

F_809: Instrumentação para Ensino
2º semestre de 2005

Relatório Final
(Versão 1 – 27/11/2005)

Válvula Eletrônica para Medida de e/m



Aluno: Marcelo Moreira Xavier

Orientador: Prof. Dr. Yoshikazo E. Nagai

Coordenador: Prof. Dr. José J. Lunazzi

Índice

Introdução	3
Tratamento Teórico	4
Construção da Válvula	8
Medidas Experimentais	13
Análise dos Resultados e Conclusões	17
Anexos	20
Bibliografia	25

Introdução

A verificação do valor da razão e/m é histórica e atualmente importante para a física moderna. Muitos resultados importantes a respeito do átomo foram obtidos a partir dessa relação que primeiro foi medida por J.J. Thomson empregando um tubo de raios catódicos. Muitas outras tentativas diversas foram feitas para determinar esse valor chamado de carga específica. O método que nos atemos aqui é o do magnetron (ainda usado em muitos fornos de microondas) que foi idealizado por A. W. Hull.

O método do magnetron basea-se no funcionamento de uma válvula termiônica (ou diodo), que apesar de hoje estar em grande parte substituída pelo transistor, ainda é usada em rádios por radioamadores que alegam um som mais fiel, e também usada em aparelhos hospitalares usando novos materiais como grafite e ligas cerâmicas de alta resistência mecânica e térmica. Em linhas gerais, o funcionamento da válvula consiste num filamento dentro de um bulbo com vácuo que libera elétrons quando aquecido. Um potencial acelera esses elétrons que são coletados por um anodo gerando assim uma corrente que pode ser medida por um circuito.

Em tentativas anteriores foi usada uma válvula comercial, do fabricante RCA, porém o sucesso do experimento foi afetado pela construção da válvula que não permitiu medidas experimentais confiáveis. Diante desse problema, o atual experimento visa inicialmente construir um diodo com os parâmetros que maximizem o efeito desejado e permita uma precisa medição da relação e/m . Tendo a válvula funcionando de forma satisfatória, poderemos então medir a histórica relação.

Tratamento Teórico

O princípio de funcionamento da válvula eletrônica usada é baseado no efeito termiônico. Esse efeito foi primeiramente observado no séc. 18 por Charles Dufay que verificou a condutibilidade elétrica de um gás quando próximo a um metal aquecido. Posteriores a ele vieram Edmund Bequerel, que verificou a condutibilidade de ar quente entre eletrodos de platina também quente sob um potencial elétrico, e Thomas A. Edson que observou a emissão de elétrons por metais aquecidos.

O fenômeno pode ser definido como a emissão de elétrons pela superfície de um metal quando aquecido. Os elétrons, em movimento desordenado dentro do metal, quando chegam na superfície são mantidos presos pelo potencial criado pelos átomos da superfície do metal. Quando aquecemos o metal, os elétrons passam a ter a energia necessária para vencer esse potencial e escapam, formando uma nuvem ao redor do metal devido a atração coulombiana com o metal, que agora está carregado positivamente.

Se aproximarmos um coletor do metal aquecido e entre os dois elementos estabelecermos um potencial acelerador, teremos uma corrente termiônica que pode ser calculada usando alguns parâmetros pertinentes ao aparato do experimento.

Corrente Termiônica na Válvula Eletrônica

O estudo da corrente termiônica é normalmente feito em válvulas, ou diodos, que são compostas de dois eletrodos imersos no vácuo feito com a ajuda de um bulbo de vidro. Temos então um dos eletrodos como um filamento (catodo) que quando aquecido sobre o efeito termiônico e ao estabelecermos um potencial entre este e o outro eletrodo, que tem formato cilíndrico ao redor do filamento (anodo), ocorre a corrente termiônica que pode ser medida externamente.

Para desenvolver uma expressão que nos forneça o valor da corrente termiônica consideremos um elétron nas proximidades da separação metal-vácuo que existe no catodo. Nessa situação o elétron fica confinado ao metal por um potencial que representa a energia cinética total que um elétron deve ter para vencer a barreira e ganhar o vácuo. Essa energia é

chamada de função trabalho Φ do metal. A densidade de corrente entre os eletrodos depende diretamente dessa grandeza assim como da temperatura em que se encontra o filamento. Podemos expressar essas dependências por meio do resultado conhecido como expressão de Richard-Dushman

$$J_0 = \frac{4\pi m e k_B^2}{h^3} (1 - r_e) T^2 e^{-\frac{\Phi}{k_B T}} \text{ (A/m}^2\text{)}$$

Onde m é a massa do elétron, e sua carga, h a constante de Plank, T a temperatura em Kelvin, k_B a constante de Boltzman e Φ é a função trabalho do material

Fazendo $r_e = 0$ nas proximidades do filamento e reduzindo as constantes temos:

$$J_0 = AT^2 e^{-\frac{\Phi}{k_B T}} \text{ (A/m}^2\text{)} \left(A = \frac{4\pi m e k_B^2}{h^3} \right)$$

Onde $A = 120,4 \times 10^4 \text{ A/m}^2$. Essa é a expressão que calcula a densidade de corrente sem um potencial acelerador e sem correções de carga no espaço entre os eletrodos.

