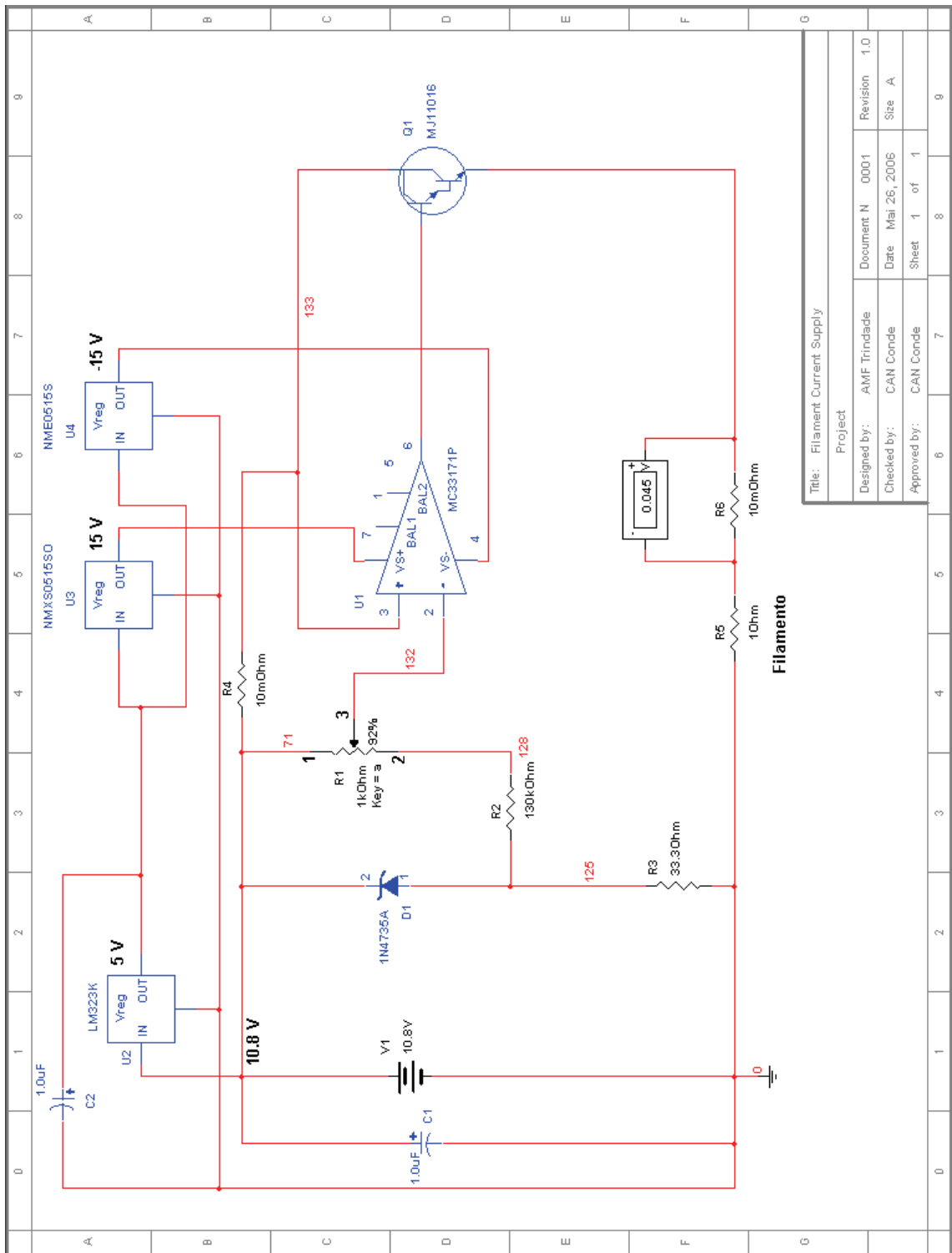
A queda de tensão máxima acontece quando a resistência entre os nodos 1 e 3 é máxima (1 k Ω). Esta queda de tensão é igual à queda de tensão na resistência R_4 . Como R_4 é de 10 m Ω a corrente máxima que passa nesta resistência é de 4,8 A. Esta corrente é a corrente que irá passar no filamento da fonte de iões. O filamento está representado pela resistência R_5 .

O amplificador operacional é alimentado por +15 V e -15 V. Essas tensões vêm de dois conversores DC/DC: o NMXSW0515SO e o NME0515S. A conversão é de 5 V para -15 V e 15 V, respectivamente.

O sinal de 5 V utilizado pelos conversores DC/DC vem do regulador de tensão LM323K que está ligado directamente à tensão de saída (V_1) das baterias. Já foram atrás descritas pormenorizadamente as características deste regulador de tensão.

A leitura da corrente que passa no filamento da fonte de iões é monitorizada por um visualizador digital da marca LASCAR, modelo DPM 700S. Este visualizador digital é concebido para fazer leituras de tensões numa gama entre 0 e 199 mV. Para funcionar como amperímetro e fazer leituras de 0 a 20 A o fabricante recomenda a utilização de um derivador de corrente, apropriado para este visualizador digital, com uma resistência de 10 m Ω (R_6). A potência consumida pelo visualizador é de 0,25 W.

Como já foi atrás referido, prevê-se uma potência consumida pelo filamento na ordem de 25 W.



Title: Filament Current Supply			
Project			
Designed by:	AMF Trindade	Document N	0001
Checked by:	CAN Conde	Date	Mai 26, 2006
Approved by:	CAN Conde	Sheet	1 of 1
		Revision	1.0
		Size	A

Figura 16 – Esquema electrónico da fonte de corrente que alimenta o filamento da fonte de iões.

O transistor e o regulador de tensão LM323K durante o seu funcionamento aquecem, podendo mesmo atingir temperaturas que os danifiquem. Para a sua protecção foram-lhes colocados dissipadores de calor e quatro ventoinhas, para garantir um arrefecimento adequado ao funcionamento dos mesmos. A potência dissipada por cada ventoinha é de 0,7 W.

Para monitorizar a tensão de cada bateria estão colocados visualizadores digitais. O funcionamento dos mesmos é controlado pelos interruptores (S_1 , S_2 e S_3 das figuras 15 e 17). A colocação destes interruptores serve para que os visualizadores digitais não estejam em funcionamento contínuo, pois o seu consumo é de 0,4 W cada.

O controlo automático de tensão das baterias será feito por um relé que actua quando a tensão total das três baterias se torna inferior a 9 V. Este relé encontra-se junto às baterias (figura 17). O consumo deste relé é de 2,5 W. De referir que este relé ainda não está aplicado no sistema eléctrico.

O consumo total do sistema prevê-se que seja em torno de 51,5 W (20 W para as fontes de alta tensão, 25 W para o filamento da fonte de iões, 2,8 W para o sistema de refrigeração, 1,2 W para os visualizadores digitais das baterias, 2,5 W para o relé). Estes são os consumos mais significativos do módulo de electrónica. A previsão inicial para um consumo de 50 W está assim dentro do esperado.

Tanto as altas tensões como a corrente do filamento que alimentam a fonte de iões, como já foi referido, são monitorizadas por visualizadores digitais (*display's*). O esquema seguinte (figura 17) é de todo o circuito electrónico (fontes de alta tensão e fonte de corrente). Não estão representadas neste esquema todas as ligações necessárias ao funcionamento dos visualizadores digitais utilizados para monitorizar as tensões e a corrente do filamento, nem as ligações para alimentação do sistema de refrigeração.

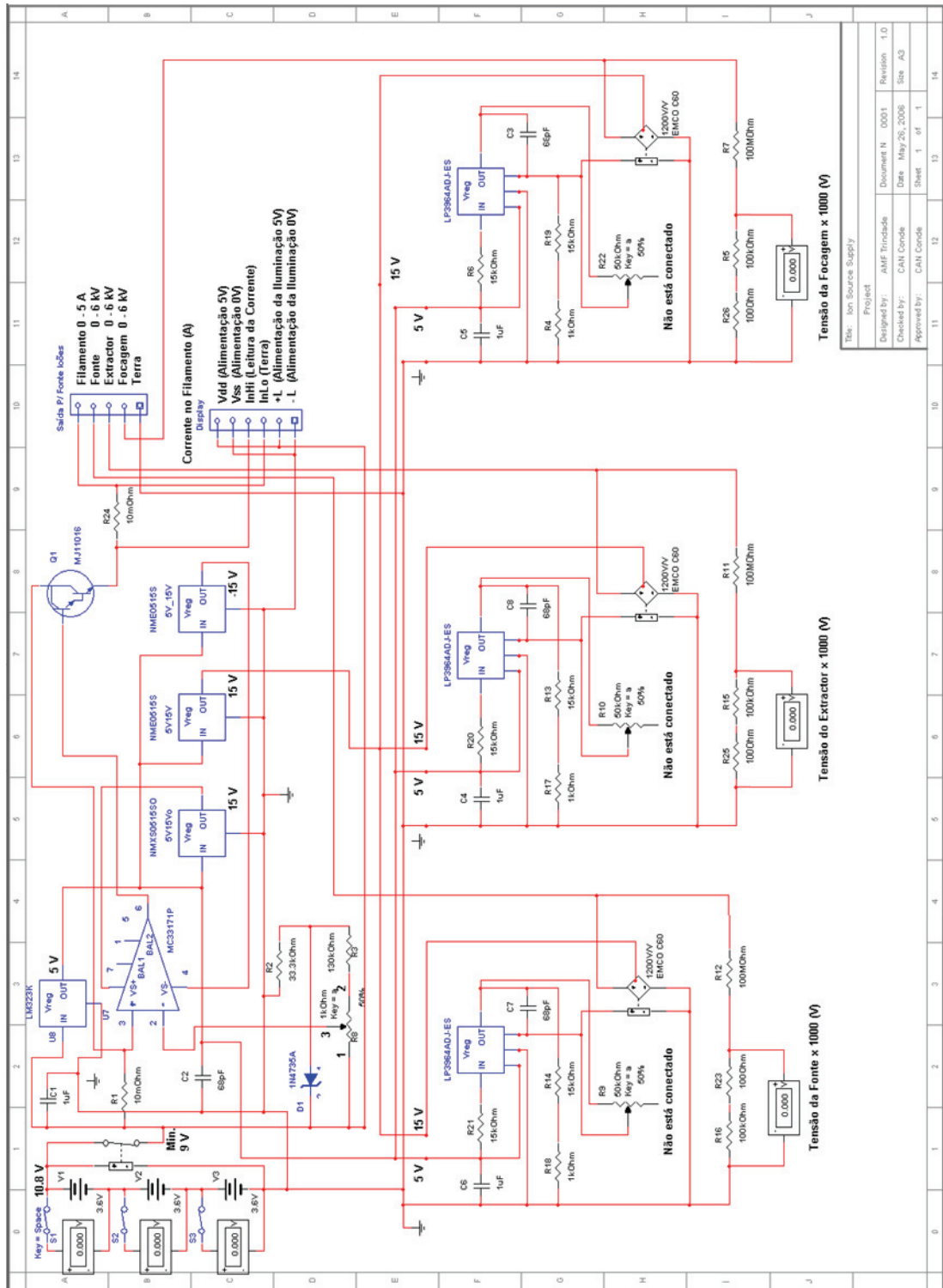


Figura 17 – Esquema geral do módulo de electrónica flutuante alimentado a baterias. Não estão representadas neste esquema todas as ligações aos visualizadores digitais, nem o sistema de refrigeração do circuito electrónico. Este esquema está em formato A3 no Anexo IV.

A construção foi feita por pequenos módulos: 4 módulos para as fontes de alta tensão, um módulo com os transístores, um módulo com os conversores DC/DC e um outro módulo central para a fonte de corrente, e para as ligações entre módulos (figura 18). Estas ligações entre módulos são feitas recorrendo a pequenas fichas, facilitando a desmontagem de cada pequeno módulo individualmente. Este tipo de construção facilita a reparação de eventuais avarias, ou substituição de componentes eléctricos.

A caixa externa é composta por uma base, um topo e duas placas laterais. A sua concepção foi feita a pensar no acesso simples ao interior do módulo. Para maior simplificação no acesso aos componentes electrónicos, todos os pequenos módulos electrónicos são suportados apenas pela base da caixa externa, tornando possível a remoção de todas as outras partes da caixa externa.

A saída das altas tensões e das correntes para a fonte de iões também é feita por um conjunto de fichas macho/fêmea. Foi colocado na caixa externa um interruptor para ligar/desligar a alimentação proveniente das baterias.

A caixa externa tem uma configuração física pouco comum, para se adaptar ao espaço físico disponível no topo do acelerador de iões. Os desenhos da caixa externa do módulo de electrónica encontram-se no Anexo 1.

