

Efeito Termiônico

Introdução

Em 1875, enquanto trabalhava em uma das suas lâmpadas incandescentes, o inventor norte-americano *Thomas Alva Edison* [1] observou um fenômeno que, atualmente, denominamos efeito *Edison* ou termiônico. Na época, *Edison* verificou que, sob vácuo, um filamento metálico aquecido emitia elétrons. A observação de *Edison* deu origem às válvulas e, posteriormente, aos diodos e transistores – dispositivos vitais (cada um a seu tempo) para o desenvolvimento da moderna eletrônica. Como característica comum, tais dispositivos apresentam um fluxo de elétrons em apenas uma direção: do filamento aquecido para uma placa a menor temperatura (na válvula), e de um semicondutor do tipo-p para outro do tipo-n (no caso dos diodos e transistores). De fato, foi apenas em 1904, por intermédio do físico britânico *John A. Fleming* [2], que o efeito ganhou uma aplicação prática efetiva. Como consultor da *Marconi Wireless Telegraphy Co.*, *Fleming* precisava converter um fraco sinal AC em outro DC, capaz de sensibilizar um medidor ou receptor de telefone [3]. Conhecedor dos trabalhos de *Edison*, *Fleming* se deu conta que o fluxo preferencial de elétrons verificado no efeito *Edison* poderia produzir a retificação de sinal (AC para DC) que tanto precisava. Assim nascia a primeira válvula que, muito embora tenha sido substituída pelos diodos e transistores, ainda hoje pode ser encontrada em amplificadores de alta potência, em monitores de vídeo do tipo CRT, e em fontes de raios-x, por exemplo.

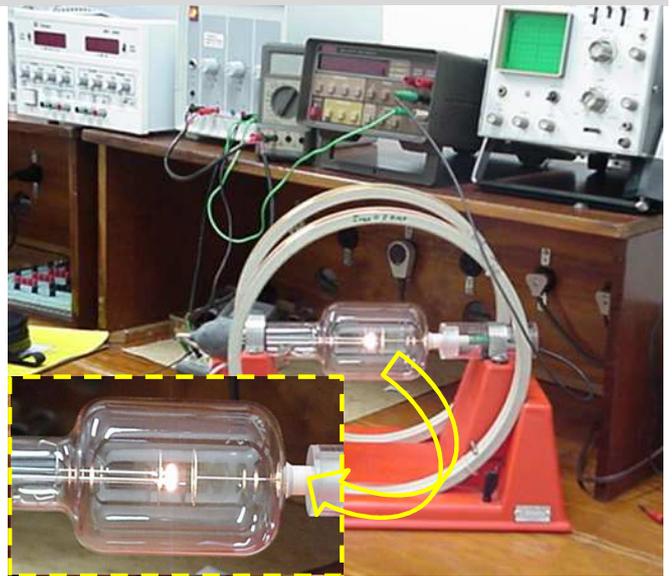
O efeito termiônico também foi investigado pelo físico inglês *Owen Williams Richardson* [4] que, em 1901, demonstrou que o número de elétrons emitidos por um filamento aquecido depende da temperatura segundo uma equação do tipo *Arrhenius*. Por seus trabalhos sobre o efeito termiônico e pela descoberta da lei que o governa, *Richardson* recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1928 [5].

Objetivos

- ☞ Verificação do efeito *Edison* ou termiônico.
- ☞ Obtenção e análise de curvas $I \times V$ para diferentes temperaturas de filamento.
- ☞ Efeito da carga espacial e verificação da lei de *Child-Langmuir*.
- ☞ Determinação da função trabalho do catodo utilizado ($W_{\text{tungstênio}}$).
- ☞ Determinação da razão e/m .
- ☞ Verificação do fenômeno de retificação (diodo).

Equipamentos

- 1 montagem comercial da *Leybold Didactic* (Inclui: tubo *Leybold 555-610* [detalhe na foto] + suporte + bobinas de *Helmholtz*)
- 3 fontes de alimentação (filamento + catodo-anodo + bobinas de *Helmholtz*)
- 1 pirômetro óptico (*RatioScope 5*)
- 1 gerador de áudio
- 1 osciloscópio de 2 canais
- Multímetros (V & A)
- Fios para conexão, resistor de 10 k Ω , etc.



Conceitos Envolvidos

A Função Trabalho – Elétrons podem ser extraídos de um átomo, desde que seja fornecida energia suficiente para tal. Esta remoção de elétrons, ou ionização, também pode ocorrer em moléculas ou arranjos mais complexos de átomos tal como um sólido, por exemplo. Neste caso, a energia necessária para extrair elétrons de um sólido é melhor representada pelo conceito de função trabalho W (Fig. 1).

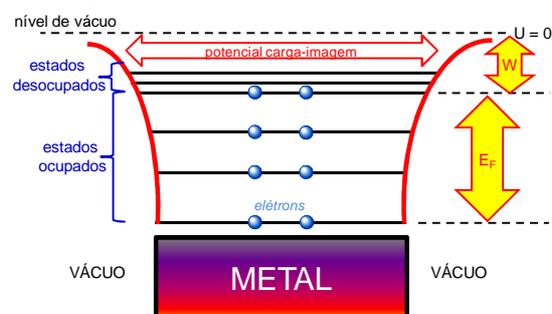


Figura 1 – Representação esquemática dos níveis de energia associados a elétrons em um metal. Enquanto a energia de *Fermi* (E_F) define o maior nível energético ocupado, a função trabalho (W) refere-se à energia necessária para extrair um elétron deste nível.