Apesar de simples, a expressão é muito difícil de ser calculada com precisão devido as características do material. Um exemplo é que a emissão depende plano cristalográfico de origem do metal, que afeta a função trabalho usada as expressão de Richard-Dushman. Como atenuação desse fator de imprecisão, usa-se uma função média. No fio de tungstênio, esse valor é dado por $\Phi = 4,52 \text{ eV}$

Porém, para efetivar uma corrente mensurável entre os eletrodos, é necessário um potencial que acelere os elétrons em direção ao anodo. Numa situação onde esse potencial é alto, a densidade de corrente depende essencialmente da temperatura do filamento. Dizemos que o diodo encontra-se saturado e a expressão fica é dada por

$$J = J_0 \exp\left(\frac{\gamma \sqrt{E_Z}}{k_B T}\right) \text{ (A/m}^2\text{)} \text{ com } \gamma = \sqrt{\frac{3}{4\pi\epsilon_0}}$$

Na expressão, E_z é o campo acelerador e ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo. Para potenciais menores que o de saturação do diodo, devemos considerar o efeito do potencial de frenagem criado pelos elétrons residentes entre os dois eletrodos. Nessas condições, estamos interessados numa expressão que forneça a corrente entre os eletrodos em função da voltagem aplicada. Esse resultado é conhecido Lei de Child e expresso por

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0}{9r_a} l \sqrt{\frac{2e}{m}} V_0^{3/2} \text{ (A)}$$

Na expressão, r_a é o raio do anodo, l o comprimento do filamento e V_0 a tensão aplicada entre os eletrodos para acelerar os elétrons. É notável que a Lei de Child expressa a corrente termiônica em função da geometria do diodo dentro do regime onde a carga no espaço limita a corrente, ou seja, a proporcionalidade entre I e $V_0^{3/2}$ depende dos parâmetros de construção da válvula.

Método do Magnétron

O método do magnétron consiste na aplicação de um campo magnético vertical e paralelo ao eixo longitudinal do coletor. A aplicação do campo acaba gerando uma força que é aplicada perpendicularmente à direção de propagação do elétron. Sem a aplicação de um campo magnético o elétron segue a trajetória descrita pela seta retilínea na **Figura 1a** abaixo.

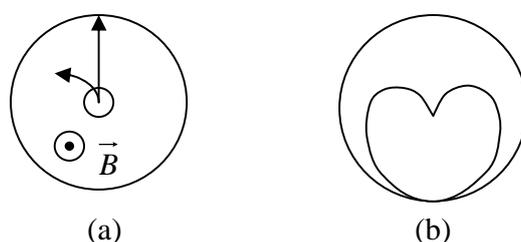


Figura 1 – filamento e coletor vistos de cima. Em (a) é mostrada a trajetória dos elétrons sob um campo magnético paralelo ao eixo longitudinal. Em (b) a trajetória quando o campo crítico é atingido.

Porém, quando fixamos o potencial em V_0 e a corrente no filamento e aplicamos um campo magnético \vec{B} , temos a trajetória descrita pela seta curva ainda na **Figura 1a**. Quando atingimos um campo magnético crítico, os elétrons conseguem alcançar o coletor e seguem a trajetória descrita na **Figura 1b**.

Se considerarmos B_0 o valor do campo quando os elétrons não conseguem alcançar o coletor, temos a seguinte relação deduzida pelo livro Preston (1) a partir da força de Lorentz $\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ aplicada ao elétron e resolvida por meio de equações diferenciais em coordenadas cilíndricas.

$$V_0 = \frac{B_0^2 r_a^2}{8} \left(\frac{e}{m} \right)$$

Onde V_0 é o potencial fixo no coletor, B_0 o campo magnético crítico para o qual ocorre o corte da corrente no coletor, e e m são respectivamente a carga e a massa e r_a o raio do coletor. Toda a produção experimental visou proporcionar condições para que essa expressão fosse utilizada para a determinação do valor da relação e/m que tem o seguinte valor teórico

$$\frac{e}{m} = 1,76 \times 10^{11} \frac{C}{Kg}$$

Construção da Válvula

Como é de conhecimento desde o início do projeto, a construção da válvula é um dos pontos mais crítico de todo o projeto. Diferentemente de outros trabalhos desenvolvidos, onde são usados diodos comerciais, o projeto em questão propôs a construção de uma válvula eletrônica destinada exclusivamente para a medição de e/m. A **Figura 2** mostra esquema.

Ao longo do semestre foram construídas algumas válvulas, que seguiram as mesmas etapas de construção do diodo discutido no relatório parcial, em anexo. Porém apenas a última foi capaz de fornecer dados mensuráveis. Todas as outras válvulas esbarraram em detalhes de montagem que inviabilizaram as medidas. O principal ponto foi a solda dos vidros que se tornou difícil por estarmos trabalhando com vidros de lâmpadas comerciais, de baixa qualidade. Precisávamos soldar o vidro de maneira que o calor em toda a borda da solda fosse uniforme, se não o vidro trincaria por dilatação ou derreteria demais deformando o resultado final.

Quando ao filamento e ao coletor, ambos foram bem alongados, com seu comprimento praticamente dobrado. Dessa forma conseguimos que a corrente medida ficasse maior e melhor mensurável. As medidas finais ficaram por 80mm de comprimento e 30mm de diâmetro para o coletor e 56mm de comprimento e 0,2mm de diâmetro para o filamento. Outro detalhe era o perfeito alinhamento do filamento no eixo longitudinal coletor. A teoria usada depende fortemente desse acerto, e do campo magnético aplicado que deveria estar perfeitamente paralelo a este.

Ainda com relação ao filamento, feito de tungstênio, foi mantido linear. Porém, seu aquecimento e dilatação certamente fariam com que o filamento de curvasse, prejudicando a simetria. Dessa forma foi adaptado um esticador em espiral, para manter o filamento retilíneo. A **Foto 1** mostra, com pouco foco (não dispunha de função macro na câmera) o esticador. Na **Foto 2** é mostrada a base do diodo com o detalhe da solda. Após finalizada a construção ainda era necessário fazer vácuo na válvula e a dificuldade era vedar após atingida a pressão necessária. Felizmente esse passo não apresentou grandes problemas e a pressão atingida foi de $10^{-2} Torr$.

Abaixo, na seqüência de fotos, é mostrado o diodo pronto. Também é mostrado na **Foto 3** todo o aparato das medidas experimentais.