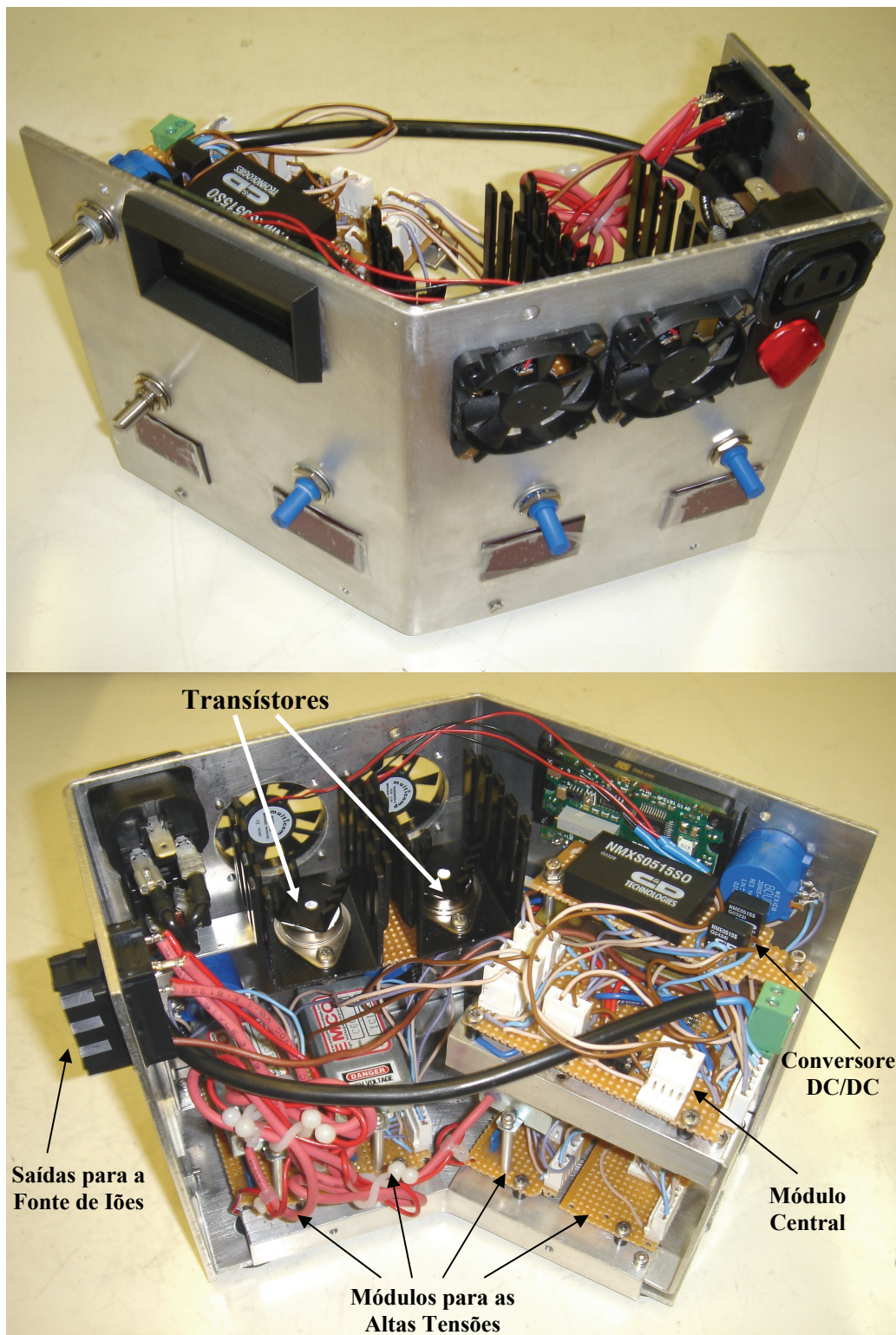
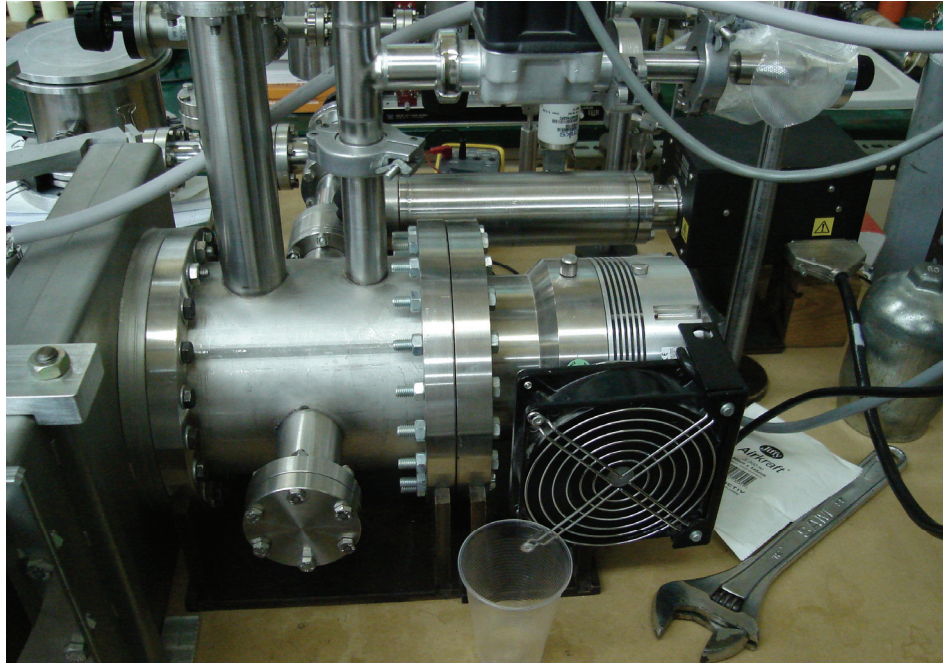


Figura 18 – Vista frontal (em cima) e vista traseira (em baixo) do módulo de electrónica flutuante. Nestas imagens não está colocada a tampa de cima do módulo (que inclui duas ventoinhas para refrigeração) nem o painel traseiro.



A.II.5 – O Sistema de Vácuo

Existe um factor limitativo à mobilidade dos iões que é o seu percurso livre médio, designado por λ . O percurso livre médio é, por definição, a distância média percorrida por uma partícula entre duas colisões sucessivas. Este factor depende essencialmente da quantidade de partículas por unidade de volume, da energia e da natureza das partículas. Se σ for a secção eficaz de colisão do ião com uma partícula do meio com n partículas por unidade de volume, então $\lambda = \frac{1}{n \times \sigma}$. A colisão dos iões com outras partículas traz consigo problemas aos

resultados, tais como, perda de energia do ião ou mesmo a perda do ião.

Um factor que depende da pressão no interior do acelerador de iões é a ‘pureza’ do feixe iónico. Se a fonte de iões, no seu interior, tiver um gás residual com uma pressão relativamente alta, aumenta a probabilidade de haver ionizações de outros elementos na fonte de iões que não são os que se pretende ionizar.

Para resolução dos problemas atrás enunciados, pretendeu-se que a pressão do gás residual no interior do acelerador de iões fosse muito baixa. Como

a pressão de operação da fonte de iões está limitada às pressões de 1×10^{-4} Torr, uma pressão para o gás residual menor duas ordens de grandeza (1×10^{-6} Torr) já será suficientemente boa para não influenciar de forma significativa nos resultados.

Para fazer vácuo no acelerador de iões (ver figura 4) usou-se uma bomba turbomolecular da marca VARIAN, modelo V300HT, com uma velocidade de bombeamento para o N_2 de $280 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, um factor de compressão superior a 2×10^8 e uma pressão última de $1,5 \times 10^{-10}$ Torr. Esta bomba é controlada por um controlador próprio da VARIAN, onde se pode ligar e desligar a bomba, seleccionar o tempo de aceleração para a bomba e a velocidade de cruzeiro de operação, monitorizar a temperatura da bomba, o consumo energético e o tempo de utilização, além de outras opções.

Para fazer um vácuo primário usou-se uma bomba rotativa, podendo, assim, a bomba turbomolecular operar apenas em pressões abaixo de 1 Torr. A bomba rotativa usada foi o modelo DS302 1Ph da marca VARIAN com velocidade de bombeamento de $3,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e uma pressão última de 1×10^{-3} Torr.

Para minimizar a migração de óleos da bomba rotativa para o sistema de alto vácuo colocou-se uma torneira DN16 KF entre a bomba rotativa e a bomba turbomolecular, que deve ser fechada ao desligar das bombas.

À entrada da bomba turbomolecular está colocada uma rede de protecção à bomba, para evitar que partículas com dimensões superiores a 0,7 mm de diâmetro atinjam as pás da bomba. Apesar de retirar 10% de eficiência à bomba, foi considerado mais prudente colocá-la.

Este conjunto de duas bombas está directamente ligado a uma primeira câmara de vácuo feita em aço inoxidável, à qual estão ligados um vacuómetro do tipo *Penning* e outro do tipo *Pirani* como medidores de pressão para alto vácuo e para vácuo primário respectivamente. A unidade de leitura de pressão é o modelo CC2 senTorr da VARIAN.

O acelerador de iões positivos foi construído independente da primeira câmara de vácuo. Para fazer o isolamento das duas câmaras utilizou-se uma

válvula de seis polegadas de diâmetro, da VARIAN, em aço inox. É uma válvula que suporta um diferencial de pressão de 15 psi, aproximadamente 775 Torr.

Para analisar o gás residual no interior do sistema está um espectrômetro de massa. Este espectrômetro de massa é constituído por três partes distintas: uma unidade de controlo, uma cabeça de radiofrequências e uma ponta de prova quadrupolar. O analisador é da marca HIDEN, modelo HAL IV RC, usando uma cabeça RF HAL200. Para os testes efectuados utilizou-se um potencial de aceleração no espectrômetro de massa de 70 V.

O espectro de massa do gás residual no interior do sistema, após trinta minutos de funcionamento do sistema de alto vácuo é apresentado na figura seguinte. É um gráfico da pressão (Torr) em função de m/e , em que m vem em u.m.a. (unidades de massa atômica) e e a carga do ião em unidades de carga do electrão (em módulo).

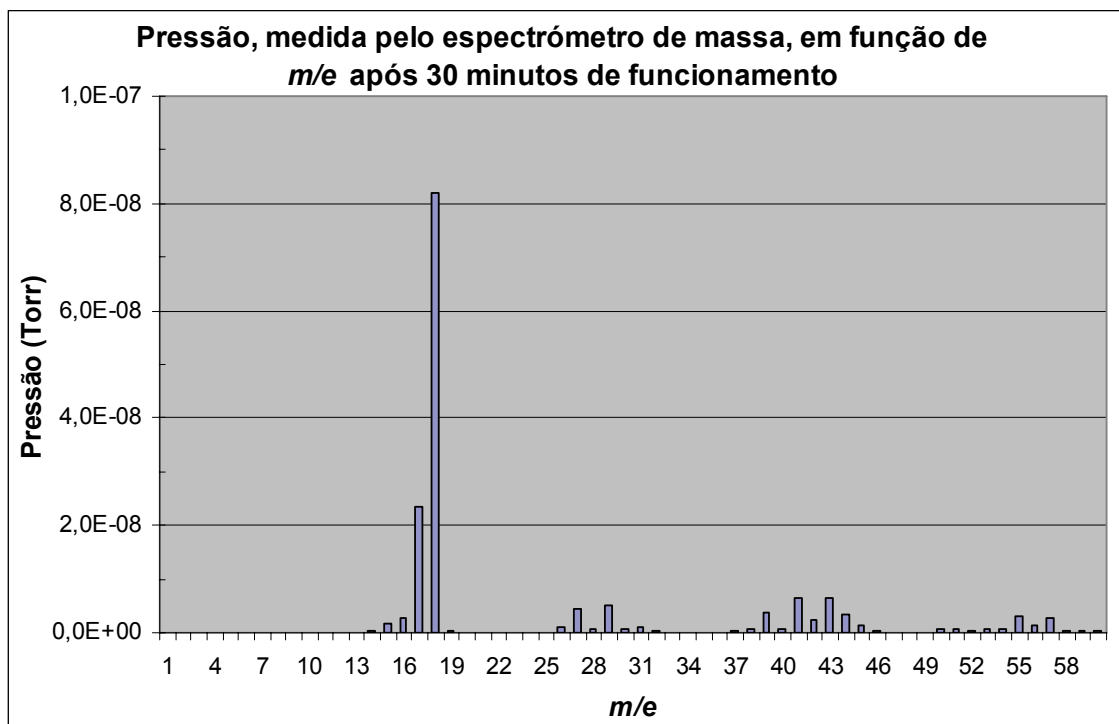


Figura 19 – Espectro de massa do gás residual, no interior do sistema de alto vácuo e do acelerador de iões, após trinta minutos de funcionamento do sistema de alto vácuo.

Como o sistema de vácuo pode estar a funcionar dias consecutivos sem depender de qualquer manutenção, é possível deixar o sistema a funcionar de uma forma ininterrupta, com vista a diminuir a quantidade do gás residual no

interior do sistema. A figura seguinte mostra o espectro de massa no interior do sistema após estar ligado o sistema de vácuo durante vinte e quatro horas.

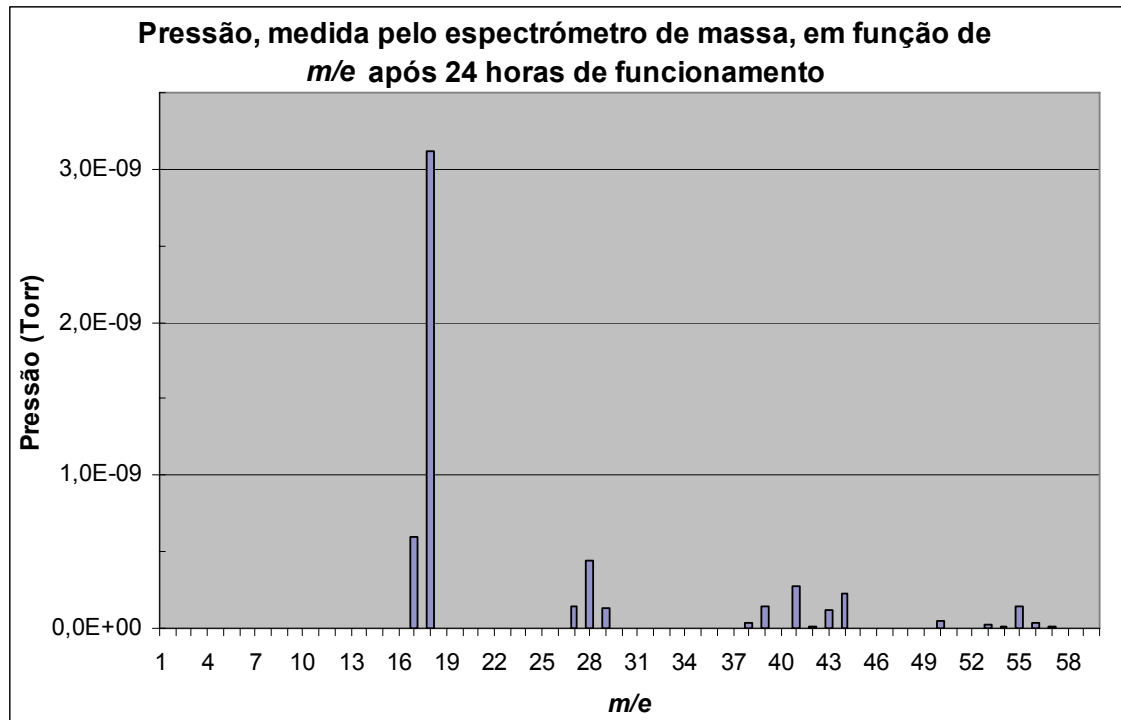


Figura 20 – Espectro de massa do gás residual, no interior do sistema de alto vácuo e do acelerador de iões após, vinte e quatro horas de funcionamento do sistema de alto vácuo.

O espectro de massa retirado após o sistema de alto vácuo estar a funcionar a apenas trinta minutos (figura 19), mostra uma pressão parcial dos vários componentes do gás residual inferior a 1×10^{-7} Torr, sendo a pressão total inferior a 2×10^{-7} Torr. Esta pressão é suficiente para o funcionamento do acelerador de iões, pois a percentagem do gás residual no interior do acelerador de iões positivos é, pelo menos, duas ordens de grandeza inferior à pressão de funcionamento do acelerador, o que equivale a dizer que a percentagem de impurezas no interior do acelerador de iões, após trinta minutos de funcionamento do sistema de alto vácuo, já é inferior a 1%.

