

## CAPÍTULO 2

### Montagem Experimental

Neste capítulo serão descritas as montagens experimentais do sistema construído neste projeto. O sistema visa a detecção de fótons VUV (*vacuum ultraviolet*) emitidos por amostras quando atingidas por um feixe de elétrons na faixa de energias entre 25 e 400 eV. As seções a seguir abrangerão temas como a câmara de vácuo, o detector Micro-Channel Plate, o canhão de elétrons, a bobina de deflexão e o porta-amostras.

As peças montadas e descritas neste capítulo foram fabricadas junto à oficina mecânica do Laboratório Van de Graaff do Departamento de Física da PUC-Rio. Os equipamentos utilizados na deposição e caracterização dos filmes serão descritos no próximo capítulo.

#### 2.1 – A câmara de vácuo

A operação de um canhão de elétrons e do detector Micro Channel Plate (MCP) requer uma câmara de alto vácuo (pressão de  $10^{-4}$  Pa), uma vez que o filamento de tungstênio do canhão e a superfície de microcanais do detector rapidamente se oxidam caso seja aplicada tensão elétrica a eles em presença de pressões maiores (acima de  $10^{-2}$  Pa no caso do canhão). Além disso, o fato do detector utilizado conter um *coating* de CsI (higroscópico) impede a permanência do detector por muito tempo na pressão atmosférica.

Logo, foi utilizada uma câmara de vácuo ligada a uma das linhas do Acelerador Van de Graaff do Departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Convém frisar que para o desenvolvimento deste projeto o acelerador em si nunca foi utilizado. A câmara, circular, possui um

diâmetro de 34 cm e 19 cm de altura, e na figura 2.1 pode ser visto um desenho esquemático da mesma.

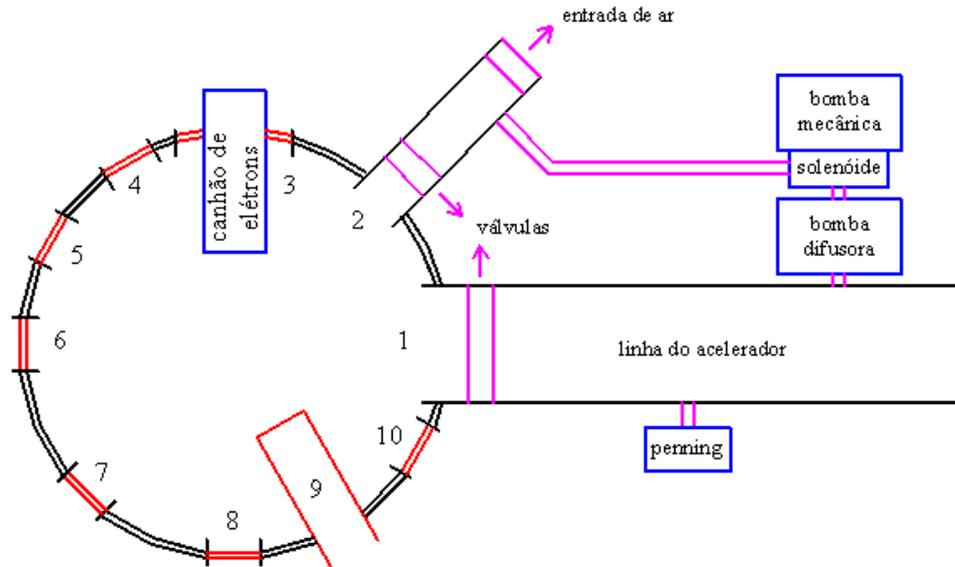


Figura 2.1 – Câmara de trabalho e sistema de bombeamento de vácuo.

A câmara contém 10 saídas, numeradas a partir da saída para a linha do acelerador (linha número 1, a um ângulo de  $0^\circ$ ) em ordem crescente no sentido anti-horário. Com isso temos, especificando o ângulo de cada saída em relação à primeira:

1.  $0^\circ$ : Saída para a linha do acelerador Van de Graaff, onde estão localizadas as bombas difusoras de 4 polegadas responsáveis pelo bombeamento secundário da câmara (de  $1$  a  $10^{-4}$  Pa) e o medidor de tipo Penning, responsável pela medição da pressão no interior da linha e, conseqüentemente, da câmara.
2.  $45^\circ$ : Saída para a válvula de entrada de ar e para a bomba mecânica responsável pelo vácuo primário da câmara (da pressão atmosférica a 1 Pa). Uma válvula Edwards PV25 veda esta saída.
3.  $90^\circ$ : Saída com 5 *feed-throughs* (passantes feitos de aço e envoltos em isolante – teflon), utilizados para o controle do canhão de elétrons.
4.  $120^\circ$ : Saída com 2 *feed-throughs*, também utilizada para o controle do canhão.
5.  $150^\circ$ : Uma das quatro saídas (as outras são 6, 7 e 10) utilizadas para diferentes fins durante o experimento. Revezam-se, nestas saídas, o flange

para o detector MCP, uma saída com 2 *feed-throughs*, uma saída com 4 *feed-throughs* e uma tampa. Ver Capítulo 4 – Resultados e Discussões.

6. 180°: vide saída 5.
7. 225°: vide saída 5.
8. 270°: Janela de quartzo, utilizada para alinhamento do canhão com a bobina de Helmholtz e com o copo de Faraday e também para medições precisas do interior da câmara.
9. 300°: Saída não utilizada.
10. 330°: vide saída 5.