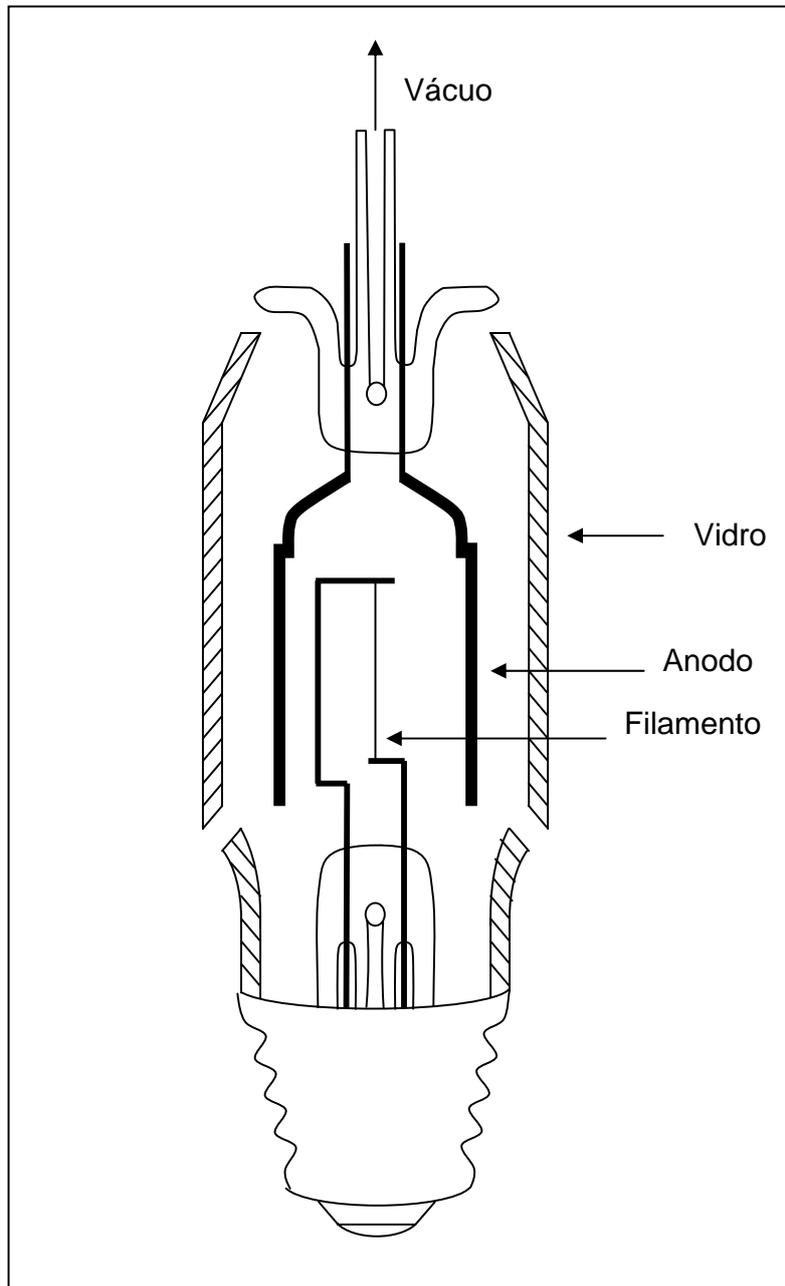
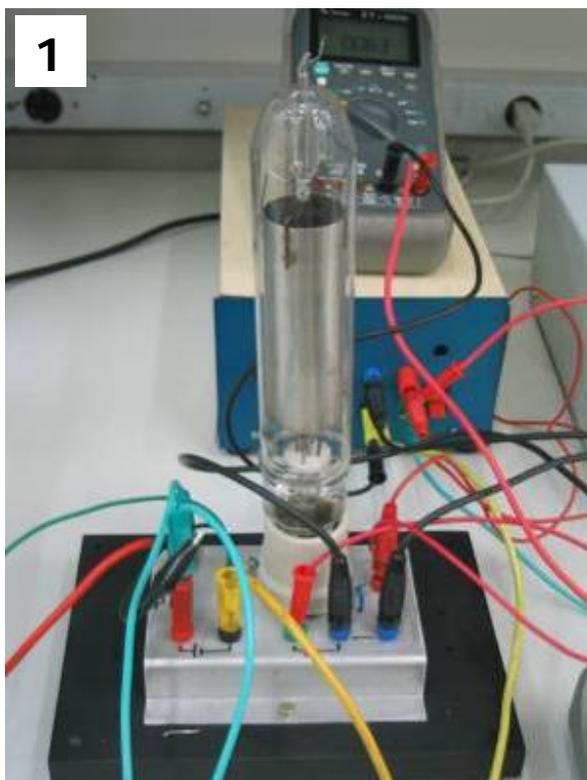
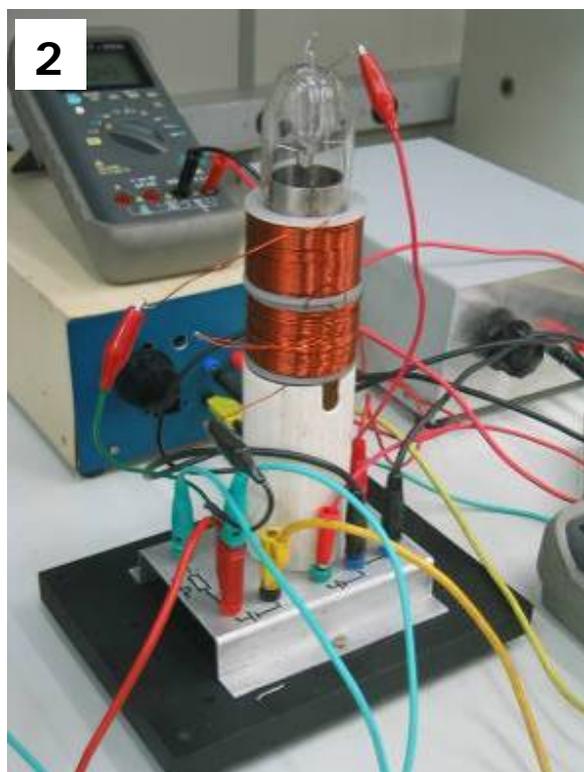


Figura 1 – Esquema do montagem do diodo projetado para medida de e/m



Diodo completo montado na base para a ligação nos aparelhos do laboratório (1). O diodo final, como dito, tem o coletor e o filamento mais longos para melhor corrente e melhor qualidade das medidas. Ao fundo está a fonte que gera a tensão de coleta dos elétrons entre o filamento e o coletor e o multímetro para acompanhar o valor da tensão



Para a medição de e/m , é necessário uma bobina solenóide (composta de duas bobinas) que gere o campo necessário para o corte de corrente. A foto mostra a bobina já montada (2) e devidamente ligada e abaixo está a foto da bobina solenóide depois de enrolada (3)





Foto 1 – Esticador do filamento feito de cobre.