Analisando o espectro de massa após vinte e quatro horas de funcionamento do sistema de alto vácuo (figura 20), verifica-se que a pressão total no interior do acelerador de iões é da ordem de 6×10^{-9} Torr. Se a pressão de

operação do acelerador de iões for de 6×10^{-5} Torr, a percentagem de impurezas é inferior a 0,01%.

De salientar que a componente de maior peso relativo no gás residual no interior do sistema é a água (*m/e* 18 e 17). Os picos 41, 43, 55 e 57 são típicos dos óleos provenientes da bomba rotativa (figuras 19 e 20).

No espectro retirado após vinte e quatro horas (figura 20), além dos picos da água e dos picos dos óleos da bomba, destaca-se um pico com 28 unidades de massa atómica que corresponde ao monóxido de carbono. A presença desse pico, em conjugação com a não presença do pico 32 (correspondente ao oxigénio), comprova a não presença de fugas detectáveis no sistema.

Tendo um sistema de vácuo a funcionar em perfeitas condições, torna-se possível colocar o acelerador de iões positivos a funcionar numa atmosfera com baixo índice de gases residuais.

De referir que este sistema de alto vácuo já se encontrava instalado, não estando a sua construção inserida nesta dissertação. No decorrer desta dissertação apenas foram feitos testes de fugas e análises ao gás residual no interior do sistema.

A.III - Previsão dos Resultados

No decorrer desta dissertação irão ser efectuados alguns testes ao funcionamento do acelerador de iões. Fazendo algumas estimativas, torna-se possível a previsão, em primeira aproximação, de alguns resultados dos testes

que irão ser efectuados. Os dados iniciais conhecidos para a realização dos testes são os seguintes:

- O gás que irá ser utilizado será o deutério.
- A pressão máxima de deutério no interior da fonte de iões durante o seu funcionamento não irá ultrapassar 1×10^{-4} Torr.
- A corrente electrónica, proveniente do filamento da fonte de iões, não poderá induzir uma potência na fonte tensão (*source*) superior a 1 W.
- As tensões mínimas da fonte, extractor e focagem não poderão ser inferiores a 1,45 kV.
- A “gaiola” da fonte (*source*), onde se dá a ionização do gás, tem aproximadamente de 1 cm de diâmetro (figura 9).

Os testes que serão feitos têm por objectivo o estudo da corrente no alvo em função da pressão na fonte de iões e em função da corrente no filamento da fonte de iões, bem como, o estudo de optimização para as tensões da fonte, extractor e focagem da fonte de iões.

Utilizando a expressão (4) referenciada no capítulo A.II.1

$$N_i = N_{e^-} \times N_p \times x \times \sigma \quad \text{iões/s}$$

verifica-se que o número de iões por unidade de tempo (N_i) é proporcional à pressão (N_p - número de partículas por unidade de volume) e à corrente de emissão do filamento (N_{e^-} - Número de electrões emitidos pelo filamento por unidade de tempo). Essa dependência faz com que, tanto o aumento da pressão como o aumento da corrente de aquecimento do filamento da fonte de iões, resultam num aumento da corrente iónica.

A figura seguinte mostra a relação entre o número iões gerados por centímetro percorrido pelos electrões e por Torr, em função da energia dos mesmos electrões. A mesma figura mostra essa relação para diversos gases.

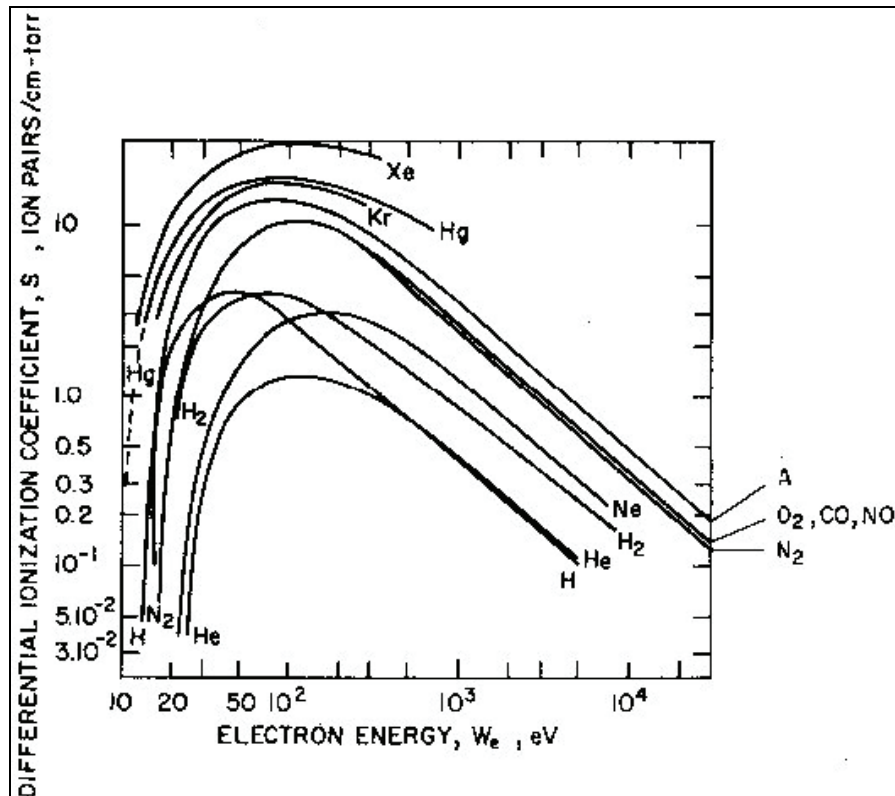


Figura 21 – Curvas características do o número de iões gerados por cada electrão por centímetro percorrido e por Torr, em função da energia do mesmo. Essas curvas características são para gases variados [Stanley, 2002, pag. 302]. A secção eficaz pode ser calculada a partir deste coeficiente, sendo $\sigma = C \times P / N_p$, onde σ é a secção eficaz, C é o coeficiente de ionização, P é a pressão e N_p é o número de partículas por cm³ (figura retirada do livro “Ion Beams with Applications to Ion Implation”).

Esta curva indica que, para os gases referenciados, existe um máximo na eficiência de ionização quando a energia dos electrões se situa em torno dos 100 eV. As energias que irão ser utilizadas serão na ordem de 2 keV. Para estas energias a eficiência é muito menor, mas a electrónica não permite a colocação de tensões inferiores.

Conclui-se que a corrente iónica tem uma dependência directa com a energia dos electrões, a qual depende da diferença de potencial entre o filamento e a gaiola. Assim, como a tensão da gaiola é sempre superior a 1,45 kV, a energia dos electrões será sempre superior a 1,45 keV. Da figura 21 conclui-se que haverá uma diminuição da corrente iónica à medida que esta tensão aumenta.

Usando o exemplo (tabela 1) fornecido pelo fabricante da fonte de iões (o gás utilizado é o árgon, a corrente electrónica de 10 mA, a energia dos electrões de 5 keV e 8×10⁻⁵ Torr de pressão), usando as expressões (2), (3) e (4)

referenciadas no capítulo A.II.1 e calculando a secção eficaz de ionização determina-se a corrente iónica.

O cálculo da secção eficaz de ionização é feito utilizando a expressão:

$$(8) \quad \sigma = \frac{C \times P}{N_p} \text{ cm}^2$$

C é o coeficiente de ionização ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$)

P é a pressão (Torr)

N_p é o número de partículas por cm^3

Nestas condições (5 keV e 8×10^{-5} Torr) o coeficiente de ionização, retirado da figura 21, é de aproximadamente $0,8 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$. Fazendo os cálculos, o valor da secção eficaz de ionização é de

$$\sigma = \frac{0,8 \times 8 \times 10^{-5}}{2,8 \times 10^{12}} = 2,3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2.$$

(este resultado está próximo do que é publicado por [Jha, 2006] $\approx 2,1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$)

Sabendo que

$$N_{e^-} = \frac{10 \times 10^{-3}}{1,6 \times 10^{-19}} = 6,3 \times 10^{16} \text{ electrões/s}$$

$$N_p = 8 \times 10^{-5} \times \frac{6,0 \times 10^{23}}{22,4 \times 10^3 \times 760} = 2,8 \times 10^{12} \text{ partículas/cm}^3$$

temos

$$N_i = 6,3 \times 10^{16} \times 2,8 \times 10^{12} \times 2,3 \times 10^{-17} = 4,1 \times 10^{12} \text{ iões/s}$$

o que corresponde a uma corrente iónica de

$$N_i = 4,1 \times 10^{12} \times 1,6 \times 10^{-19} = 656 \text{ nA}$$

Este valor é da mesma ordem de grandeza do valor que é referenciado pelo fabricante da fonte de iões (600 nA), compreendendo-se que a previsão seja ligeiramente superior ao resultado experimental, pois considerou-se que todos os iões chegariam ao alvo.

Deste modo é crível avançar para uma previsão da corrente iónica nas condições de utilização com deutério para alguns testes: pressão de 1×10^{-5} Torr; tensão na fonte de 2,00 kV; corrente electrónica de 500 μ A (corresponde a uma potência de 1 W na fonte de alta tensão que alimenta a fonte).

Nestas condições, a secção eficaz dos electrões para o gás de deutério é de $1,4 \times 10^{-17}$ cm² [Kim]. Usando novamente as expressões (2), (3) e (4) e fazendo cálculos semelhantes aos anteriores, prevê-se uma corrente iónica de 2,4 nA, aproximadamente.

A focagem é outro factor muito importante. Prevê-se uma variação da corrente iónica em função da tensão de focagem, sendo uma variação com um máximo para determinadas tensões e com valores inferiores, tanto nas tensões inferiores como superiores, pois se existe uma tensão de focagem, as outras, tanto inferiores como superiores, irão desfocar o feixe.

A.IV – Resultados

Dado o facto deste projecto consistir na construção de um acelerador de iões positivos, os primeiros resultados que se esperavam obter era a confirmação do funcionamento do mesmo. A confirmação do funcionamento da fonte de iões prendia-se com a observação de uma corrente positiva, recolhida num alvo colocado na base da câmara de bombardeamento iónico, que dependesse da pressão e da corrente de aquecimento do filamento da fonte de iões.

Como o gás que se utilizou foi o deutério, os iões emergentes da ionização no interior da fonte de iões serão o D^+ , DD^+ e DDD^+ . Antes de se iniciarem os

primeiros testes no acelerador de iões positivos havia a necessidade de analisar, com o espectrómetro de massa, o gás que iria ser utilizado nos testes. O espectro de massa que se encontra na figura seguinte foi obtido após a introdução de deutério no sistema, com o propósito de se verificar a presença destas três estruturas atómicas (D^+ , DD^+ e DDD^+), bem como avaliar o grau de pureza do gás.

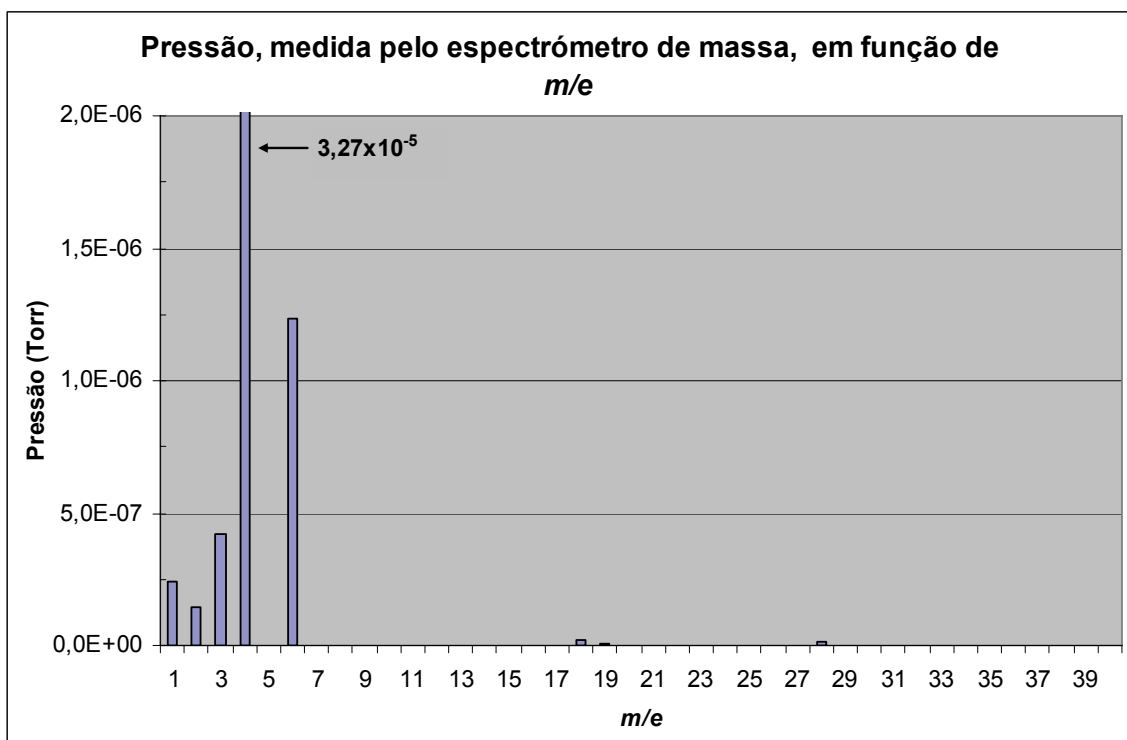


Figura 22 – Pressão relativa dos vários constituintes presentes no gás de deutério. Verifica-se a presença de H^+ (1 u.m.a.), HH^+ e D^+ (2 u.m.a.), HD^+ (3 u.m.a.), DD^+ (4 u.m.a.) e DDD^+ (6 u.m.a.).

Neste espectro de massa verifica-se que os picos principais correspondem aos elementos constituintes do deutério. O gás residual tem uma pressão relativa inferior a 1×10^{-8} Torr (picos 18 e 28, água e azoto, respectivamente). Assim, a pureza do gás de deutério no interior da garrafa é quantificada pela percentagem de hidrogénio presente no seu interior. O hidrogénio (prótio) encontra-se presente nos iões H^+ , HH^+ e HD^+ , correspondentes aos picos 1, 2 e 3, respectivamente. Como a estrutura molecular dominante no hidrogénio é o H_2 , a baixa pressão parcial no pico 2 indica-nos a pouca quantidade de hidrogénio presente no gás de deutério. Comparativamente com o pico 4, onde predomina o DD^+ , a pressão

relativa do pico 2 é cerca de 100 vezes menor. Assim, estima-se que a presença de hidrogénio (prótio) no interior do gás de deutério seja inferior a 1%.

Após a verificação da pureza do gás de deutério, foram feitos estudos com vista à observação do funcionamento do acelerador de iões positivos.