Todas as saídas medem 4,4 cm de diâmetro, com exceção das saídas 1 e 3, que possuem 9,5 cm de diâmetro, e seus centros estão localizados a 10,5 cm de altura da base da câmara. A saída 9 possui ainda um pequeno tubo de 4,8 cm de diâmetro que se projeta 10 cm para o interior da câmara. Todas as saídas têm um O-Ring de vedação para quando a pressão for reduzida.

A saída 1 ainda é separada da linha do acelerador por uma válvula Balzers SW100PA, que, quando fechada, permite que o vácuo da câmara seja quebrado sem que a pressão do restante da linha seja alterada. Desta forma, demora-se muito menos tempo para recuperar a pressão de trabalho.

No entanto, como a câmara em si não tem bombas difusoras, há necessidade de utilizar as bombas difusoras (duas) da linha do acelerador para bombear a câmara depois de atingir do vácuo primário dentro da câmara. Por isso, na saída 2, existe uma ligação direta entre a bomba mecânica da difusora mais próxima da câmara e a própria câmara. Para fazer vácuo, desliga-se a difusora em questão e fecha-se a válvula solenóide que conecta a bomba mecânica à difusora. Com isso, e abrindo a válvula Edwards da saída 2, a bomba mecânica bombeia diretamente a câmara, até que uma pressão de 1 Pa seja atingida. Acima dessa pressão, a bomba difusora não pode ser ligada, com o risco do seu óleo subir e contaminar toda a linha [26].

Quando o vácuo primário é atingido, basta fechar a válvula na saída 2, abrir a válvula solenóide (para que a bomba mecânica bombeie a difusora), ligar a bomba difusora e finalmente abrir a válvula na saída 1. A pressão chega, em condições ideais, a  $10^{-4}$  Pa entre 2 e 3 horas de bombeamento. Entretanto, quando algum novo componente que contenha material de degaseificação demorada (p.ex. teflon) é inserido na câmara, este período tende a aumentar.

A câmara, assim como todas as outras peças montadas, são feitas de alumínio, a não ser quando indicado explicitamente no texto. O tampo da câmara é de vidro, permitindo a observação do interior.

## 2.2 – O detector MCP

O detector utilizado neste trabalho foi um detector MCP/RAE (Micro Channel Plate / Resistive Anode Encoder) da série 3300 da Quantar (modelo 3394-005-3225-CsI). A MCP é um arranjo de 104 a 107 multiplicadores de elétrons em miniaturas, dispostos paralelamente um ao outro, formando canais de diâmetro típico de 10 a 100  $\mu\text{m}$ . Estes canais são dispostos de modo que formem um pequeno ângulo ( $\sim 8^\circ$ ) com a superfície, aumentando a área de detecção. A matriz dos canais é geralmente fabricada a partir de um vidro de chumbo, tratado de forma a otimizar as características de emissão secundária de cada canal e tornar a parede de cada canal semicondutora, de modo a permitir a reposição de cargas por meio de uma fonte de tensão externa (ver figura 2.2a).

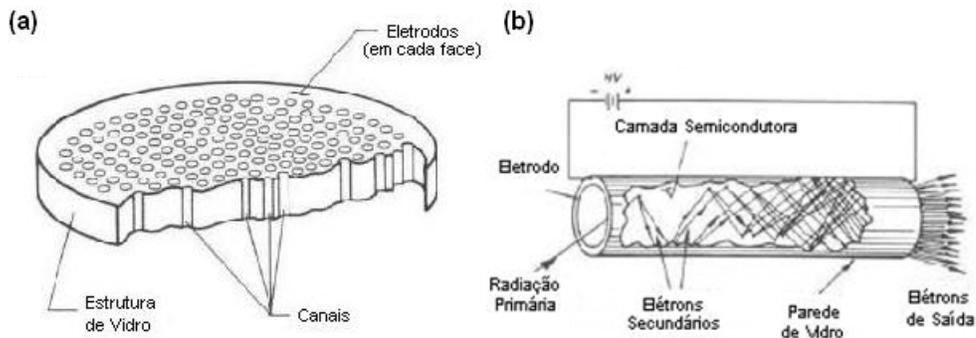


Figura 2.2 – a) Representação de uma placa da Micro-Channel Plate; b) Diagrama da cascata de elétrons gerada pela radiação incidente.

Um *coating* metálico, depositado em cada face, ao longo do diâmetro externo da MCP, faz o contato elétrico entre os canais e funciona como eletrodos de entrada e saída para a fonte externa, entre os quais a resistência total é da ordem de  $10^9 \Omega$ . Desta forma, cada partícula que atinja a superfície da MCP gera uma cascata de elétrons por emissão secundária (emissão de dois elétrons, causada por um elétron incidente de energia mais alta – ilustrada na figura 2.2b). Estes elétrons são acelerados pelo campo externo ( $\sim 10^3 \text{ V/mm}$ ) no sentido da outra superfície da MCP, causando um fator de multiplicação da ordem de  $10^6$  a  $10^8$ . A

MCP permite também uma resolução temporal alta ( $< 100$  ps) acoplada de resolução espacial de  $1/100$  (a superfície da MCP utilizada tem 4 cm) [27]. Isto ocorre na configuração *Chevron*, onde há uma montagem de duas placas MCP com inclinações invertidas, a fim de aumentar a superfície exposta dos canais da segunda MCP à incidência de elétrons da primeira MCP, aumentando assim a cascata eletrônica.

A MCP pode ser utilizada para a detecção de partículas carregadas (e.g. elétrons, íons) ou fótons energéticos (e.g. raios-X, ultravioleta de vácuo), que é o foco deste trabalho. A eficiência de detecção de uma MCP para comprimentos de onda de fótons na faixa de 300-1100 Å está entre 5 e 15%, mas ela cai muito rapidamente entre 1100 e 1300 Å (de 5 a 1%) e em 1600 Å chega a menos de 0,1%. A MCP utilizada, no entanto, possui um *coating* de CsI, que funciona como fotocátodo [28], aumentando a eficiência da MCP para a detecção de fótons nesta faixa. Com isso, a eficiência de detecção até 2000 Å fica acima de 1%, como pode ser visto na figura 2.3.