Foto 2 – Detalhe da base do diodo, com a solda feita entre os vidros.

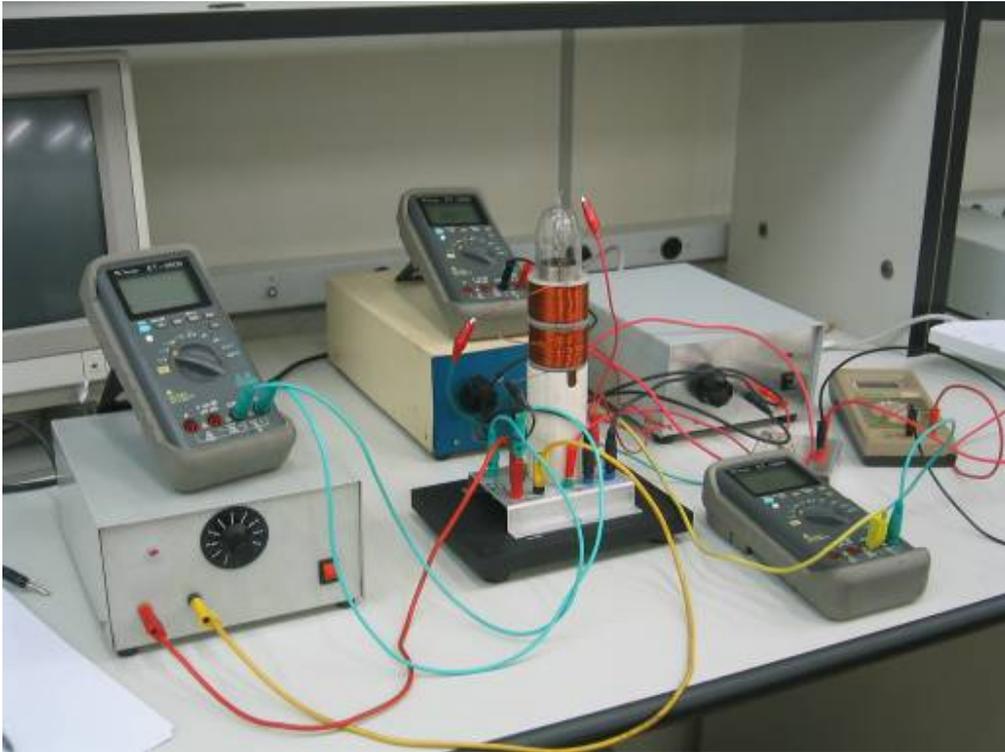
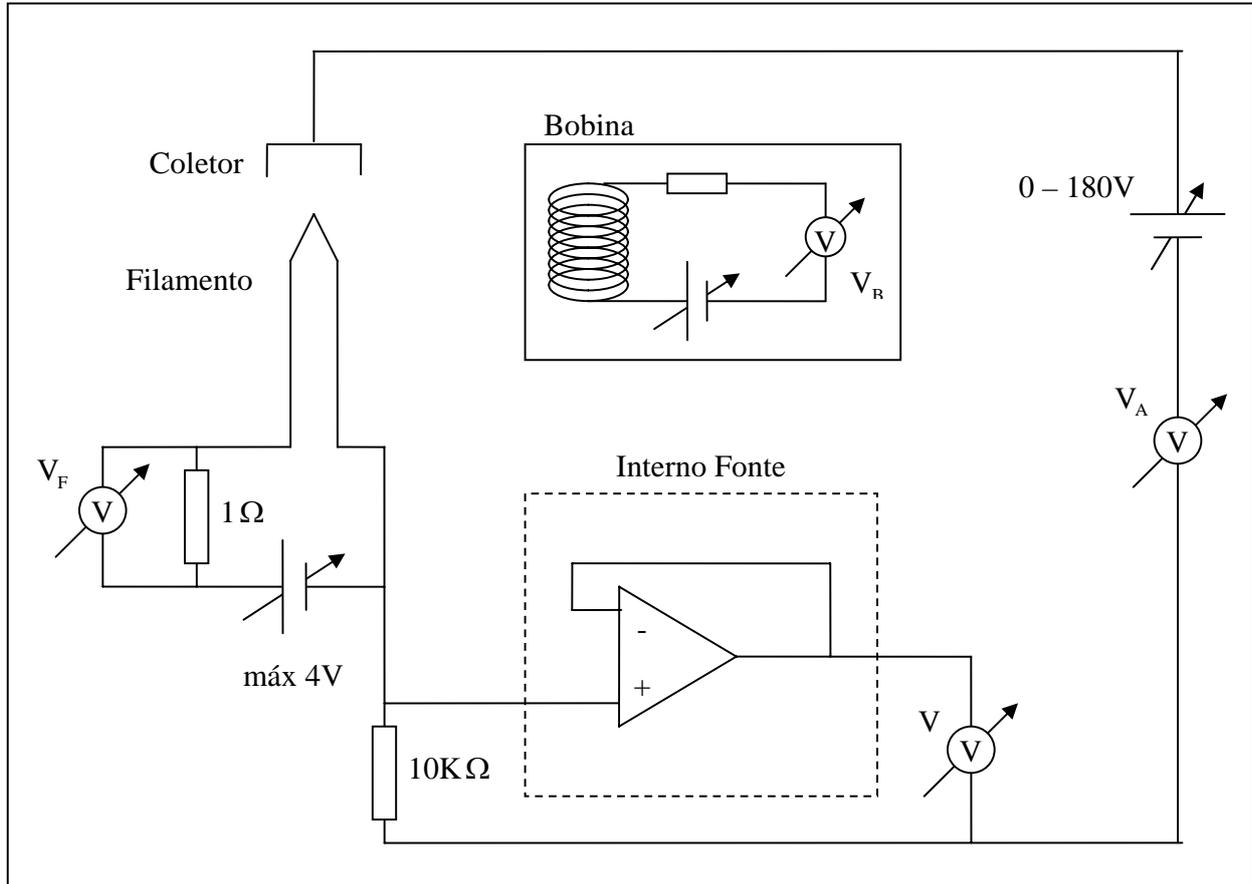


Foto 3 – Aparato para as medidas experimentais.