Na tentativa de observar o funcionamento do acelerador de iões foram efectuados vários passos. A introdução de deutério no acelerador de iões era feita recorrendo a uma válvula de agulha que regulava o fluxo de gás à entrada da fonte de iões, mantendo constante um fluxo contínuo que tornava a pressão no interior da fonte de iões num valor da ordem de 10^{-5} Torr. Por indicação do fabricante da fonte de iões, foi colocada a tensão do extractor 300 V inferior à tensão da fonte (*source*) e a tensão da focagem a 60% da tensão da fonte. Dada a limitação das tensões nas fontes de alta tensão, nenhuma das tensões pode ser inferior a 1,45 kV. Assim, colocou-se a tensão da focagem (V_F) a 1,45 kV, a tensão do extractor (V_E) a 1,70 kV e a tensão da fonte (V_S) a 2,00 kV. A corrente de aquecimento do filamento (I_F) foi sendo elevada lentamente. Na base da câmara de bombardeamento iónico estava colocado um alvo em aço inox com 2 cm de diâmetro, que se encontrava ligado a um electrómetro, da marca KEITHLEY INSTRUMENTS, modelo 610C com capacidade de medir correntes na ordem de 10^{-13} A. Verificou-se a presença de iões positivos quando a corrente de aquecimento no filamento atingiu um valor na ordem de 1,45 A. Elevou-se a corrente do filamento até 1,75 A, corrente essa que induziu uma corrente iónica no alvo (I_{Alvo}) na ordem de 10^{-9} A.

Após a verificação da presença de uma corrente iónica no alvo, havia que comprovar a proveniência dessa corrente iónica. Com base nas previsões atrás apresentadas, fizeram-se pequenos testes variando a corrente de aquecimento do filamento e a pressão no interior do acelerador de iões. Verificou-se, tal como foi previsto teoricamente, uma variação no valor da corrente iónica em função da pressão e da corrente do filamento. Aumentos na pressão ou na corrente do filamento provocavam aumentos na corrente iónica no alvo.

Estes primeiros resultados foram a confirmação da presença no alvo de iões gerados pela fonte de iões. A partir desse momento foram feitas várias

medidas aos valores da corrente I_{Alvo} , variando a pressão do gás, as tensões nas fontes de tensão da *source*, do extractor e da focagem, bem como a corrente de aquecimento do filamento. Todas as medidas foram feitas em função da corrente gerada pelos iões ao serem recolhidos no alvo (I_{Alvo}).

Havia uma limitação técnica devido à baixa potência da fonte de alta tensão (apenas 1 W). À medida que se aquecia o filamento da fonte de iões iam sendo libertados electrões que iriam ionizar o gás de deutério, sendo posteriormente recolhidos pela “gaiola” da fonte. Essa corrente electrónica estava limitada pela potência da fonte de alta tensão que alimentava a “gaiola”. Essa limitação fazia com que a corrente de aquecimento no filamento não pudesse ser superior a 1,75 A, pois essa corrente no filamento induzia uma corrente de emissão de electrões que era superior aos limites máximos da corrente permitida pelo módulo de alta tensão da fonte (*source*). Nessa situação, podia-se danificar a fonte de alta tensão e o módulo de electrónica.

Todos os testes efectuados tiveram de ter em conta essa limitação, além da já referida limitação à pressão de operação. Como a corrente do filamento era relativamente baixa (pois em condições normais de operação pode ir até 4,5 A), não se corria o risco do filamento da fonte se danificar nas pressões superiores a 10^{-4} Torr, no entanto, por prudência, nunca se ultrapassou esse valor de pressão.

Os estudos seguintes têm por objectivo compreender melhor os processos físicos associados a este acelerador de iões, tais como, conhecer limitações e problemas do acelerador, e, ao mesmo tempo, otimizar os valores da corrente I_{Alvo} .

Com as tensões da fonte de iões nos valores já referidos ($V_S=2,00$ kV, $V_E=1,70$ kV e $V_F=1,45$ kV) foi feito o estudo da corrente I_{Alvo} em função da pressão de deutério, para as correntes I_F de 1,50, 1,60, 1,65, 1,70 e 1,75 A. Os resultados obtidos experimentalmente estão apresentados nas figuras seguintes (figuras 23 e 24).

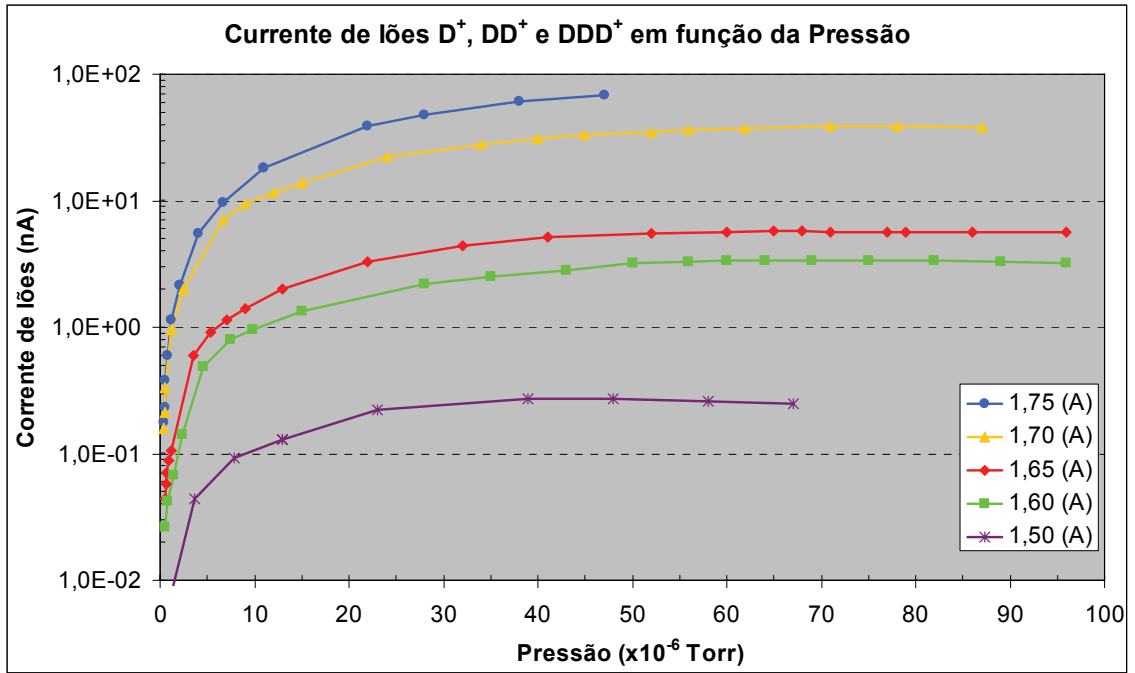


Figura 23 – Corrente I_{Alvo} em função da pressão de deutério no interior do acelerador de íons. Resultados obtidos para as medidas realizadas com correntes I_F de 1,50 A, 1,60 A, 1,65 A, 1,70 A e 1,75 A.

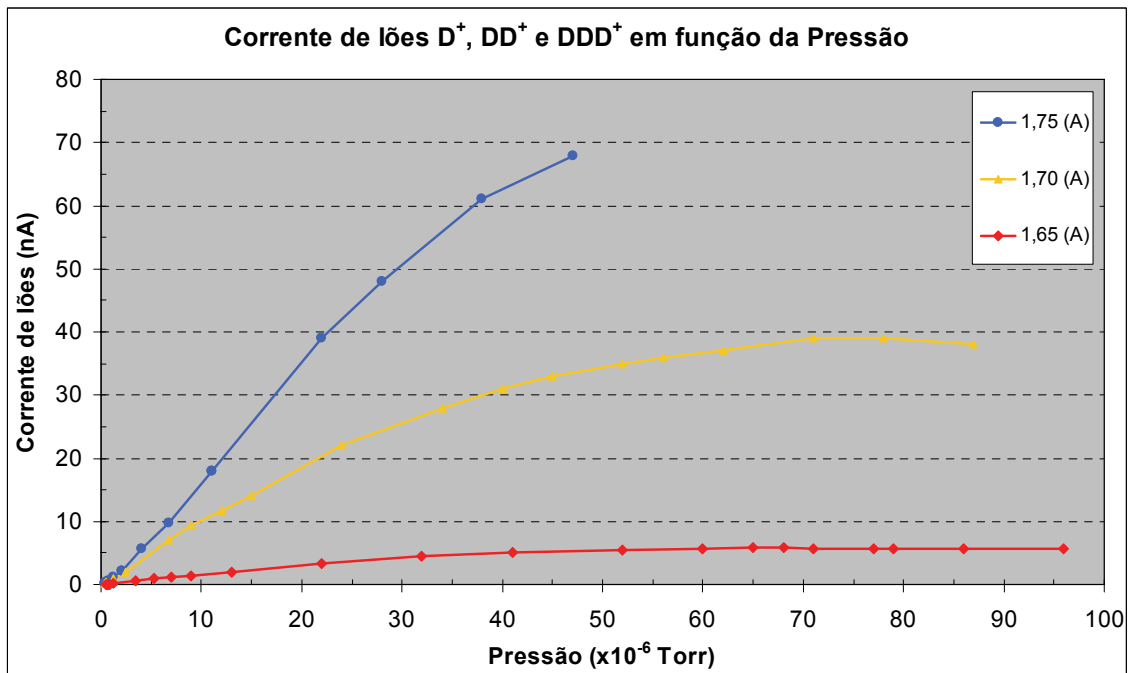


Figura 24 – Figura 23 em escala linear. Resultados apenas para as medidas realizadas com correntes I_F de 1,65 A, 1,70 A e 1,75 A. Com este gráfico torna-se mais fácil a observação do ponto em que a corrente é máxima.

Neste estudo verifica-se que o aumento da pressão leva a um aumento da corrente I_{Alvo} . No entanto, quando a pressão é superior a valores na ordem de 7×10^{-5} Torr existe uma diminuição na corrente I_{Alvo} . As pressões para as quais as correntes I_{Alvo} tomam valores máximos situam-se entre 6×10^{-5} e 7×10^{-5} Torr. De referir que, para o estudo em que I_F era de 1,75 A, não se conseguiram efectuar medidas para pressões superiores 5×10^{-5} Torr por causa da limitação da potência da fonte de alta tensão (V_S). Crê-se que a curva de I_{Alvo} iria ter semelhanças às curvas obtidas com correntes I_F inferiores.

Os resultados obtidos com a corrente I_F de 1,50 A e de 1,60 A não estão representados na figura 24 devido à corrente I_{Alvo} ser muito baixa (inferior a 3 nA em ambos os casos).

A análise destes e dos próximos resultados será feita na secção A.V.

O estudo seguinte tem como objectivo a optimização dos valores das tensões V_S , V_E , e V_F . Durante este estudo mantiveram-se constantes a pressão do gás no interior do acelerador ($9,5 \times 10^{-6}$ Torr) e a corrente do filamento (1,65 A).

Partindo de um valor fixo para V_S procurava-se saber a tensão para a qual a corrente I_{Alvo} era máxima, variando V_E e V_F . O fabricante da fonte de iões sugeria $V_E = V_S - 300(\text{V})$ e $V_F = 0,6 \times V_S$. Como estes valores eram meras sugestões, e como estas relações podem depender do gás e da pressão usados, o estudo seguinte serviu para optimizar essas relações para o deutério à pressão referida.

Os resultados obtidos estão apresentados na figura seguinte.

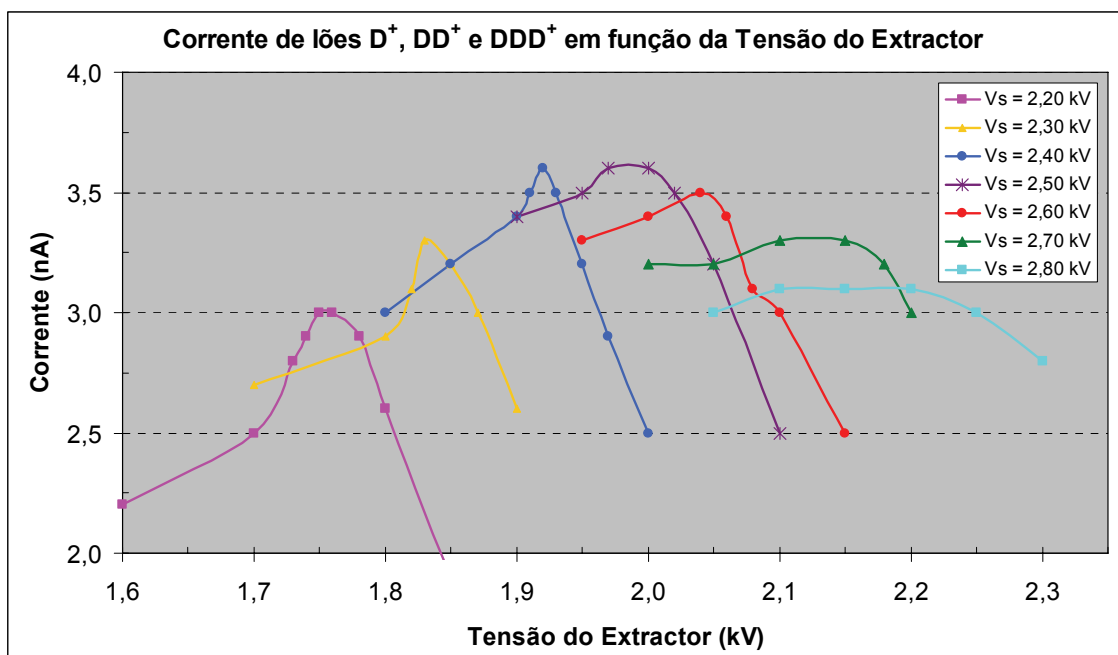


Figura 25 – Gráfico com os valores da corrente I_{Alvo} em função da tensão do extractor (V_E), para uma pressão de $9,5 \times 10^{-6}$ Torr. Medidas realizadas com as tensões na source (V_S) de 2,20, 2,30, 2,40, 2,50, 2,60, 2,70 e 2,80 kV, mantendo constante a tensão de focagem (V_F) em 1,45 kV.

A observação deste gráfico indica que o máximo na corrente, tem uma dependência com a diferença entre V_S e V_E . À medida que se aumenta a tensão V_S aumenta a diferença entre V_S e V_E para o qual se atinge um máximo na corrente I_{Alvo} . Para a tensão V_S de 2,20 kV a diferença óptima é de 450 V ($V_E=1,75$ kV), enquanto que para V_S de 2,80 kV a diferença óptima é de 650 V ($V_E=2,15$ kV). Verifica-se que para todas as medidas efectuadas a tensão V_E ideal ronda os 80% da tensão V_S , ou seja, $V_E=0,8 \times V_S$.