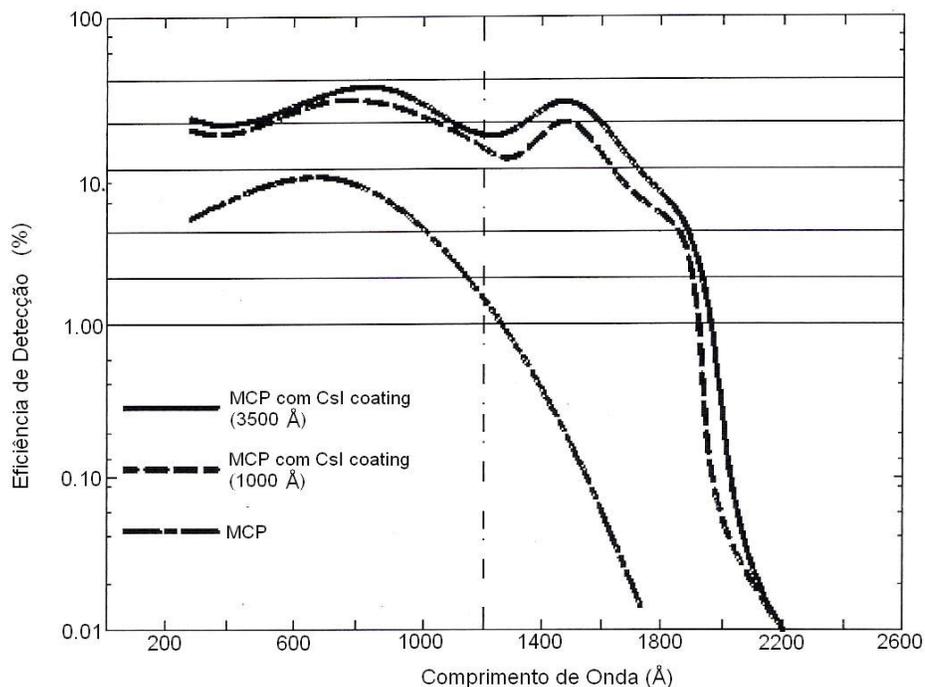


Figura 2.3 – Gráfico da eficiência de detecção de uma MCP em função do comprimento de onda do fóton incidente [27]. A eficiência de detecção aumenta sensivelmente de uma MCP simples para uma com *coating* de CsI e a espessura do *coating* influencia pouco na sensibilidade de detecção.

O sinal captado pelo detector é então levado a um pré-amplificador, que é conectado a um Analisador de Posição 2401B da Quantar. Este analisador funciona como conversor analógico-digital e como processador pulso-posição, transformando os pulsos elétricos detectados pelo anodo em sinais digitais referentes à posição (em eixos x e y), que são levados para um computador com um software de aquisição de dados dedicado.

A montagem do detector MCP com *coating* de CsI, que deve ficar em vácuo [29], é tal que sua largura chega a 10cm e seu comprimento chega a 8 cm (ver figura 2.4). A construção de um flange específico para o detector utilizado deve-se a duas razões: não existir nenhuma saída da câmara onde o detector pudesse ser encaixado diretamente; e deixar apenas a superfície de detecção da MCP exposta à câmara (e às partículas a serem medidas), para não haver contagens espúrias.

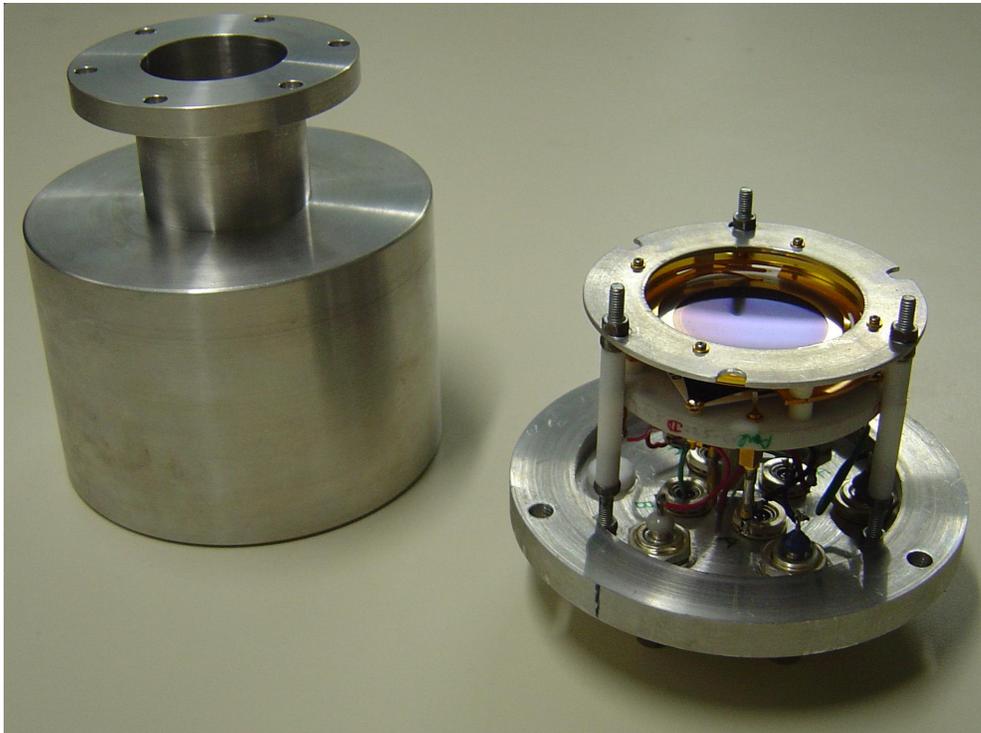


Figura 2.4 – Foto do detector MCP (à direita), com o flange construído (à esquerda).