Medidas Experimentais

Para operar o diodo foi usado o circuito mostrado abaixo:



O circuito mostra o coletor e o filamento devidamente ligados. Ligado ao filamento temos uma fonte de tensão com faixa de operação de 0-4V e um resistor onde em paralelo encontrasse um voltmetro que mede V_F . Por ter resistência de 1Ω , a medida de V_F tem o mesmo valor de I_F , que é a corrente no filamento

Entre o filamento e o coletor temos outra fonte de tensão que fornece uma tensão de 0-180V e um voltmetro que mede a tensão V_A entre os elementos. Internamente a essa fonte temos um circuito indicado na figura que ligado a um resistor de $10k\Omega$ e um voltmetro que fornece a tensão V em seus terminais fornece também a medida de I que é a corrente termiônica em que estamos interessados.

Usando esses instrumentos fizemos inicialmente um primeiro conjunto de medidas visando antes de mais nada observar o efeito termiônico. Para essa tentativa não usamos a medida de corrente no filamento e sim a de tensão. A tabela mostra a corrente no coletor I (medida em $\times 10^{-7} \text{ A}$) para cada valor de tensão corrente no filamento V_F (medida em V) em função da tensão aplicada no coletor V_A (medida em V).

		$I (\times 10^{-7} \text{ A})$			
		1,18	2,00	2,47	3,00
V_A (V)	20,0	21	25	24	28
	40,4	23	26	26	29
	60,0	24	27	28	30
	80,2	26	28	29	31
	100,5	27	29	30	32
	120,0	29	30	31	34
	140,5	31	33	34	36
	160,5	34	36	38	60
	180,0	38	39	63	69

Tabela 1 – corrente no coletor em função do potencial e da corrente no filamento

Abaixo estão as curvas geradas com base na tabela

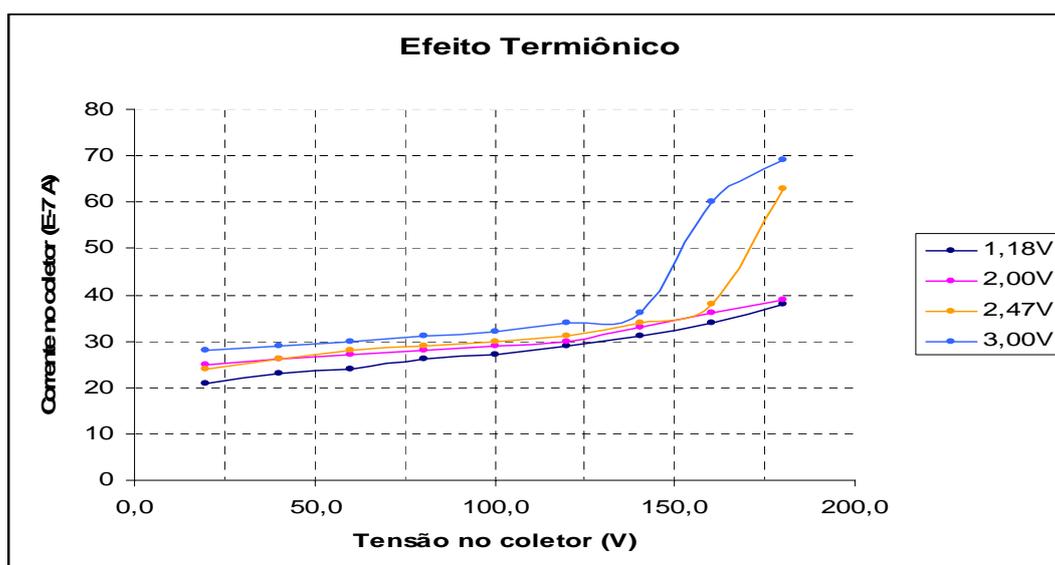


Gráfico 1 – Corrente no coletor em função da tensão no coletor

Na primeira tentativa também foram feitas medidas para calcular a relação e/m . Para uma tensão V_A de 20V e uma tensão no filamento V_F de 2V, foi medida a corrente na bobina I_B , que é proporcional ao campo magnético, e a corrente no coletor I

I_B	I
0,297	33,5
0,601	33,3
0,905	34,0
1,202	34,0
1,500	34,0
1,810	34,0
2,130	34,0
2,400	34,0
2,700	34,0
3,000	34,0

Tabela 3 – corrente no coletor em função da corrente na bobina para tensão no coletor de 20V

Devido a invariabilidade notada na corrente no coletor em função da corrente na bobina, buscamos alterar parâmetros de forma a buscar alterações. Essa análise é discutida no próximo item do relatório. Os dados das novas medidas para a relação e/m estão apresentados a seguir. Para essa nova tentativa tivemos que inserir no circuito um medidor para acompanhar a corrente no filamento e não a tensão como fazíamos antes. Dessa forma conseguimos os dados para a medida de e/m exibidos acima para a segunda tentativa.