Os resultados para os quais o pico da corrente I_{Alvo} teve valores mais elevados verificaram-se quando as tensões V_S se situaram em torno de 2,50 kV. Quando as tensões V_S foram inferiores ou superiores a 2,50 kV, o pico da corrente medida no alvo tinha valores inferiores aos medidos para V_S de 2,50 kV.

Verificou-se também que para tensões mais baixas o pico de corrente está muito mais definido do que nas altas tensões, onde a curva é muito mais “suave”.

Os resultados obtidos não tiveram em conta a tensão V_F . Esta foi sempre constante no decorrer destes testes. O seu valor era o mínimo permitido pela fonte de alta tensão: 1,45 kV. Deste modo, existia a necessidade de se fazerem

testes com vista a serem observadas as variações da corrente no alvo em função de V_F . Nas condições em que as tensões V_S e V_E induziam uma maior intensidade de corrente I_{Alvo} , alterou-se a tensão V_F para verificar se existia um aumento na corrente I_{Alvo} , ou se, pelo contrário, existia uma diminuição na intensidade da corrente.

Para as tensões V_S inferiores a 2,40 kV a corrente I_{Alvo} diminuía com o aumento de V_F . Para V_S igual a 2,50 e 2,60 kV a corrente I_{Alvo} aumentava muito ligeiramente (aumento inferior a 0,1 nA). Para V_S igual a 2,70 e 2,80 kV existia um aumento na intensidade de corrente superior a 0,1 nA. Para estas duas últimas situações (V_S igual a 2,70 kV e 2,80 kV) e colocando a tensão do extractor no valor em que a intensidade da corrente no alvo tinha o valor mais elevado (2,1 e 2,15 kV, respectivamente), aumentou-se a tensão V_F na procura do valor para o qual a corrente I_{Alvo} se tornava a mais elevada. A figura 26 mostra os resultados obtidos.

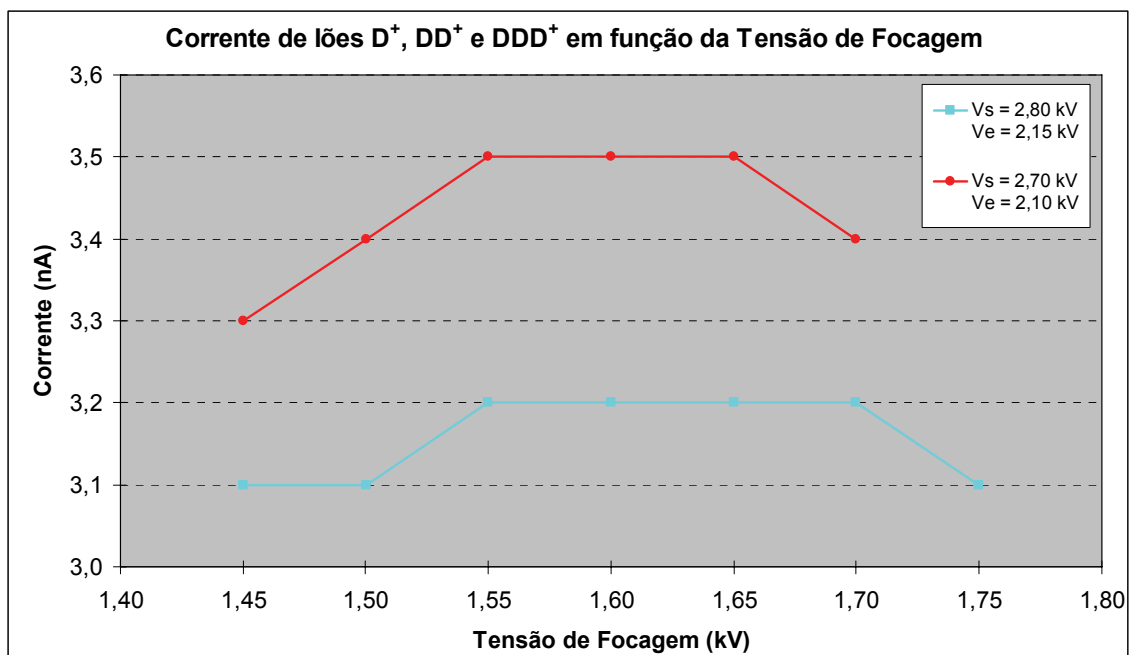


Figura 26 – Gráfico da corrente I_{Alvo} em função de V_F , usando uma pressão de deutério de $9,5 \times 10^{-6}$ Torr.

Este gráfico revela que o máximo na corrente I_{Alvo} também depende da tensão de focagem. Esta dependência não pode ser verificada para as tensões

mais baixas, visto as tensões mínimas fornecidas pelas fontes de alta tensão serem de 1,45 kV.

Apesar de no estudo anterior (figura 25) as correntes I_{Alvo} não estarem optimizadas por causa da tensão de focagem, ao optimizá-las continuam-se a verificar os resultados anteriores, ou seja, as correntes I_{Alvo} mais elevadas são quando as tensões V_S , V_E e V_F são, respectivamente, 2,50 kV, 2,00 kV e 1,45 kV.

Também foi efectuado o estudo para $V_S=2,00$ kV, mas a intensidade de corrente era muito baixa ($I_{Alvo} < 1$ nA) e por isso os resultados não estão apresentados na figura 25.

Partindo dos valores de optimização encontrados nos estudos anteriores, foi efectuado um estudo da corrente I_{Alvo} em função de I_F (figura 27). Neste estudo pretendia-se verificar a dependência de I_{Alvo} com I_F . O estudo foi feito utilizando as tensões V_S , V_E e V_F de 2,50 kV, 2,00 kV e 1,45 kV, respectivamente. Foram realizadas medidas para pressões de deutério no interior da fonte de iões de $7,5 \times 10^{-6}$, $2,0 \times 10^{-5}$ e $4,0 \times 10^{-5}$ Torr. Os resultados obtidos estão apresentados na figura seguinte.

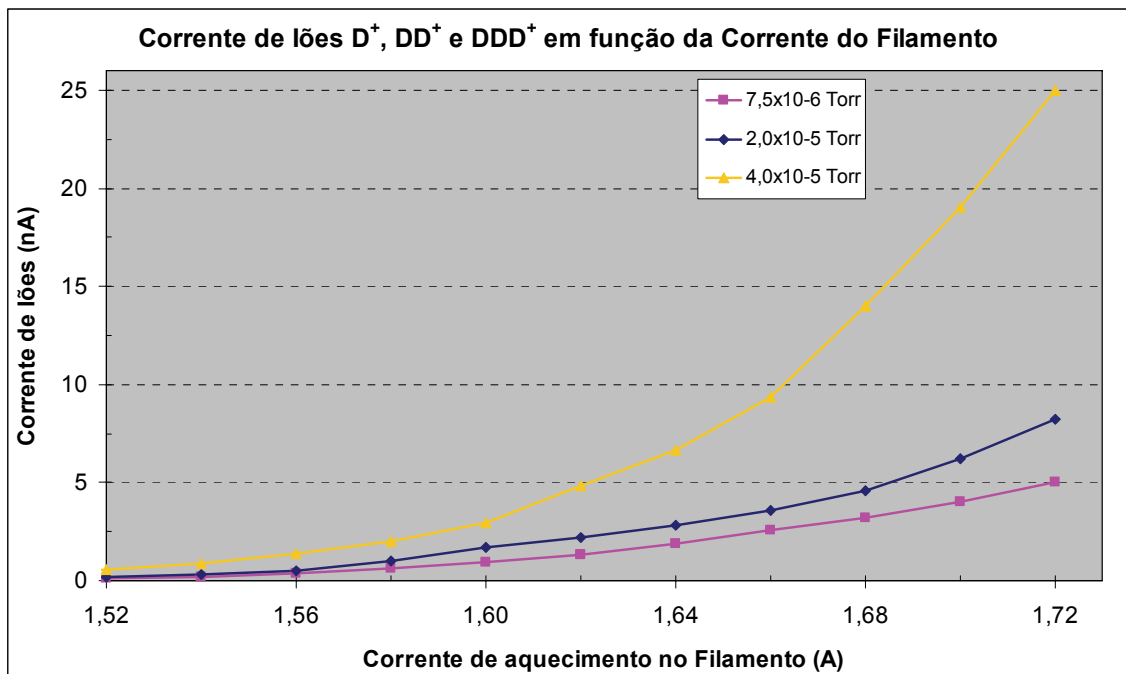


Figura 27 – Corrente de iões no alvo em função da corrente no filamento, com as tensões $V_S=2,50$ kV, $V_E=2,00$ kV e $V_F=1,45$ V.

Como se pode verificar, existe uma semelhança, nas três curvas, no crescimento da intensidade da corrente I_{Alvo} em função da corrente I_F . O facto de haver a limitação da potência da fonte de alta tensão que impossibilita o estudo com correntes I_F superiores, impede a observação da evolução da curva das correntes I_{Alvo} em função de I_F .

A.V – Análise dos Resultados

Os resultados obtidos irão ser agora analisados individualmente.

Os primeiros resultados obtidos foram realmente a comprovação do funcionamento da fonte de iões através da detecção de uma corrente I_{Alvo} que variava, com a corrente I_F e com a pressão, da mesma forma que tinha sido previsto teoricamente. As correntes medidas no alvo ficaram na mesma ordem de grandeza (nA) dos cálculos teóricos realizados previamente.

Depois, pretendia-se constatar analiticamente que a corrente I_{Alvo} dependia da pressão do gás no interior da fonte de iões. O que se observou (figura 23 e 24) foi um crescimento da corrente I_{Alvo} com o aumento da pressão. Esse crescimento era previsível, pois o coeficiente de ionização (figura 21) é proporcional à pressão. No entanto esse crescimento proporcional só se verifica para pressões, no interior do acelerador de iões, inferiores a 2×10^{-5} Torr. Para pressões superiores nota-se um abrandamento no aumento da corrente I_{Alvo} e até uma diminuição da corrente I_{Alvo} a partir de uma determinada pressão (em torno de 8×10^{-5} Torr). O facto do coeficiente de ionização ser proporcional à pressão não coincide com os resultados obtidos para pressões superiores a 2×10^{-5} Torr. A

corrente I_{Alvo} deveria aumentar proporcionalmente à pressão, tal como o faz para pressões inferiores a 2×10^{-5} Torr.

Por trás deste comportamento estará o percurso livre médio dos iões de deutério no interior do acelerador de iões que diminui com o aumento da pressão. Para confirmar este facto fez-se o cálculo do percurso livre médio das moléculas de deutério para uma pressão no interior do acelerador de iões de 8×10^{-5} Torr (pressão para a qual se verifica uma diminuição na corrente I_{Alvo}), Admitindo que o livre percurso médio dos iões de deutério com energias de 2,5 keV é semelhante ao da molécula de deutério.

Usando a expressão

$$(9) \quad \lambda = \frac{1}{\pi \times d_0^2 \times N_p} \quad cm$$

λ é o percurso livre médio em cm

d_0 é o diâmetro molecular de D_2 em cm, tirado de [Ross, 1964]

N_p é o número de moléculas de deutério por cm^3

calcula-se o valor do percurso livre médio da molécula de deutério (D_2) no interior do acelerador de iões com a pressão de 8×10^{-5} Torr. Esse valor é de

$$\lambda = \frac{1}{\pi \times (2,9 \times 10^{-8})^2 \times 2,8 \times 10^{12}} = 135,2 \quad cm.$$

Este valor é na ordem de grandeza do percurso percorrido pelos iões em direcção ao alvo (≈ 60 cm). De referir que a expressão (9) só é válida para a temperatura de $0^\circ C$. O número de partículas depende da temperatura pela expressão

$$(10) \quad N_p = \frac{N_A \times P}{R \times T}$$

N_A – Número de Avogadro

P – Pressão (atm)

R – Constante universal dos gases ideais ($R = 0,082 \text{ dm}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)

T – Temperatura (K)

(Nota: a correcção com a temperatura não foi efectuada pelo facto de não serem necessários resultados exactos, apenas estimativas)

O aumento de iões gerados no processo de ionização é proporcional à pressão, ao passo que o percurso livre médio é inversamente proporcional à pressão. A conjugação destes dois factores traz consigo um valor para pressão com a qual a corrente I_{Alvo} é máxima. A diminuição da corrente I_{Alvo} ocorre quando a pressão é elevada a valores superiores a 8×10^{-5} Torr (ver figura 24).

A partir da expressão seguinte é possível estimar a razão média entre o número de iões que chega ao alvo sem sofrer qualquer colisão no seu percurso (N) e o número de iões inicial (N_0).

$$(11) \quad \frac{N}{N_0} = e^{-\sigma \times x \times N_p}$$

N – Número de iões que não sofrem colisões

N_0 – Número de iões inicial

σ – Secção eficaz ($\sigma = \pi \times d_0^2$)

x – Comprimento do acelerador de iões

Quando a pressão é inferior a 2×10^{-5} Torr a percentagem média de iões que chega ao alvo, sem sofrer qualquer colisão no seu percurso, é superior a 90%. Deste modo, o número médio de iões que se perde em processos de colisão é baixo (inferior a 10%), o que significa que o aumento da corrente I_{Alvo} é aproximadamente proporcional ao aumento da pressão no interior do acelerador de iões. Para pressões superiores essa percentagem aumenta significativamente, estimando-se que quando a pressão ronda os $1,2 \times 10^{-4}$ Torr, em média, 50% dos iões sofre pelo menos uma colisão, com outra partícula, no seu percurso em direcção ao alvo.

Apesar destes números serem estimativas, pois foi considerado que a secção eficaz de colisão dos iões ($D^+ DD^+$, DDD^+ , H^+ , HH^+ e HD^+) é igual à secção eficaz clássica de colisão entre moléculas de deutério (D_2), são números que nos dão a informação, em primeira aproximação, da dependência da corrente

iónica no alvo em função da pressão, a qual se enquadra nos resultados experimentais obtidos. De referir também que, a pressão no acelerador de iões é um valor aproximado, pois a pressão é medida na fonte de iões e à saída do acelerador. Assim, é crível que a diminuição da taxa de crescimento da corrente I_{Alvo} se deve à diminuição do percurso livre médio dos iões de deutério.