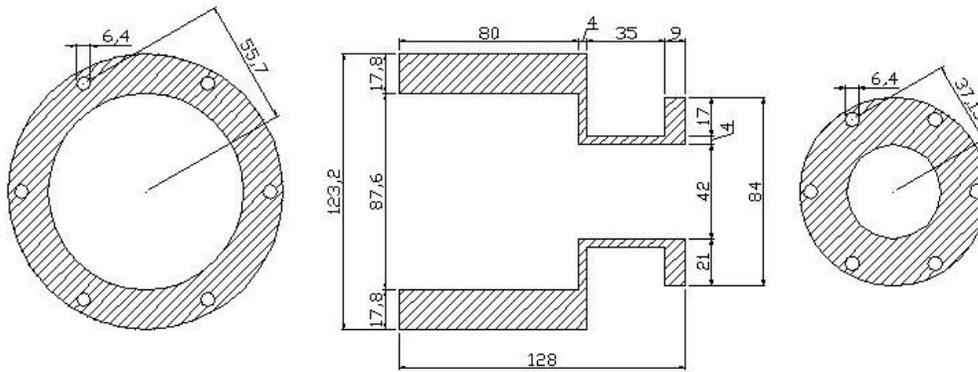


Figura 2.5 – Flange do detector MCP, em vista superior, corte lateral e vista inferior. Valores das cotas em milímetros.

Este flange, como mostrado na figura 2.5, tem 12,8 cm de comprimento, dos quais 8,3 cm têm 11,5 cm de diâmetro interno, para acomodar a MCP. O comprimento restante do flange tem o mesmo tamanho da saída da câmara – 4,4 cm – para fazer a conexão com a mesma.

### 2.3 – O canhão de elétrons

O canhão de elétrons utilizado neste projeto consiste basicamente de um filamento de tungstênio dobrado em forma de V com dois terminais para aplicação de corrente elétrica, de um cilindro formado por cinco anéis de aceleração isolados por separadores de cerâmica e de dois pares perpendiculares de placas defletoras no interior do primeiro anel de aceleração, para defletir o feixe, de modo a fazê-lo passar pelo centro da sua saída, diminuindo seu espalhamento e conseqüentemente melhorando sua focalização.

O filamento de tungstênio é preso na extremidade do canhão em uma pequena peça circular isolante de 1 cm de diâmetro, com 2 *feed-throughs*. Cada extremidade do filamento é então soldada às partes internas dos mesmos, enquanto as partes externas funcionam como terminais elétricos para aplicação de corrente, que irá aquecer o filamento à temperatura de 2500°C, ideal para a emissão termiônica [30]. A parte central do filamento é dobrada em forma de V, com a ponta apontando para a saída do canhão. Esta descontinuidade aumenta a resistência, favorecendo a emissão termiônica de elétrons neste ponto do filamento [31].

Ao filamento em questão pode-se aplicar uma corrente de até 2,5 A, com uma voltagem de 2 V, valor a partir do qual o seu tempo de vida decresce rapidamente. Diferentes tensões, com potenciais mais positivos do que o início do canhão e, conseqüentemente, do filamento, podem então ser aplicadas para atrair os elétrons para a saída do canhão, acelerando-os no processo. Com isso, os elétrons saem do canhão com energia equivalente à diferença de potencial total entre o início do canhão e a saída dele.

Entretanto, como os elétrons podem ser emitidos pelo filamento em qualquer direção, dentro do primeiro anel, e isolado do mesmo por espaçadores de cerâmica, foram colocadas quatro placas defletoras, com cada par (um na vertical e outro na horizontal) podendo receber voltagem separadamente. Isso tende a focalizar e centralizar melhor o feixe de elétrons a ser emitido pelo canhão.

Na saída do canhão é preso ainda o fundo de um cilindro de alumínio (com um furo no centro por onde sai o feixe) que reveste (sem contato, naturalmente) todo o restante do canhão. Para evitar que campos espúrios (p.ex. o campo magnético da Terra) exerçam influência significativa no feixe dentro do canhão, todo ele é envolto em uma folha grossa de  $\mu$ -metal.<sup>1</sup>

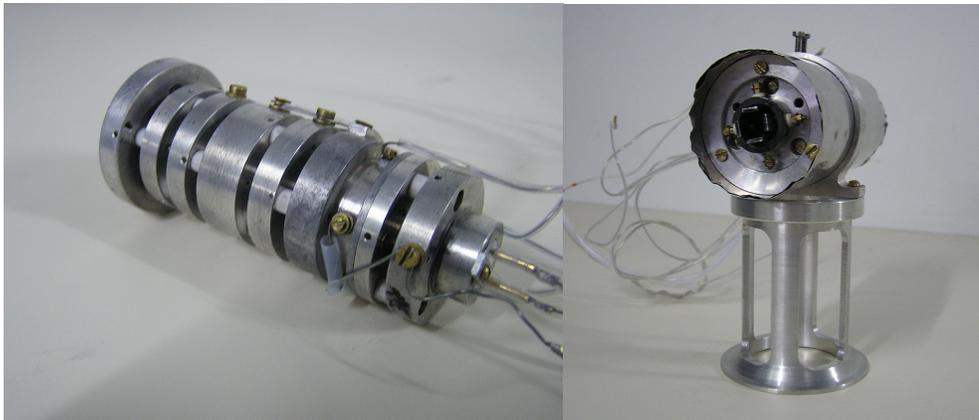


Figura 2.6 – Canhão de elétrons. A foto da esquerda mostra o canhão aberto, possibilitando a observação dos anéis de aceleração, isolados uns dos outros, e os terminais do filamento de tungstênio. Na foto direita, o canhão encontra-se fechado, envolto na folha de  $\mu$ -metal e preso ao seu suporte.