I_B	I
0,148	183
0,361	180
0,607	178
0,853	147
1,073	144
1,266	140
1,445	133
1,629	126
1,864	118
2,047	103
2,285	98
2,552	90
2,666	88
2,839	83
2,985	79
3,063	77

Tabela 3 – corrente no coletor em função da corrente na bobina para tensão no coletor de 20,07V e uma corrente de 3,95A

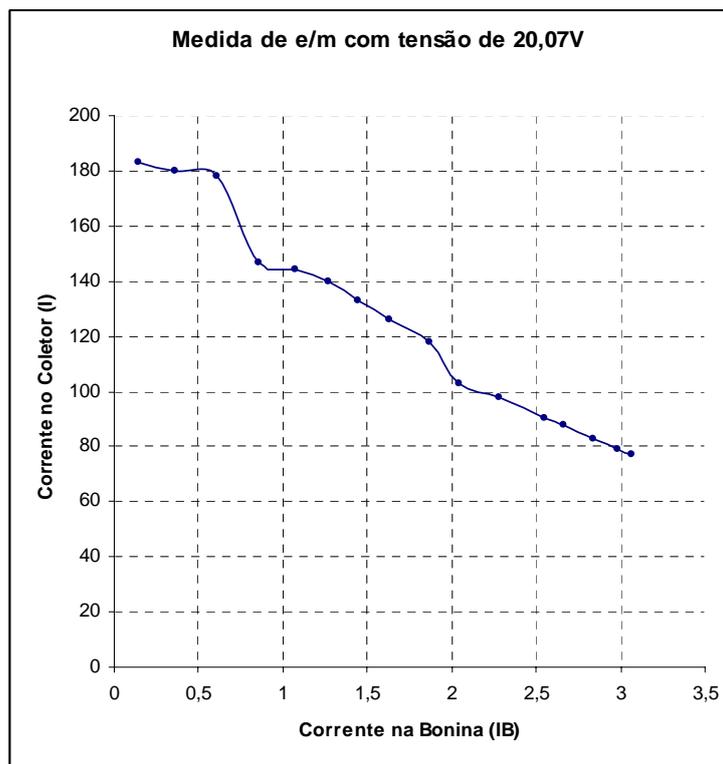


Gráfico 2 – Corrente no coletor em função da tensão no coletor

I_B	I
0,310	645
0,609	640
0,905	630
1,222	605
1,519	545
1,820	425
2,120	360
2,410	320
2,696	281
3,000	260

Tabela 4 – corrente no coletor em função da corrente na bobina para tensão no coletor de 40,39V e uma corrente 3,89A

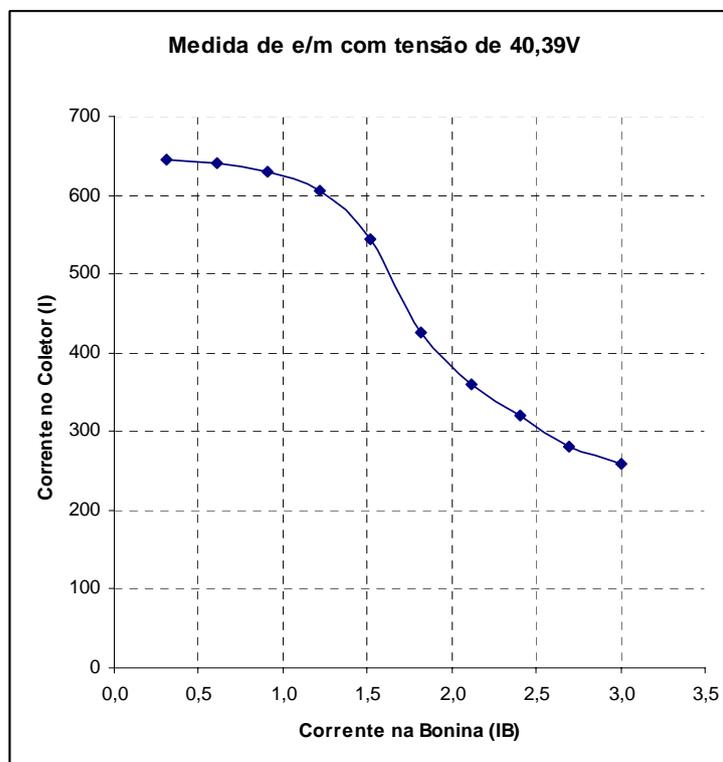


Gráfico 3 – Corrente no coletor em função da tensão no coletor

Análise dos Resultados e Conclusões

Analisando inicialmente os dados do efeito termiônico, verificamos que o diodo comporta-se bem uma vez que os dados geram curvas em conformidade com a teoria. Apesar de esperarmos chegar a um potencial onde houvesse uma saturação de corrente no coletor podemos considerar bons os resultados.

Porém as curvas para 2,37V e 3,00V de tensão no filamento há um salto de corrente do coletor para com altas tensões, o que não é previsto pela teoria. Olhando o tubo internamente durante a coleta de dados, notou-se uma luz azulada na base do coletor, bem diferente do amarelo avermelhado do filamento, o que nos leva a desconfiar de uma ionização do gás no tubo. Uma ionização gera mais cargas além das geradas pelo efeito termiônico aumentando a corrente medida no coletor.

Buscando a energia necessária para ionizar o ar, encontramos o seguinte valor: 13,61 eV para a primeira energia de ionização do oxigênio e 14,53eV para a primeira do nitrogênio que são os principais constituintes do ar. A energia teórica do elétron seria de aproximadamente 140eV ao ocorrer o efeito, porém existem as correções para a função trabalho do tungstênio e do espaço de carga criado em volta do filamento que reduz essa energia. Apesar de não possuir dados suficientes para um cálculo mais detalhado, acredita-se que realmente houve ionização no gás interno ao diodo.