Na análise dos resultados para a optimização das tensões da fonte sobressai um aumento no valor da corrente I_{Alvo} máxima em função do aumento da tensão V_S , para as tensões V_S até 2,50 kV (figura 25). Esse facto, à partida, não deveria acontecer, pois o coeficiente de ionização diminui com o aumento da energia dos electrões (figura 21) que está relacionada com V_S . Só para tensões V_S superiores a 2,50 kV é que se verifica a diminuição na corrente I_{Alvo} prevista teoricamente. A explicação desse facto está no comportamento dos valores de I_{Alvo} em função de V_F . Nos estudos em que as tensões V_S se situaram entre 2,00 kV e 2,40 kV, após se otimizar a tensão V_E , o aumento de V_F levava a uma diminuição na corrente I_{Alvo} . Para as tensões V_S de 2,50 kV e 2,60 kV com um pequeno aumento da tensão V_F (até 50 V) verificava-se um aumento na corrente I_{Alvo} insignificante (inferior a 0,1 nA) e continuando a aumentar V_F a corrente I_{Alvo} diminuía. Para as tensões V_S de 2,70 kV e 2,80 kV já existia um aumento superior a 0,1 nA na corrente I_{Alvo} com o aumento da tensão V_F (figura 26).

Verificando estes resultados conclui-se que quando V_S toma o valor de 2,50 kV ou 2,60 kV, a tensão ideal de focagem situa-se muito próxima dos 1,45 kV. Para as tensões V_S inferiores a 2,50 kV, a tensão de focagem deverá ser inferior a 1,45 kV. Para as tensões V_S superiores a 2,60 kV, V_F ideal é superior a 1,45 kV.

Assim, quando a tensão V_S é inferior a 2,50 kV a corrente I_{Alvo} aumenta com V_S porque a tensão V_F está a aproximar-se da tensão ideal. A partir do momento em que a tensão de focagem é superior a 1,45 kV, I_{Alvo} diminui com o aumento de V_S como se esperava, pelo facto do coeficiente de ionização também diminuir. Deste modo conclui-se que o aumento da corrente I_{Alvo} verificado com o aumento de V_S até às tensões de 2,50 kV está relacionado com a tensão de focagem.

Para as tensões V_S de 2,50, 2,60, 2,70 e 2,80 kV, as tensões V_F para as quais a corrente I_{Alvo} é maior são aproximadamente 1,45, 1,50, 1,60 e 1,65 kV, respectivamente. A razão entre V_S e V_F ronda os 60%, tal como é referido pelo fabricante da fonte de iões.

Analisando a figura 27, verifica-se um aumento da corrente I_{Alvo} com a corrente I_F . Tal facto ocorre porque o aumento do número de electrões que saem do filamento, por efeito termoiónico, depende do aumento de temperatura do filamento, que por sua vez depende do aumento da corrente que passa no filamento.

A corrente de emissão é dada pela lei de Richardson [Richardson, 1929].

$$(12) \quad I_e = A \times T^2 \times e^{-\frac{W}{k \times T}}$$

I_e – Densidade de corrente de emissão electrónica (A.m⁻²)

A – Constante de Richardson, que é igual a $1,20 \times 10^6$ A.m⁻².K⁻²

W – Função trabalho do metal (para o irídio é de 5,27 eV) [Weast, 1980]

k – Constante de Boltzmann, que é igual a $8,62 \times 10^{-5}$ eV.K⁻¹

T – Temperatura em °K

Em equilíbrio térmico a potência de emissão do filamento é aproximadamente a potência da corrente que passa pelo filamento. Assim temos pela lei de Stefan-Boltzmann de um corpo negro:

$$(13) \quad 2 \times \pi \times r \times l \times \varepsilon \times \sigma \times T^4 \approx R \times I_0^2$$

r – Raio do fio do filamento

l – Comprimento do filamento

ε – Emissividade do filamento

σ – Constante de Stefan-Boltzmann

R – Resistência do filamento

I_0 – Corrente que atravessa o filamento

Pela expressão (13) verifica-se que

$$T^2 = \sqrt{\frac{R}{2 \times \pi \times r \times l \times \epsilon \times \sigma}} \times I_0$$

sabendo que R varia com a temperatura, tal como já foi referido em (5).

Considerando

$$C_1 = \sqrt{\frac{R}{2 \times \pi \times r \times l \times \epsilon \times \sigma}}$$

temos

$$(14) \quad I_e = A \times C_1 \times I_0 \times e^{\frac{W}{k \times \sqrt{C_1 \times \sqrt{I_0}}}}$$

A expressão (14) dá-nos a relação entre a corrente que atravessa o filamento (I_0) e a corrente de emissão electrónica (I_e). Verifica-se que a corrente de emissão depende de vários factores, contidos em C_1 , para os quais não se tem conhecimento, tais como: raio e comprimento do filamento e a variação da resistência com a temperatura. No entanto, verifica-se que I_e aumenta com o aumento de I_0 , tal como acontece experimentalmente (figura 27).

A.VI – Problemas Ocorridos

Como já foi referido, o processo de construção do acelerador de iões positivos, após a decisão dos objectivos pretendidos, passou por vários processos: a escolha do equipamento; a montagem do equipamento; a projecção,

construção e montagem de vários componentes necessários; a idealização e construção do módulo de electrónica; a montagem dos vários módulos.

O início deste projecto passou pela idealização e concepção dos componentes necessários à montagem do equipamento adquirido anteriormente: a câmara de bombardeamento iónico, o tubo acelerador e a fonte de iões. Nesta fase, os problemas ocorridos estavam relacionados com fugas no sistema de vácuo. Eram pequenas fugas localizadas, sobretudo, nas soldaduras e nas colagens de alguns componentes. Os maiores problemas ocorreram na idealização e construção do módulo de electrónica.

O módulo de electrónica foi simulado recorrendo a *software* adequado. Neste caso recorreu-se ao programa MULTISIM & ELECTRONIC WORKBENCH, versão 6.2. Após a simulação procedeu-se à compra dos componentes necessários. A montagem dos vários componentes apresentou uma dificuldade acrescida: a necessidade de um módulo de reduzida dimensão. Isso levou à construção de um módulo constituído por pequenos módulos colocados por “andares” uns por cima dos outros. Essa opção foi em função da diminuição, tanto o quanto possível, da área ocupada pelo módulo de electrónica flutuante.

Na colocação do módulo em funcionamento verificou-se que existiam diferenças entre a simulação e a realidade, pois na simulação a electrónica é “ideal”. Esse facto levou a variadíssimas alterações nos componentes e, como consequência, na disposição física dos componentes.

No funcionamento da electrónica também surgiram descargas em alguns pontos onde existiam altas tensões. Esse isolamento, como já foi referido anteriormente, foi feito usando um tipo de silicone isolador. Esta solução serviu perfeitamente, deixando de haver descargas nas altas tensões.

Perante o aquecimento de alguns componentes, foi necessário instalar um circuito para o arrefecimento dos mesmos recorrendo a ventoinhas. Essas ventoinhas, quatro ao todo, obrigaram a uma nova reestruturação no módulo de electrónica.

O facto de não se ter analisado qual seria a corrente de electrões com origem no filamento e recolhidos na fonte (*source*) da fonte de iões, levou a uma

das maiores dificuldades técnicas no módulo de electrónica. Como os electrões saídos do filamento eram recolhidos pela fonte, gerava-se uma corrente electrónica com uma potência que poderia chegar às dezenas de watt. As fontes de alta tensão disponíveis tinham apenas 1 W de potência máxima. Isso levou a uma limitação no funcionamento do módulo de electrónica quando em funcionamento com a fonte de iões. Como todos os testes foram feitos recorrendo a uma resistência semelhante à da fonte de iões e como não existia corrente electrónica do filamento para a fonte, nenhum problema surgiu durante os testes. Apenas ocorriam problemas quando se introduziam correntes no filamento da fonte de iões. Ao se colocarem correntes elevadas (superiores a 1,75 A) a fonte de alta tensão deixava de funcionar. Tal facto originou várias avarias nos componentes electrónicos. Só com a descoberta da raiz destes problemas (a baixa potência das fontes de alta tensão) é que se compreendeu o problema. Em função disso, ficaram impossibilitados todos os testes com correntes no filamento superiores a 1,75 A.

Após um descuido, as baterias foram descarregadas mais do que o fabricante recomenda. Duas das quatro baterias ficaram com danos irreversíveis, ficando inoperacionais. Apenas duas baterias ficaram disponíveis para os testes a realizar. O facto de o módulo electrónico funcionar perfeitamente com tensões a partir de 7,5 V fez com que fosse possível prosseguir os trabalhos, ficando apenas a limitação das tensões das baterias não poderem baixar de 3,75 V cada, bem acima da tensão mínima de operação (3 V).

Existiram também alguns problemas na compra de alguns materiais, principalmente pelo não cumprimento dos prazos de entrega. Esse facto, aliado aos sucessivos atrasos nas disponibilidades orçamentais, levaram a que houvessem componentes que ainda não chegaram, apesar de terem sido encomendados no passado mês de Março. Em consequência disso, não foram possíveis realizar testes com altas tensões aplicadas na tensão de referência da fonte de iões e do módulo electrónico.

A.VII – Conclusões, Trabalho Futuro e Aplicações

Este trabalho pode ser classificado como concluído, pois o objectivo traçado era a colocação em funcionamento do acelerador de iões positivos, incluindo a aquisição de parte do equipamento, projecção, concepção (nas oficinas) e montagem de variadas peças necessárias ao acelerador de iões, projecto e montagem do módulo de electrónica flutuante e colocação em funcionamento de todo o equipamento. Todos estes trabalhos foram executados integralmente.

Quanto aos resultados, conclui-se o bom funcionamento de todo o equipamento. Os resultados ficaram dentro daquilo que se esperava. A dependência da corrente I_{Alvo} com a pressão no interior do acelerador de iões, com as tensões da fonte, extractor e focagem e a dependência com a corrente do filamento, está de acordo com aquilo que se esperava teoricamente.

O único equipamento que não pode ser testado no acelerador de iões foi a fonte de alta tensão externa que irá colocar o topo do acelerador de iões a tensões que poderão ir até 50 kV. Essa fonte de alta tensão foi testada até aos 50 kV, comprovando o seu bom funcionamento, mas não pôde ser posta em funcionamento juntamente com o acelerador de iões, pois não havia chegado o MACOR® para a construção das ligações isoladoras de alto vácuo, que iriam fazer o isolamento eléctrico, tanto para a garrafa de deutério, como para o vacuómetro do tipo *Penning* que mede a pressão no interior do acelerador de iões. No entanto foram feitas apenas medidas semi-qualitativas até 5 kV.

O trabalho futuro a curto prazo passa pela remodelação do módulo de electrónica flutuante com vista à substituição da fonte de alta tensão da *source*. Já foram localizadas no mercado as fontes de substituição: são fontes de alta tensão da mesma marca mas com a potência de 15 W. São da marca EMCO, modelo

H50P. Com estas fontes pensa-se resolver o problema ocorrido por falta de potência das fontes de alta tensão, pois tem uma potência quinze vezes superior. Essa substituição irá também obrigar a uma remodelação na caixa externa do módulo de electrónica, pois a dimensão das fontes é maior e não pode ser colocada no mesmo espaço físico das anteriores.

Outra alteração necessária será a instalação de um dispositivo protector para as baterias, que já se encontra previsto no esquema de electrónica (figura 17), com vista a não haver a possibilidade de as baterias descarregarem mais do que é conveniente. Esse dispositivo é um relé de voltagem fornecido pela empresa RS que desliga quando a tensão se tornar inferior a 9 V. Essa tensão corresponde exactamente à tensão total das três baterias colocadas em série, nas tensões mínimas de operação (3 V). Existe ainda a margem de segurança dada pelo fornecedor das baterias, o qual informa que a tensão mínima recomendada para operação é de 3 V, podendo no entanto ainda baixar até aos 2,7 V sem danificar as baterias. A colocação deste dispositivo será uma protecção para as baterias, para não acontecer outra vez a destruição de baterias por erro humano.

A curto prazo está também pensada a colocação dos tubos de alto vácuo em MACOR® para garantir o isolamento eléctrico do acelerador de iões com o resto do sistema. Essa colocação está dependente da chegada desse material, que já foi encomendado. Só com a colocação desse isolamento eléctrico se torna possível a colocação de altas tensões no topo do acelerador de iões.

A colocação de uma “gaiola” exterior, ligada à terra e que envolverá as regiões do acelerador a altas tensões, também é uma prioridade a partir do momento em que se colocarem altas tensões no tubo acelerador. A partir desse momento o controlo dos potenciómetros do módulo de electrónica flutuante, que regulam as altas tensões e a corrente na fonte de iões, serão manobrados por um varão isolador que irá estar no exterior da “gaiola” de protecção.

A médio prazo está previsto o estudo do diâmetro do feixe de iões, em vista a conhecer os efeitos das altas tensões na focagem do feixe. Este estudo poderá ser feito colocando vários anéis concêntricos e isolados electricamente uns dos outros, medindo a corrente I_{Alvo} de cada um deles.

Na colisão dos iões com alvos, torna-se necessário conhecer com rigor a natureza dos iões que estão a colidir com o alvo. Essa necessidade irá obrigar à construção e colocação de um filtro de *Wien*. Esse trabalho será um trabalho posterior aos trabalhos atrás referidos.

Este acelerador de iões está concebido de forma a poder elevar as tensões para a aceleração dos iões até 100 kV. Essa alteração irá obrigar a um aumento do número de anéis que constituem o tubo acelerador, bem como a substituição da fonte de alta tensão por uma que seja capaz de atingir essas tensões (a actual apenas pode ir até 50 kV).

Após estas alterações no acelerador de iões (prevêem-se que ocorram no decorrer de um ano) as aplicações serão variadas. As primeiras aplicações serão os estudos das secções eficazes para baixas energias na produção de raios X. Além destas aplicações também é possível desenvolver um sistema de varrimento do feixe iónico para análise de superfícies. Eventualmente também se pode optar por fazer estudos da emissão secundária de electrões após o bombardeamento iónico e ainda utilizar o acelerador para produzir neutrões, entre outros.

B

Sistema de Purificação de Gases

B.I. – Introdução

A eficiência e a resolução dos detectores gasosos de radiação dependem da pureza dos gases utilizados no enchimento [Veloso, pag. 71, 2000]. Esse facto leva a que haja um cuidado extremo com a pureza dos gases utilizados.

A pureza dos gases com que são efectuados os trabalhos de investigação tem de estar assegurada. A montante está a escolha do gás a comprar. Essa escolha recai sempre em empresas que fornecem gases com elevado índice de pureza (sempre superiores a 99,999%). Todavia, para alguns trabalhos, ainda

existe a necessidade de purificar mais o gás, diminuindo o índice de impurezas, as quais podem também ter origem na desgasificação das paredes interiores do sistema. Para corresponder a essa necessidade recorre-se à utilização de uma linha de purificação de gases.