Foi construído, também, um suporte para o canhão, fixando sua saída, de 1 mm de diâmetro, à altura de 10,5 cm, coincidindo com o centro das saídas da câmara. Os fios que levam tensão às placas defletoras se conectam aos *feed-throughs* da saída 4, enquanto os demais fios do controle do canhão operam pelos

<sup>1</sup>  $\mu$ -metal é uma folha de níquel-ferro muito eficiente para blindagem magnética, utilizada desde em experimentos com elétrons de baixa energia a aparelhos de magnetocardiogramas.

da saída 3. Uma imagem do canhão pode ser vista na figura 2.6, enquanto sua esquematização ilustrativa pode ser vista na figura 2.7.

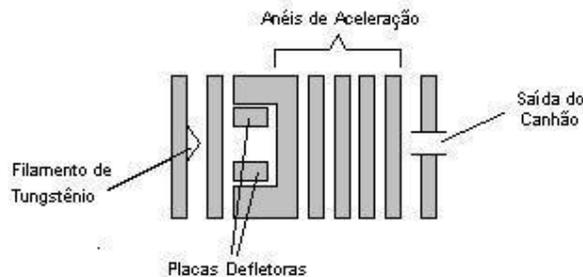


Figura 2.7 – Esquema do canhão de elétrons.

## 2.4 – A eletrônica de controle do canhão de elétrons

Para o correto funcionamento do canhão foi necessário projetar e construir uma eletrônica de controle. Com a ajuda do técnico do nosso grupo, foi realizado um projeto para a montagem de um circuito eletrônico dedicado que permitisse ao canhão ser operado externamente.

A eletrônica de controle do canhão de elétrons foi montada para ajustar as tensões dos anéis de aceleração e das placas defletoras e controlar a corrente e voltagem no filamento. Sua entrada é de 110 V, que alimenta dois transformadores na caixa. O primeiro dos transformadores é utilizado para controlar a corrente no filamento, enquanto o outro ajusta as diversas voltagens no canhão. Uma chave geral, com um LED sinalizador, liga ou desliga a alimentação da caixa. Um diagrama completo do circuito se encontra na figura 2.8.

O primeiro transformador é precedido por um circuito controlador. O circuito consiste basicamente de um triac e um potenciômetro, que permite variar a alimentação do transformador, que pode gerar uma corrente de até 2,2 A (suficiente para a emissão termiônica, mas não tão alta a ponto de reduzir significativamente o tempo de vida do filamento). Diodos entre o transformador e o filamento limitam a voltagem deste último em 2 V.

O segundo transformador tem duas saídas: uma de 10 V e outra de 400 V. A primeira delas é dividida em uma placa de circuito em duas linhas, uma de +5 V e outra de -5 V. Dois potenciômetros posicionados ao final das linhas as ligam

entre si e às saídas para os pares de placas defletoras. Cada potenciômetro, portanto, regula a voltagem em um par de placas defletoras entre -5 e +5 V.

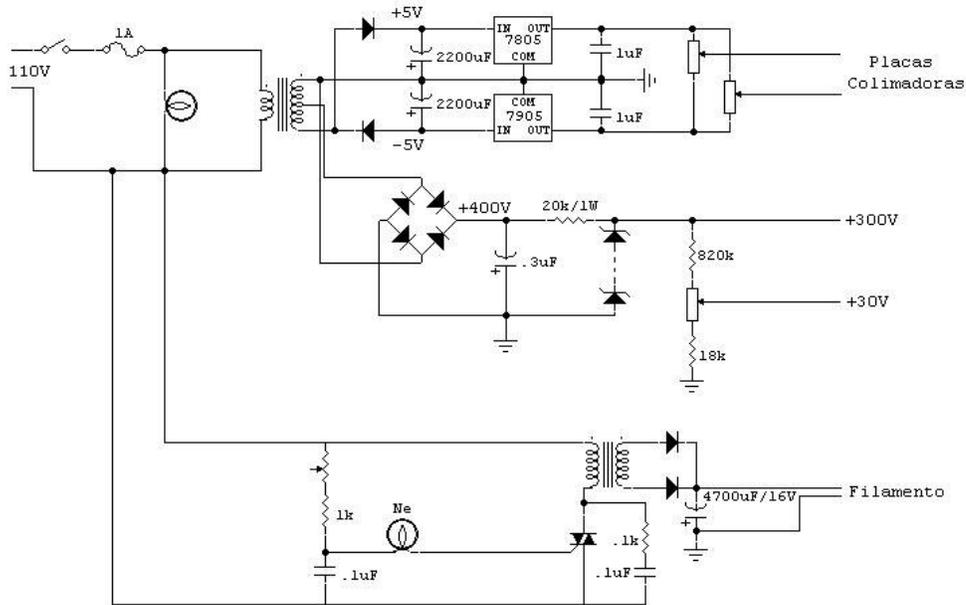


Figura 2.8 – Circuito responsável pelo controle geral do canhão de elétrons.