A tabela 3 mostra os valores para a aplicação de um campo magnético paralelo ao filamento, condição para efetuar as medidas de e/m. Os dados mostram que nenhuma alteração é observada na corrente no coletor. Segundo A.W.Hull (2), deveríamos observar uma curvar com uma queda abrupta de corrente no coletor, quando os elétrons não conseguissem atingir o coletor. A curva gerada pelos dados teria o formato da curva A mostrada no gráfico abaixo:

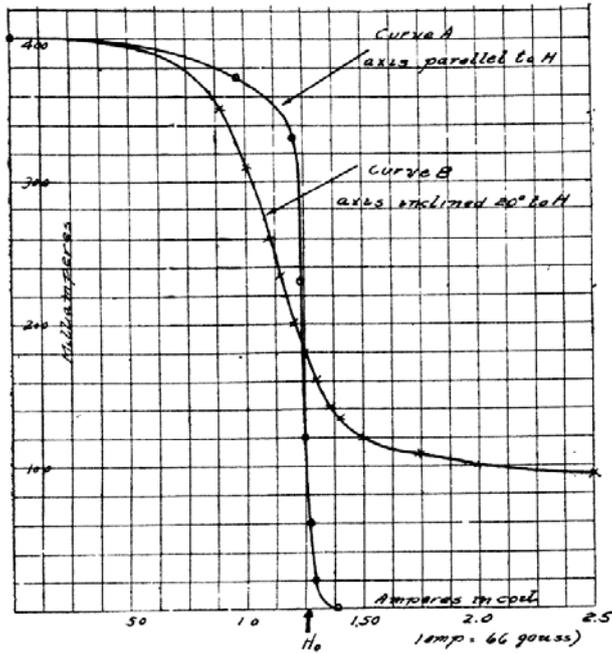


Gráfico 4 – Corrente no coletor em função do campo magnético na bobina

Porém não conseguimos observar esse comportamento nos dados, não tendo qualquer chance de haver um corte na corrente. Iniciamos então uma investigação em busca do problema. Atacamos inicialmente o vácuo conseguido no diodo. Ainda segundo Hull, comparamos a pressão conseguida com as curvas do gráfico abaixo que relaciona o campo magnético na bobina com o comportamento da corrente no coletor.

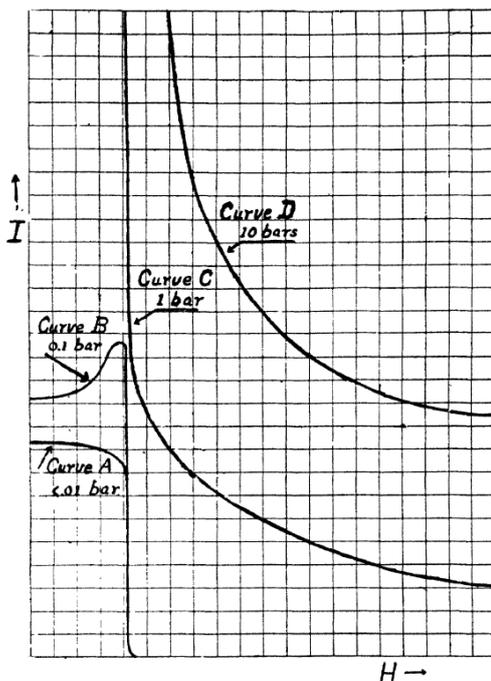


Gráfico 5 – Corrente no coletor em função da pressão do gás no diodo

A pressão do diodo é de 10^{-2} Torr, ou $1,33 \times 10^{-5}$ bars. Assim o vácuo não impede as medidas pois o valor conseguido encontra-se muito abaixo da curva A, que indica que é possível alcançar o corte de corrente. Voltamos então para a corrente do filamento. Segundo os estudos de Hull, os valores usados estão sempre acima de 5A, e com esses valores de corrente no filamento conseguia valores de corrente no coletor acima 100mA, maiores que as conseguidas.

Dessa forma, para a segunda tentativa aumentamos o valor da corrente no filamento que nessa etapa foi acompanhada diretamente. Analisando o formato das curvas, é notável que a semelhança entre o **Gráfico 3** e curva B do **Gráfico 4** bastante grande. A curva B mostra o efeito da inclinação do filamento em relação ao vetor campo magnético gerado pela bobina. Devido a semelhança entre as curvas podemos concluir que o filamento do diodo está inclinado ou o campo gerado pela bobina não é perfeitamente simétrico e não está alinhado com o eixo longitudinal da bobina solenóide.

O formato da curva indica ainda que não existe um valor campo magnético que permita o corte de corrente no coletor ou esse valor não é alcançável. O **Gráfico 2** é uma tentativa de reduzir o potencial para buscar o ponto de corte de corrente, porém a instabilidade das medidas foi muito alta como mostra a curva. Certamente essa instabilidade do baixo potencial que não permitiu acelerar os elétrons de forma suficiente.

Como alternativa, tentamos aumentar a corrente no filamento para valores acima de 4A, porém não foi observado qualquer dado mais relevante e infelizmente o filamento não suportou a temperatura e rompeu-se, não permitindo novas medidas. Como não havia tempo hábil para a fabricação outro diodo, demos por encerrado o projeto com os dados experimentais apresentados.

Como importância didática, baseado na importância das medições para o entendimento da física contemporânea, a válvula pode ser usada como material para as disciplinas experimentais que tratam de assuntos relacionados a física moderna. Ainda esse semestre, essa mesma válvula foi usada para execução de um dos experimentos da disciplina F_740 – Tópicos de Física Experimental III e, apesar do insucesso na determinação da relação esperada, trouxe muitas questões interessantes ao eixo do curso.

Anexos

F809: Instrumentação para Ensino – 2º semestre de 2005
Projeto: Válvula Eletrônica para Medida de e/m
Relatório Parcial

Aluno: Marcelo Moreira Xavier

Orientador: Y. E. Nagai

Coordenador: Prof. Dr. José J. Lunazzi

Introdução

O presente relatório tem por finalidade apresentar os resultados parciais do projeto em questão. São relatadas as etapas da montagem, com seus detalhes e pontos críticos. Sendo assim, a teoria envolvida no projeto ainda não será discutida, sendo relegada ao relatório final onde esperamos obter valores de medição para comparação e avaliação do sucesso do projeto.