No Grupo de Instrumentação Atómica e Nuclear sediado no Departamento de Física da Universidade de Coimbra está instalada apenas uma linha purificadora de gases. Como um dos grandes pilares de investigação do grupo passa pela utilização de detectores gasosos de radiação, essa é uma linha com uma utilização bastante frequente e por vezes torna-se insuficiente. A mesma, até ao momento, só pode ser utilizada por uma garrafa de gás de cada vez, sendo necessária a substituição das garrafas sempre que é necessário encher um detector com um gás diferente.

Dadas as necessidades foi pensada a instalação de outra linha de purificação de gases. Essa linha tem de estar associada a um sistema de alto vácuo. Como foi necessária a instalação de um sistema de alto vácuo para o acelerador de iões, decidiu-se a instalação de uma linha purificadora de gases nobres associada ao mesmo sistema de alto vácuo.

Contudo, o principal objectivo deste sistema é o enchimento de detectores gasosos para detectores de raios X de baixa energia, a utilizar em experiências de produção de raios X pelas partículas carregadas aceleradas no acelerador descrito na primeira parte desta dissertação.

B.II – Projecção e Montagem

A linha de purificação de gases (figura 28) foi projectada para ser possível ligar várias garrafas em simultâneo, com vista a não haver a obrigatoriedade de substituição das mesmas sempre que for necessário a utilização de um gás diferente. A mesma linha foi projectada para ter um depósito, com um volume de aproximadamente 1 dm^3 , que irá funcionar como um reservatório de gás, para, caso seja necessário, recorrer ao gás aí guardado.

Foi prevista a colocação de uma câmara para a recolha do gás em excesso na linha, pois sempre que se faz o enchimento de um detector a uma determinada pressão, toda a linha fica a essa pressão. Essa recolha do gás é feita por arrefecimento da câmara, utilizando azoto líquido. Submergindo a câmara em azoto líquido, a temperatura no seu interior desce aos 77°K , fazendo com que os gases se condensem no interior da câmara, procedendo desta forma à sua recolha. Esta recolha dos gases tem um especial interesse para os gases mais caros, tais como Xe e Kr.

Dada a grande utilização para a purificação dos gases, foram projectados dois pontos de saída dos gases, para se abrir a possibilidade do enchimento de dois detectores em simultâneo.

Para o funcionamento de uma linha de purificação de gases nobres, como é natural, é necessário um purificador. Após a sondagem do mercado na área dos purificadores de gases, a opção recaiu num purificador da MicroTorr, marca SAES, modelo PS11-MC200-R. É um purificador destinado à purificação dos gases N_2 , Ar, He, Ne, Kr, H_2 e SiH_4 . Opera à temperatura ambiente, não necessitando de estar aquecido para ficar activado. É um purificador eficiente para fluxos de gás até $5 \text{ dm}^3/\text{min.}$, o que serve perfeitamente os objectivos propostos.

Além do purificador foi necessário adquirir diversos componentes para alto vácuo e algum equipamento para a instalação da linha de purificação, tais

como: medidor de pressão absoluto, da marca MKS, modelo 722A53THA3FC; Medidor de pressão da marca WIKA, modelo 111.10; duas válvulas de agulha, uma da marca VARIAN, modelo 9515106 e outra da marca SWAGELOK, modelo SS-4BM6-TW; manorredutores da marca DRUVA, para gases inflamáveis e não inflamáveis; variadas torneiras, sendo uma delas apropriada para altas pressões (até 50 atm, ou seja, aproximadamente 38000 Torr), e as outras para utilização em pressões inferiores a 5000 Torr; diverso material para alto vácuo (“T’s”, “Cruzes”, “Cotovelos” e anéis de cobre).

O esquema genérico da linha está apresentado na figura seguinte.

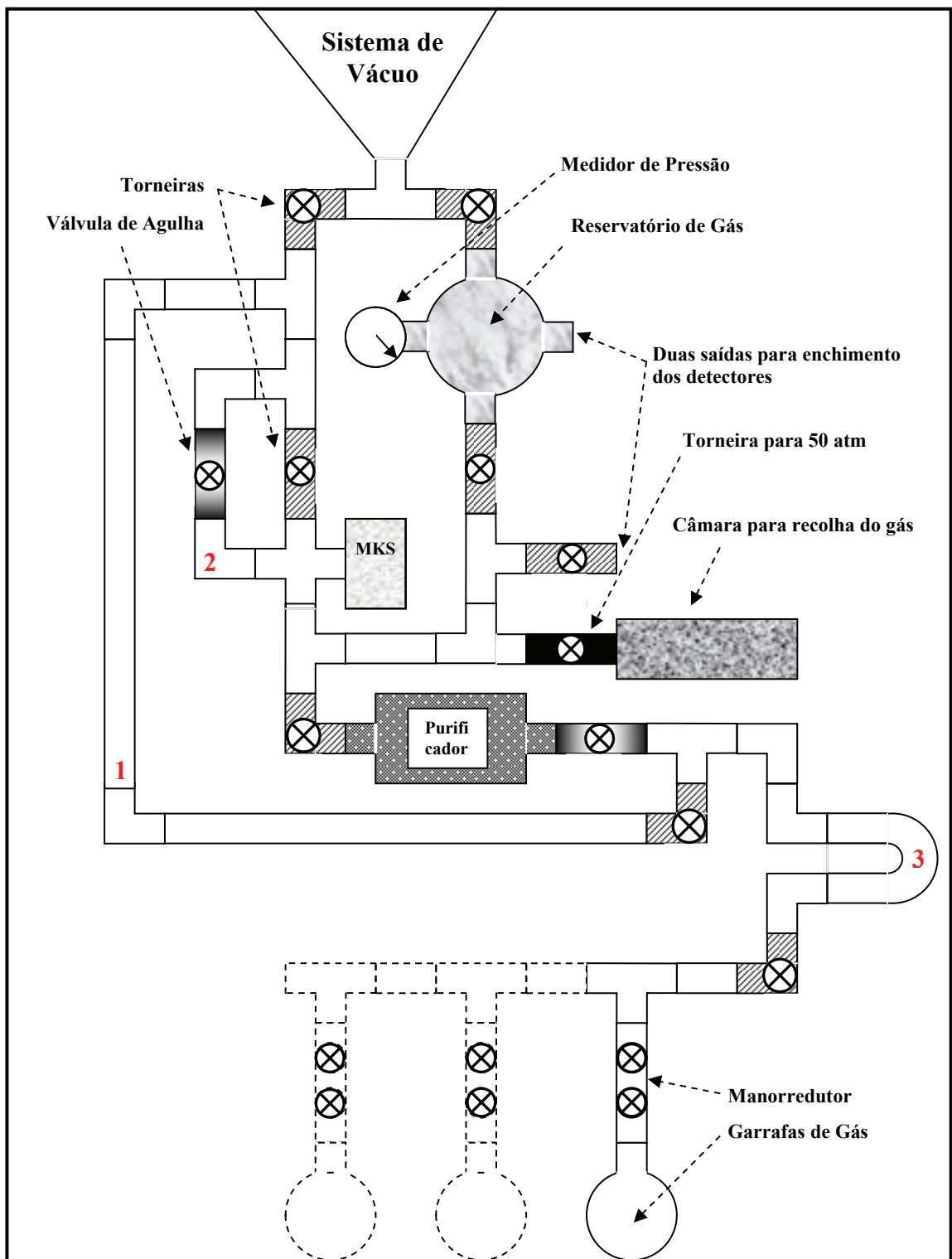


Figura 28 – Esquema genérico da linha de purificação de gases nobres. O que está a tracejado (sector das garrafas) não está colocado, mas está prevista a sua colocação, assim que seja necessário, pois o equipamento já está adquirido.

O sistema de vácuo, composto por uma bomba turbomolecular e por uma bomba rotativa, está ligado à linha de purificação de gases. Essa ligação está feita em dois pontos distintos da linha. A ligação referenciada com o número '1' (figura 28) serve para fazer vazio no tubo em 'U' e na zona das garrafas, sem ter de se utilizar o sector da linha onde está colocado o purificador e a válvula de agulha. Essa ligação é essencial para a preservação do purificador e da válvula de agulha.

O medidor de pressão MKS mede pressões de 0 a 5000 Torr com uma precisão de 1 Torr. Essa leitura de pressões é feita usando um multímetro. O medidor de pressão que se encontra no reservatório de gás é do tipo *Bourdon* e mede pressões entre 0 e 5 atm. A precisão deste medidor de pressão é de 0,05 atm (cerca de 40 Torr).

As duas válvulas de agulha têm características diferentes, pois as suas funções também são diferentes. A válvula da marca VARIAN, de grande precisão, está colocada entre as garrafas de gás e o purificador e serve para regular o fluxo de gás que passa através do purificador. É uma válvula de agulha que usa uma esfera de safira como vedante. Tem a capacidade de regular, com grande precisão, fluxos de gás a partir de 10^{-10} Torr.dm³.s⁻¹. A outra válvula de agulha, da marca SWAGELOK, tem menos precisão, mas é suficientemente precisa para aquilo a que se destina. Esta válvula está montada em paralelo com uma das ligações do sistema de vácuo à linha de purificação (referência 2). Tem a função de extrair, com grande precisão, o gás que eventualmente tenha ficado em excesso no final do processo de enchimento dos detectores. Esta válvula de agulha tem a capacidade de controlar fluxos na ordem de 10^{-7} Torr.dm³.s⁻¹. Como a precisão do MKS é de 1 Torr, não havia a necessidade de instalar uma válvula de agulha melhor e mais cara que esta.

O tubo em 'U' (referência 3) serve para fazer uma pré-purificação do gás. Ao encher de gás o sector da linha de purificação onde se encontra colocado o tubo em 'U' e colocando-o a temperaturas muito baixas (na ordem de 200°K) durante 30 minutos, retém-se a água que eventualmente possa estar presente no

gás. Essa temperatura consegue-se mergulhando o tubo em ‘U’ numa mistura de acetona e neve carbónica.

No esquema da linha de purificação de gases verifica-se a presença de duas saídas para o enchimento de dois detectores em simultâneo e a possibilidade de instalar várias garrafas em simultâneo.

Os gases que são inflamáveis são colocados em garrafas com rosca invertida. Dada a utilização de alguns gases inflamáveis no enchimento dos detectores do grupo, houve a necessidade de adquirir manorredutores de dois tipos: para gases inflamáveis e não inflamáveis.

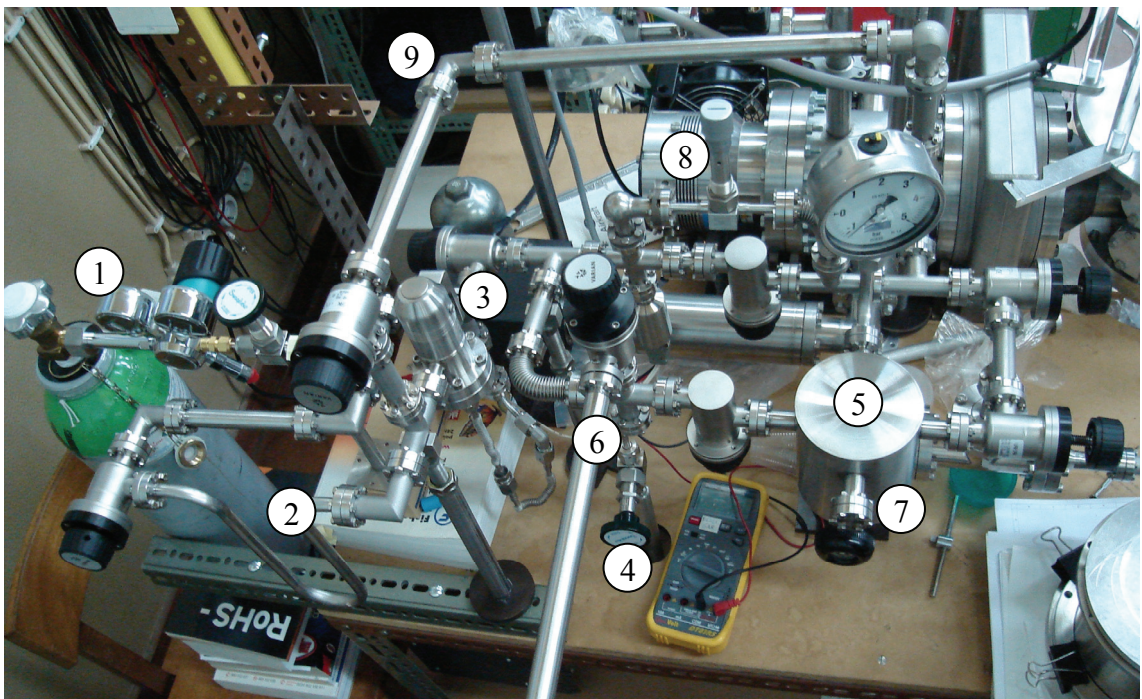


Figura 29 – Sistema de purificação de gases, que inclui: 1- Garrafa de gás e manorredutor; 2- Tubo em ‘U’; 3- Válvula de agulha para regulação do fluxo de gás a purificar; 4- Câmara para recolha do gás; 5- Reservatório de 1 dm³. 6 e 7- Saídas para o enchimento de detectores; 8- Válvula de agulha para retirar o gás em excesso na linha; 9- Linha para fazer vácuo na zona das garrafas e do tubo em ‘U’.

Devido ao facto da pureza do gás ser de extrema importância na resolução e eficiência dos detectores gasosos de radiação, foram testadas todas as ligações e soldaduras de forma a eliminar quaisquer fugas existentes. A pressão que se consegue dentro da linha após 30 minutos de funcionamento do sistema de alto vácuo é da ordem de 1×10^{-7} Torr. No entanto, com mais tempo de funcionamento atingem-se pressões inferiores a 10^{-8} Torr.

As figuras seguintes representam os espectros de massa recolhidos pelo espectrómetro de massa instalado no sistema de alto vácuo, localizado entre a linha de purificação de gases e a bomba turbomolecular.

As pressões relativas são em função de m/e , em que m vem em unidades de massa atómica e e a carga do ião em unidades de carga do electrão (em módulo).