A segunda saída do transformador é responsável pelo controle dos anéis de aceleração. O circuito pode ser visto com detalhes na figura 2.8, mas funciona basicamente com oito diodos Zener em série fixando a voltagem em 300 V, que é levada diretamente ao terceiro e central anel de aceleração do canhão. Experimentos anteriores [31] confirmam que uma diferença de potencial de 300 V entre o filamento e o anel central de aceleração é a ideal para este canhão.

Além disso, desta saída é desviada uma outra de 30 V (mediante um resistor de 820 k $\Omega$ ) com um potenciômetro, sendo esta ligada aos dois primeiros anéis de aceleração do canhão. Com isto, pode-se variar a voltagem nos dois primeiros anéis entre 0 e +30 V, para diminuir ou aumentar a taxa com que elétrons são "arrancados" do filamento.

Entretanto, a montagem original do canhão, que consistia em manter o filamento aterrado e aplicar voltagens positivas com os valores mencionados acima nos anéis e placas defletoras, continha três problemas intrínsecos de difícil resolução, percebidos ainda durante o processo de montagem: 1) A saída do canhão estaria aterrada, uma vez que o cilindro externo e a folha de  $\mu$ -metal estariam em contato com o suporte, que por sua vez estaria apoiado na base da

câmara; 2) ainda que fosse aplicada uma tensão à saída do canhão e ele fosse isolado da folha de  $\mu$ -metal e do suporte, a superfície do detector MCP também é aterrada, e a diferença de potencial teria sentido contrário ao desejado, freando os elétrons; 3) só poderíamos realizar medidas com amostras exatamente perpendiculares à direção do feixe, sob o risco de gerar campos deformados no interior da câmara, caso o porta amostras (que, além disso, ainda deveria ter a mesma tensão da saída do canhão aplicada a ele) fosse submetido a um ângulo em relação ao feixe.

Para resolver estes problemas, um transformador de isolamento foi incluído entre a entrada da caixa de controle e a rede elétrica externa. Este transformador tem como função, quando ligado às partes aterradas da caixa, levantar o valor do terra de 0 V para um valor de tensão fornecido, e seu isolamento suporta uma tensão de até  $\pm 400$  V. Foi utilizada, então, uma fonte de tensão externa para levantar o terra do canhão para o valor de trabalho de -380 V. Com isso, o filamento passa a estar em -380 V e todos os anéis de aceleração e placas defletoras ficam à diferença de potencial especificada acima, com o terra (real) da saída do canhão como a maior delas. Conseqüentemente, a maior energia que um elétron pode atingir ao sair do canhão é de 400 eV, e uma vez que não há campos eletromagnéticos espúrios no interior da câmara, ele manterá essa energia enquanto viajar dentro dela.

## 2.5 – Os copos de Faraday

Para a medida da corrente gerada pelo feixe de elétrons, foram montados ainda três copos de Faraday (a razão para isso será discutida com detalhes no Capítulo 4).

Os suportes dos copos de Faraday, idênticos entre si, têm formato de um T invertido, sendo que a base mede 7,6 cm e a placa transversal mede 12,5 cm de comprimento. Ambas são feitas de alumínio medem 6,0 cm de largura e 1,5 mm de espessura. A placa transversal tem um furo de 0,5 cm de diâmetro à altura de 10,5 cm, alinhado com a saída do canhão (e conseqüentemente com o feixe de elétrons).

O copo em si possui 1,7 cm de diâmetro e 2,3 cm de profundidade. Suas paredes têm 1,0 mm, enquanto sua base mede 1,5 mm de espessura. A base do

copo possui um furo de 2,4 mm de diâmetro em seu centro, para permitir a passagem do parafuso que o prende no suporte e leva a informação da corrente para o fio. O parafuso mede 1,4 cm de comprimento, o suficiente para atravessar, nesta ordem: a base do copo de Faraday, o isolante de cerâmica (junto com o qual o parafuso passa pelo suporte), uma arruela isolante, uma arruela metálica, o fio e a porca que o prende (ver figura 2.9).

A medida de corrente necessária ao trabalho seria uma medida relativa de corrente elétrica, e por isso não houve uma preocupação maior com o efeito que possíveis elétrons secundários produzidos no interior do copo, ou ainda elétrons que saíssem do mesmo, poderiam causar.. No entanto, para uma medida absoluta da mesma, seria importante manter uma relação de um fator 10 entre o comprimento do copo e o seu diâmetro, ou ainda incluir anéis de guarda na entrada do copo, a um pequeno potencial, para impedir que este tipo de contagens espúrias mascarem a medida realizada.

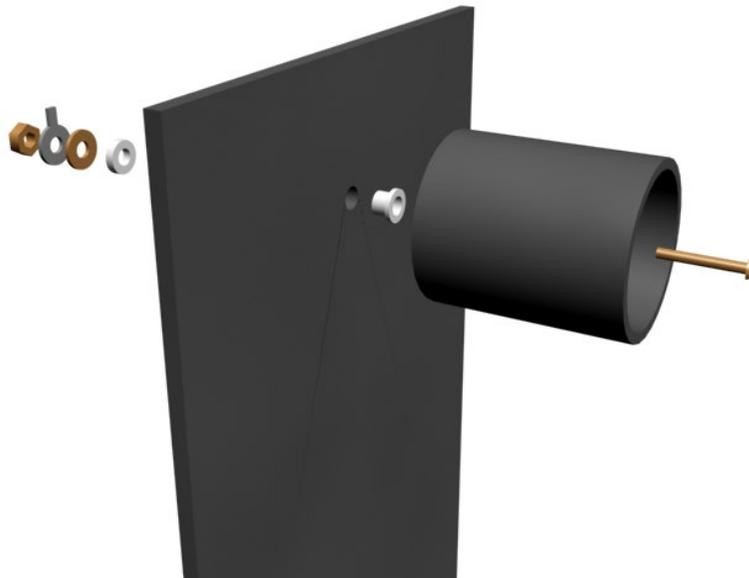


Figura 2.9 – Representação ilustrativa da montagem do copo de Faraday.