Montagem do Diodo

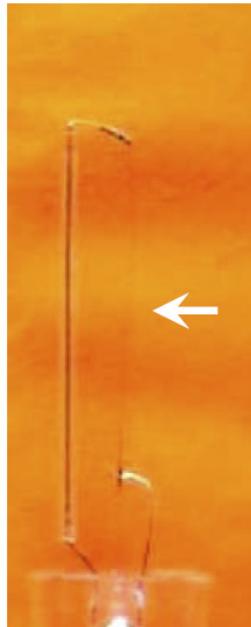
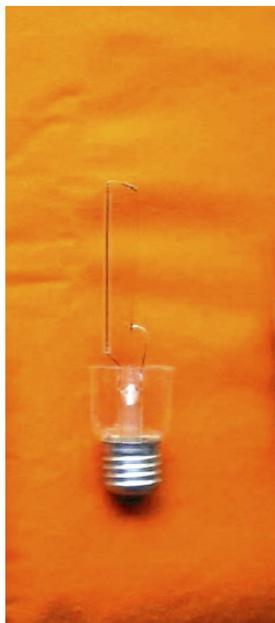
A figura abaixo mostra as etapas do processo de montagem do diodo. Como já citado, o diodo baseia-se na estrutura de uma lâmpada incandescente comum. As fotos abaixo são das fases de manufatura do diodo.

Apesar do grau avançado da montagem, não houve possibilidade de qualquer medida, mesmo em caráter de teste devido a alta complexidade da montagem. Essa complexidade fica mais evidenciada em pontos críticos como a solda de vidros que é extremamente delicada e última fase da montagem, podendo colocar a perder todo o trabalho.

Há também o fato de a estruturação passar por modificações leves no sentido de aumentar a confiabilidade e a precisão das medidas. Essas modificações só podem ser percebidas na prática do projeto porque a modelo da teoria não prevê esses detalhes técnicos. Há inclusive outras modificações Concluí-se então que o diodo não se encontra em condições de medida, uma vez que outras alterações de pequeno porte estão previstas. Tais mudanças serão citadas ao longo da explanação de cada fase da montagem.



Esta é a parte inicial da manufatura. Na figura é mostrado o corte feito no bulbo de uma lâmpada incandescente: usando um disco diamantado é feito um “sinal fundo” na região onde deseja-se o corte e, por aquecimento rápido, o vidro rompe. Esta técnica foi usada afim de separar o bocal com o filamento (parte inferior). Este será o suporte do diodo onde serão montadas as outras partes.



O filamento então é retirado e uma das hastes é prolongada para comportar um novo filamento linear de tungstênio de 0,18mm de diâmetro (seta). Este filamento ficará no eixo de simetria longitudinal no coletor cilíndrico mostrado a seguir. Uma alteração pensada no sentido de aumentar a precisão do projeto é usar um filamento espiralado no lugar do atual linear, intensificando assim o efeito termiônico em que se fundamenta esta etapa do diodo.



Para compor a parte superior do diodo usa-se o miolo, apenas com as hastes de suporte do filamento, de uma segunda lâmpada incandescente que foi retirado pelo mesmo método anterior. A este miolo foi soldado um fino tubo e vidro onde será conectada uma bomba que retirará o ar de dentro do diodo, fazendo o vácuo necessário para as medidas.

Imediatamente abaixo há um cilindro de inox que será coletor dos elétrons e é no eixo longitudinal de simetria deste cilindro que ficará o filamento de tungstênio



Nesta figura o cilindro é soldado aos suportes do filamento da segunda lâmpada usando a técnica da solda ponto, que consiste em soldar metais sem o uso de um terceiro metal, como o estanho, A solda é conseguida por aquecimento pontual na união desejada. Como as hastes são inseridas no vidro e se estendem até a parte externa da lâmpada, podemos usá-las para fazer as medições de ddp e/ou corrente necessárias.



Finalmente o diodo é mostrado montado na figura ao lado. Para uniras duas partes do diodo é usado o tubo de uma lâmpada fluorescente comercial, senda este soldado de forma a vedar a lâmpada nas regiões indicadas. Esta certamente é a etapa mais delicada do projeto: a solda é feita usando um maçarico com a chama e a exposição do vidro ao calor muito bem controlados. Qualquer aquecimento repentino pode trincar o vidro ou o aquecimento demasiado pode liquefazê-lo, impedindo a solda.

Uma alteração prevista é o prolongamento do corpo do diodo, ou seja, manter o cilindro e o filamento mais longos. Com o aumento da região de coleta e da região de emissão de elétrons espera-se que a precisão do experimento aumente também.

Abaixo está uma foto ampliada do diodo já montado



O próximo passo do projeto é manufaturar um diodo evitando possíveis falhas nos pontos críticos citados, o que viabilizaria as medidas desejadas.

Um outro projeto da mesma disciplina, do aluno Gardin, R.R.¹, propôs fazer as mesmas medições, porém com uma válvula comercial RCA, retirada de rádio antigo, onde desempenhava a função dos atuais transistores. Em seu relatório, Gardin cita problemas encontrados na estrutura da válvula que impediram medições precisas da razão e/m.

O atual projeto difere do anterior pelo fato de usar materiais de fácil acesso e baixo custo e, por ser uma montagem própria, o diferencial de ter os parâmetros do diodo controlados de forma a aprimorar os resultados.

Bibliografia

[1] Gardin, R.R. “*Válvula Diodo Para Estudo do Efeito Termoiônico*”. F 809A - Instrumentação para Ensino - 2º semestre / 2004

[2] de Lima, E.F. Foschini, M. e Magini, M. “*O Efeito Termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental*” Instituto de Física de São Carlos, USP.

Referências na Internet

Wikipedia – Válvula Termiônica

http://pt.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_termi%C3%B4nica

Válvulas termiônicas I: alguns fundamentos

<http://myspace.eng.br/eletrn/vterm/vterm01.asp>

Bibliografia

[1] D. W. Preston; E. R. Dietz. “*The Art of Experimental Physics*”.. John Wiley & Sons, Inc, 1991.

[2] A. W. Hull. “*Phys. Rev. 18, 31*” (1921)

[3] Gardin, R.R. “*Válvula Diodo Para Estudo do Efeito Termoiônico*”. F 809A - Instrumentação para Ensino - 2º semestre / 2004

[4] de Lima, E.F. Foschini, M. e Magini, M. “*O Efeito Termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental*” Instituto de Física de São Carlos, USP.