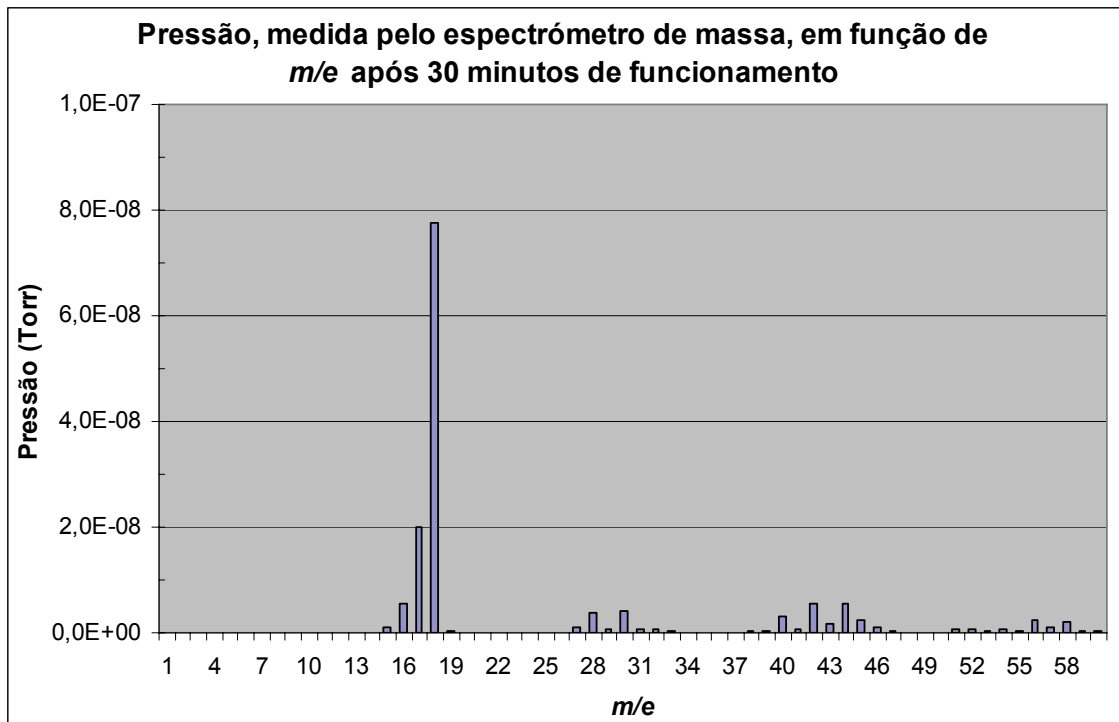


Figura 30 – Gráfico da pressão relativa por m/e ao fim de trinta minutos de funcionamento do sistema de alto vácuo.

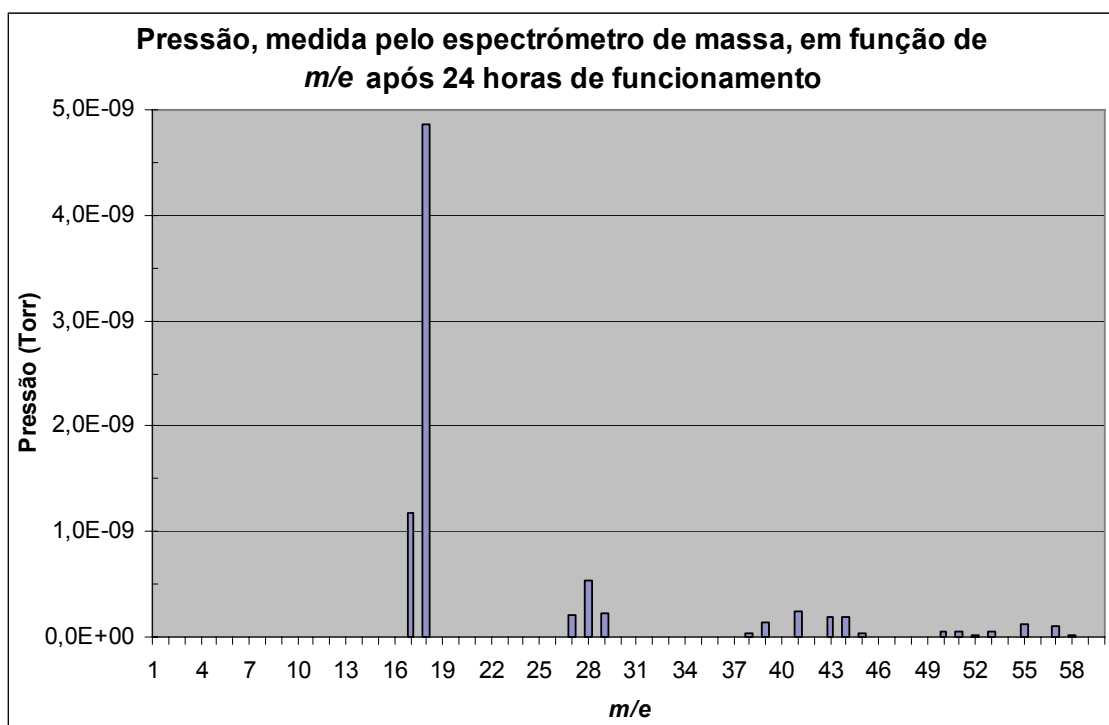


Figura 31 – Gráfico da pressão relativa por m/e ao fim de vinte e quatro horas de funcionamento do sistema de alto vácuo.

Estes espectros comprovam as boas condições para a purificação de gases nesta linha, pois a pressão do gás residual no interior da linha é bastante baixa (ao fim de vinte e quatro horas a pressão total é inferior a 1×10^{-8} Torr) e é sobretudo vapor de água. Verifica-se a não presença de fugas detectáveis com o equipamento disponível. A ausência do pico de massa atômica 32 (correspondente ao O_2), ao fim de vinte e quatro horas de funcionamento do sistema de alto vácuo, comprova isso mesmo.

B.III – Conclusões, Trabalho Futuro e Aplicações

O processo de projecção e instalação da linha de purificação de gases teve como grande dificuldade a idealização da linha, de forma a ocupar pouco espaço, a ser prática e intuitiva e que fossem minimizadas as perdas de gás na linha sempre que se fazia o enchimento de um detector, pois alguns gases utilizados são de elevados valores comerciais. Esse processo demorou algum tempo e teve de sofrer algumas alterações no decorrer da sua montagem, principalmente devido ao espaço físico ser bastante limitado.

Houve também algumas dificuldades em eliminar todas as fugas existentes na linha. Foi um trabalho moroso, pois obrigava à localização de fugas, por vezes com fluxos de gás muito pequenos. Fazendo testes de fugas recorrendo à acetona, verificava-se que, em alguns casos, a pressão relativa da acetona subia apenas para valores na ordem de 10^{-10} Torr, demonstrando que a fuga em causa era de dimensões extremamente reduzidas. As fugas estavam essencialmente nas ligações entre componentes, pois o seu número era muito elevado. O número de ligações existentes na linha de purificação ronda a centena. Qualquer anel vedante com uma pequena imperfeição dava origem a uma fuga no sistema. Essa fuga tinha de ser localizada e reparada substituindo o anel vedante. O problema das fugas foi resolvido. Eventuais fugas, a existirem, já não são possíveis de detectar com o equipamento disponível.

Este trabalho para poder ser dado como concluído apenas faltam instalar mais manorredutores para a colocação de mais garrafas, pois todo o equipamento e todas as componentes já se encontram instaladas. Já foram feitos enchimentos em detectores recorrendo a esta linha de purificação de gases. A não colocação de mais manorredutores deve-se apenas a não terem sido ainda necessários.

Como dissemos, esta linha de purificação de gases destina-se ao enchimento dos detectores gasosos de radiação a ser utilizados no acelerador de iões positivos. Com ela vieram também as mais-valias de estar facilitado o enchimento de detectores com misturas gasosas e de uma maior precisão ao nível da pressão de enchimento dos detectores (precisão até 1 Torr). Esta nova linha de purificação de gases também irá libertar um pouco mais a única linha de purificação de gases que existia no Grupo de Instrumentação Atómica e Nuclear do Departamento de Física da Universidade de Coimbra.

Referências

- Cockroft Jonh D., Walton E. T. S., “Experiments with high velocity positive ions”, Proc. Roy. Soc. (London), ser A, 136, 619-630, 1932.
- Cockroft John D., “Experiments on the interaction of high-speed nucleos with atomic nuclei”, Nobel Lecture, 11 de Dezembro, 1951, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1951/cockcroft-lecture.pdf
- Gray Dwight E., “American Institute of Physics Handbook”, McGraw-Hill, 3th Edition, 1972.
- Jha L. K., Kumar S., Roy B. N., “Electron Impact Single and Double Ionization of Argon), The Eur. Phys. J. D 50, 101-106 (2006).
- Kim Young-ki, National Institute of Standards and Technology, Atomic Physics Division, <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Ionization/table.pl?ionization=H2>
- Krane Kenneth S., livro editado sob o título “Introductory Nuclear Physics”, John Wiley & Sons, 1988.
- Livingstone M. S., Blewett J. P., “Particle Accelerators”, McGraw-Hill Book Company, New York, 1962.
- Moutinho Augusto M. C., Silva, Maria E. S. F., Cunha, Maria A. C. M. I., livro editado sob o título “Tecnologia de Vácuo”, Junho, 1980.
- Panofsky Wolfgang K. H., “The evolution of particle accelerators & colliders”, <http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/27/1/27-1-panofsky.pdf>, 1997

- Richardson Owen W., “Thermionic phenomena and the laws which govern them”, Nobel Lecture, December 12, 1929, http://130.242.18.21/nobel_prizes/physics/laureates/1928/richardson-lecture.pdf#search=%22nobel%20lecture%2C%20december%2012%2C%201929%22
- Ross Marvin, Hildebrand Joel H., “Diffusion of Hydrogen, Deuterium, Nitrogen, Argon, Methane and Carbon Tetrafluoride in Carbon Tetrachloride”, The Journal of Chemical Physics, Vol. 40, N°8, 2397-2399, April 1964.
- Van de Graaff R. J., Compton K. T., Van Atta L. C., “The Electrostatic Production of High Voltage for Nuclear Investigations”, The Physical Review Vol. 43, N°3, 149-157, February 1, 1933.
- Veloso J.F.C.A., “Detectores Gasosos de Radiação Baseados em Microestruturas”, Dissertação de Doutorado, Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2000.
- Weast Robert C., Astle Melvin J., livro editado sob o título “CRC Handbook of Chemistry and Physics”, 60th Edition, 1980.
- Stanley Humphries Jr., livro editado sob o título “Principles of Charged Particle Acceleration”, John Wiley and Sons, 1999.
- Stanley Humphries Jr., livro editado sob o título “Charged Particle Beams”, John Wiley and Sons, 2002.

Anexo 1

Vistas de algumas das peças feitas nas oficinas do
Departamento de Física da Universidade de Coimbra
para o Acelerador de Iões Positivos

Anexo 2

Vistas de algumas das peças feitas nas oficinas do
Departamento de Física da Universidade de Coimbra
para a linha de purificação de gases

Anexo 3

Contactos úteis para a construção de um Acelerador de Iões Positivos e de uma linha de purificação de gases

ADVANCED FLOW TECHNICS – Fornecedor de Purificadores da SAES
PO Box 6171 – 4000 HD
Tiel Netherlands
Fax 0031 344 603 529

AIR LIQUIDE – Fornecedor de gases
Contacto: Enga. Gabriela Abreu
Estrada Nacional Nº13 (km 6,3) Nº900
4471-909 – Maia
Portugal
Tel.: 229 430 923
Fax: 229 430 957

CABURN
Contacto: Sue Knight
East Sussex BN86SJ
Inglaterra
Tel.: 0044 1273 858 858
Fax: 0044 1273 858 561
www.caburn.co.uk

CAMBERRA – Equipamento electrónico
Bélgica
Fax: 0044 1235 83 83 63

CENTRO DE ELECTRÓNICA – Componentes eléctricos
Rua Filipa Terzi
Apartado 4083-3030 Coimbra
Portugal
Tel.: 239 791 333
Fax: 239 791 330

CRIOLAB – Equipamento e componentes de vácuo
Contacto: Eng. José Albuquerque
Rua Dr. Francisco Sá Carneiro, 341, 4º Dto.
4450-801 Leça da Palmeira
Portugal
Tel. 229 964 845
Fax 229 964 847

EMCO – High Voltage Corporation
Contacto: Charles Witsch
11126 Ridge Engineer
Sutter Creek, California 95685
USA
Tel.: 001 209 223 3626
Fax: 001 209 223 2779
www.emcohighvoltage.com

FARNELL – Componentes electrónicos
Contacto: D. Rosa Valle
Email: rvall@farnellioone.com
www.farnellinone.com

FERNADES ALVES Lda. – Fornecedor WIKA
Rua Mousinho da Silveira, nº46
4030-414 Porto
Portugal
Tel. 222 000 213
Fax 222 085 144

GAIA AKKUMULATORENWERKE – Baterias de Iões de Lítio
Contacto: Mr. Steinwachs
Montainstrasse 17
Postfach 100616
99726 Nordhausen
Germany
Tel. 0049 3631 61 67 55
Fax 0049 3631 61 67 49

HIDEN – Equipamento Científico
Contacto: Mr. Richard Neale
Hiden Analytical Ltd.
420 Europa Boulevard
Warrington WA5 7UN
England
Tel. 0044 1925 445 225
Fax 0044 1925 416 518

LANEMA – Matérias plásticas
Zona Industrial de Ovar
Rua do Brazil, L-18, Ap. 169
3880-108 Ovar
Portugal
Fax 256 581 419

MKS – Equipamento científico
Contacto: Oliver Fischer
Schatzbogen 43
D-81829 – Muchen
Alemanha
Tel.: 0049 89 42 00 080
Fax: 0049 89 42 41 06
www.mksinstruments.de

Precision Ceramics – Construção de peças em cerâmica
Contacto : Steve Swallow
86 Lower Tower Street
Birmingham, B19 3PA
England
Tel. 0044 121 687 5858
Fax 0044 121 687 5857
www.precision-ceramics.co.uk

PRONUCLEAR – Equipamentos Científicos
Contacto : Sra. Carla Mendes
Praça Infante Dom Pedro, 14-B
1495-149 Algés
Portugal
Tel. 214 103 303
Fax 214 108 502

RS AMIDATA – Componentes electrónicos
www.rs-portugal.com

SOCIEDADE ZICKERMANN – Equipamento e componentes de alto vácuo

Contacto: Sr. Eng. Hélio Sousa

Rossio, N°3

1100-199 Lisboa

Portugal

Tel. 213 224 163

Fax 213 224 169

SPELLMAN – Electrónica de Alta Voltagem, fornecedor BERTAN

Broomers Park

West Sussex

United Kingdom

Fax 0044 1798 872 479

STEC – Equipamento e componentes de vácuo

Rua Bernardino de Almeida

4200-072 Porto

Portugal

Tel 225 504 077

Fax 225 504 086

STV – Revendedor de equipamento e componentes para alto vácuo

Contacto : Sra. Vanda

Casal da Serr, Lote 103 – Loja Esq.

2625 – Póvoa de Santa Iria

Portugal

Tel. 219 563 007

Fax 219 562 997

Anexo 4

Esquema Electrónico usado na construção
do Módulo de Electrónica Flutuante