O fio leva a um *feed-through* que é conectado a um picoamperímetro (modelo 614 Electrometer, da Keithley) de resolução de 0,1 pA, onde é medida a corrente detectada no copo. O picoamperímetro tem uma resistência de  $\sim 10^{10} \Omega$ ; como a resistência de isolamento do copo de Faraday é ordens de grandeza

superior ( $> 2 \times 10^{11} \Omega$  – fundo de escala do medidor utilizado), não há risco de ter fuga de corrente elétrica do copo para o terra.

## 2.6 - A bobina de Helmholtz

Para o sucesso deste projeto, foi necessário também construir um sistema de deflexão do feixe, por três motivos, a saber: 1) confirmar a energia do feixe; 2) ter melhor controle sobre o feixe no interior da câmara, podendo desviá-lo, por exemplo, do copo de Faraday para a amostra a ser irradiada, tendo antes uma medida da corrente do feixe; e 3) separar o feixe de elétrons do ponto luminoso correspondente ao filamento. De fato, como o canhão de elétrons possui um filamento que é aquecido a  $2500^{\circ}\text{C}$ , acendendo tal qual uma lâmpada, ele emite luz como um corpo negro, e essa luz pode ser vista diretamente à frente do mesmo; esses fótons poderiam influir diretamente na irradiação das amostras e na detecção de fótons emitidos por elas, por isso a necessidade de separar os fótons do feixe de elétrons. Para tanto, foi montada uma bobina de Helmholtz, que consiste em dois "carretéis" paralelos. Os fios destes carretéis são na verdade espiras, as quais geram um campo magnético, transversal a elas, que deflete o feixe de elétrons (ver foto na figura 2.10).

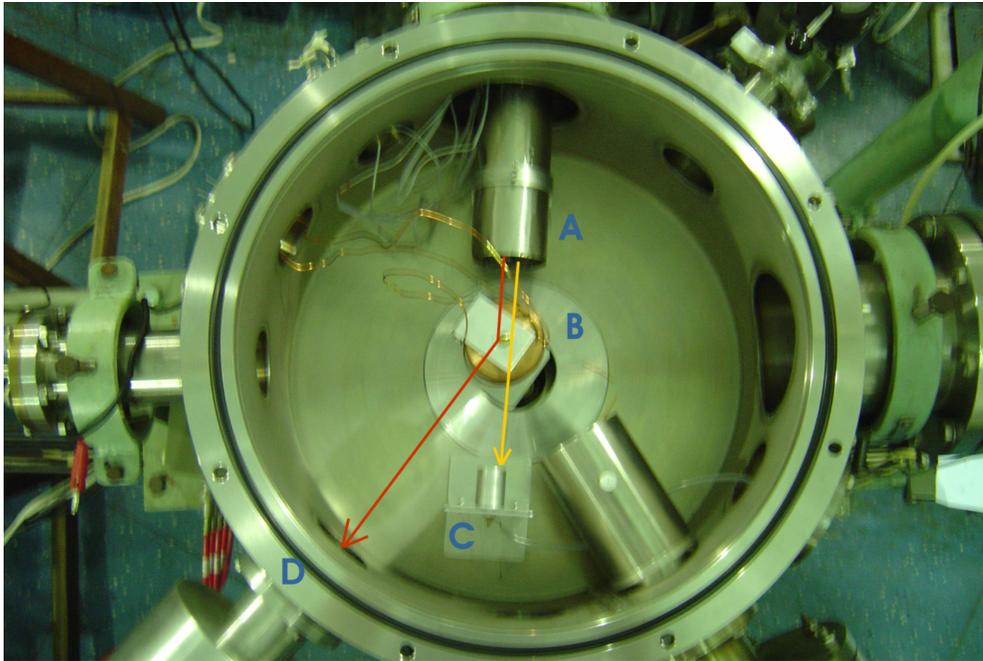


Figura 2.10 – Foto da câmara de trabalho. Pode-se observar o canhão de elétrons (A), a bobina defletora (B), o copo de Faraday (C) e o flange que contém o detector MCP (D). Em vermelho é indicado um possível trajeto para o feixe de elétrons defletido. Em amarelo é indicada a trajetória fixa da luz emitida pelo filamento. Convém frisar que a trajetória dos elétrons do canhão até a bobina é sempre a mesma – as duas ilustradas acima estão separadas apenas para facilitar a visualização.

O ideal para a câmara utilizada seria uma bobina com aproximadamente 5 cm de comprimento, devido ao espaço disponível em seu interior. Desviar o feixe de elétrons de 45°, por exemplo, implicaria em um deslocamento lateral ( $y$ ) de 2 cm, considerando a bobina com 5 cm de diâmetro e aproximando o campo magnético da bobina como atuante todo em seu centro. O campo necessário, derivado diretamente da segunda lei de Newton e da força de Lorentz (ver capítulo 4) pode ser expresso pela equação:

$$B = \frac{2ymv}{qx^2},$$

onde  $m$  é a massa do elétron,  $v$  é a sua velocidade ( $11,5 \times 10^6$  m/s para um feixe de 375 eV),  $q$  é a sua carga e  $x$  é o deslocamento longitudinal dentro da bobina (aproximadamente 4 cm). Substituindo os valores correspondentes, encontra-se  $B = 16,4$  G.

O campo magnético gerado por uma bobina de Helmholtz obedece à equação [32]:

$$B = \frac{32\pi N}{5^{3/2} a} \frac{I}{10},$$

onde  $B$  é o campo magnético gerado em Gauss,  $N$  é o número de espiras,  $a$  é o raio da bobina em cm e  $I$  é a corrente que passa pelo fio da espira em A. Empregando os valores conhecidos, a equação resultante fica  $N I = 44$ . Para 40 espiras, portanto, seria necessária uma corrente de 1,1 A.

O fio escolhido para fazer as espiras foi o AWG18 esmaltado, que tem diâmetro de 1,024 mm, resistência de 20,73  $\Omega$ /km (como são necessários apenas 13 m de fio para enrolar as duas bobinas, a resistência é baixa o suficiente) e corrente máxima de 2,5 A (como o caso mais extremo para o qual a bobina será utilizada é o ângulo de 90°, que requer 2,2 A segundo os cálculos acima, este valor é mais do que suficiente).

A figura 2.11 mostra o desenho de um carretel da bobina. Os carretéis foram feitos de cobre, por ser um material diamagnético. Cada carretel possui, em uma de suas faces, dois pequenos furos que servem para a entrada e a saída do fio.

Como a separação entre os carretéis deve ser equivalente ao raio médio da espira [32], um suporte de alumínio foi feito para manter os carretéis a uma distância de 14 mm entre eles, separando os centros dos carretéis de 21 mm – o raio médio da bobina é de 20 mm, e fixando o centro do espaçamento entre as bobinas em 10,5 cm.

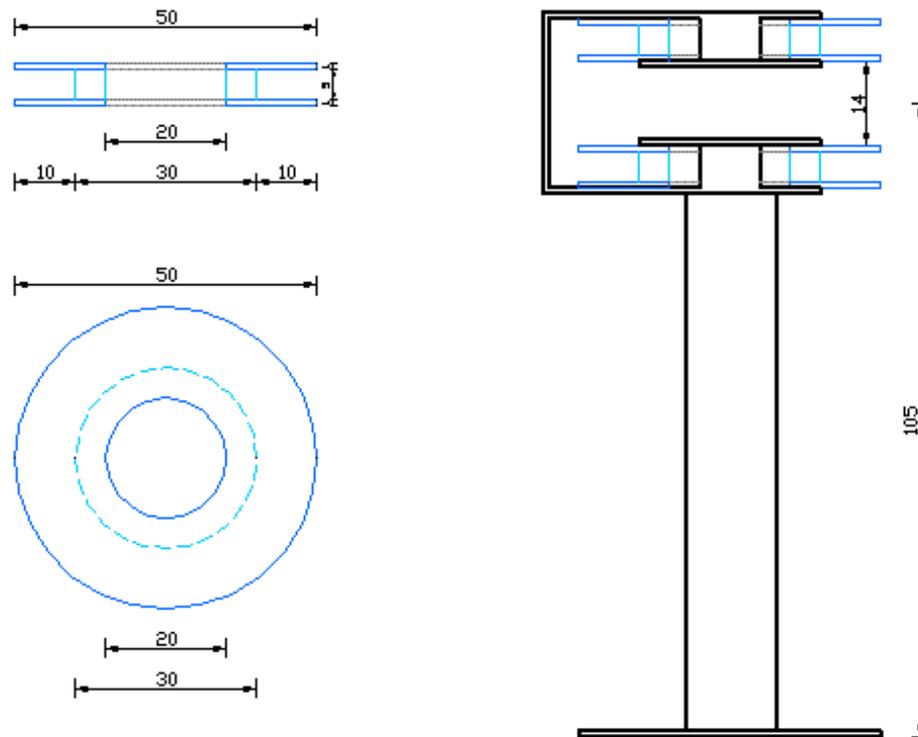


Figura 2.11 – À esquerda, a bobina de Helmholtz, em corte lateral e vista superior; à direita, ilustração do suporte da mesma. Valores das cotas em milímetros.

Entretanto, como o fio adquirido tinha um diâmetro ligeiramente maior do especificado, devido ao esmalte, a bobina ficou com um raio médio maior do que o planejado e, conseqüentemente, a separação entre os carretéis menor do que deveria. Isso acarretou uma pequena diferença entre o campo medido experimentalmente e o calculado acima, como pode ser visto no capítulo 4.

As extremidades do fio da bobina são levadas a dois *feed-throughs*, e suas saídas são conectadas a uma fonte de corrente de até 3 A, suficiente para o experimento, uma vez que a corrente máxima suportada pelo fio é de 2.5 A.

O campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz foi medido externamente à câmara utilizando-se um Gaussímetro Modelo 9500 da F.W. Bell. Estes resultados estão expostos no capítulo 4.

## 2.7 – O porta-amostras e o colimador

O porta-amostras foi fabricado de forma semelhante aos copos de Faraday, com a diferença que o seu furo tem 1,6 cm de diâmetro. A amostra é presa a uma das faces com fita metálica bi-adesiva, para que a face da amostra fique em

contato elétrico com o porta-amostras, aterrando a mesma (esta fita é a mesma utilizada para medidas no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV). Na outra face do porta-amostras, foi presa uma grade de alumínio, a fim de descarregar a superfície da amostra (geralmente isolante), com a distância de 1,5 mm (a espessura do porta-amostras) entre ela e a amostra.

Já o colimador seguiu o mesmo projeto dos suportes dos copos de Faraday. A única diferença é que, ao invés de se prender o copo da forma indicada acima, foi presa uma grade, isolada eletricamente, na qual aplica-se uma potência de 20V, para impedir que possíveis elétrons espalhados interfiram na medida, chegando à MCP. Por isso, o colimador é sempre colocado junto à saída na qual está a MCP, bloqueando-a por completo, à exceção do seu furo.