Todo sólido possui uma função trabalho muito bem definida, a qual depende: da sua constituição química, da forma de agrupamento (tipo de ligação química e/ou orientação), e da condição da sua superfície, por exemplo. A determinação da função trabalho de materiais metálicos, semicondutores ou isolantes é de fundamental importância para a construção de dispositivos eletro-eletrônicos e constitui um campo de intensa pesquisa. Maiores informações a respeito podem ser obtidas nas referências indicadas ao final deste roteiro.

Contato entre dois metais – Quando dois materiais distintos, e eletricamente neutros, são colocados em contato haverá movimentação de cargas elétricas através da sua interface. Este efeito é mais notável no caso dos metais, onde os elétrons possuem maior mobilidade - especialmente quando comparados com materiais semicondutores e isolantes. As cargas elétricas (principalmente os elétrons) movimentam-se devido à diferença entre as funções trabalho dos metais considerados, e tem por objetivo minimizar a energia livre do sistema.

Considerando a Figura 2, e na hipótese de $W_A < W_B$, os elétrons movimentar-se-ão do Metal A para o Metal B, já que este necessita de maior energia para ter seus elétrons removidos. A movimentação de elétrons ocorre até que haja uma *ddp* capaz de igualar o potencial químico dos dois metais.

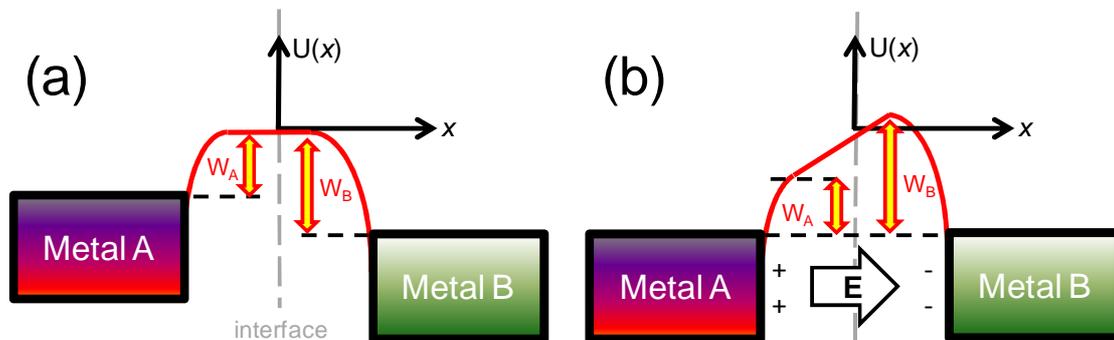


Figura 2 – Representação esquemática do efeito de contato entre dois metais distintos, originalmente neutros: (a) imediatamente antes do contato, e (b) após equilíbrio. Note que os valores de W_A e W_B não sofrem alterações e que a movimentação de elétrons leva ao surgimento de um campo elétrico (*ddp*) entre os diferentes metais.

Muito embora possa parecer estranho, a idéia de potencial químico está diretamente associada à energia de *Fermi* e, também, à movimentação de carga entre os metais A e B. Desta forma, a *ddp* passa a ser denominada **potencial de contato**, e é expressa por:

$$V_A - V_B = -e(W_A - W_B), \quad (1)$$

É importante ressaltar que a quantidade de carga transferida não é o parâmetro mais importante, mas sim a *ddp* criada pela movimentação de elétrons. O potencial de contato tem implicação direta sobre o experimento que iremos realizar uma vez que, mesmo na ausência de qualquer potencial externo, pode haver uma *ddp* entre o anodo e o catodo - gerada pelo aquecimento deste último, por exemplo.

Emissão termiônica – Três anos após a descoberta do elétron por *J. J. Thomson* (em 1897), *Paul Drude* elaborou seu modelo acerca da condutividade elétrica e térmica dos metais. O modelo fundamentava-se na Teoria Cinética dos Gases e, portanto, tratava os elétrons como um gás de partículas [http://en.wikipedia.org/wiki/Drude_model]. Tendo por base este cenário, uma das primeiras tentativas de explicar o efeito termiônico considerava que o gás de elétrons livres obedecia à distribuição (clássica) de *Maxwell-Boltzmann*, e que a emissão de elétrons

dava-se a partir do fornecimento de uma energia mínima (W). Desta forma, a densidade de elétrons emitidos era função da temperatura T e deveria relacionar-se com a densidade de elétrons no metal, tal que:

$$N_{\text{out}} = N_{\text{in}} \exp\left(\frac{-W}{k_B T}\right). \quad (2)$$

Refinamentos posteriores [levando em conta o número de partículas (por unidade de tempo) na superfície do metal, a distribuição de velocidade destas partículas, e considerando-se haver cerca de 1-2 elétrons por átomo], resultaram na chamada equação de *Richardson*. Segundo esta equação, a densidade de corrente máxima emitida por um metal à temperatura T é:

$$j = en \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m}} \exp\left(\frac{-W}{k_B T}\right), \quad (3)$$

onde: n = densidade de elétrons, e = carga do elétron, m = massa do elétron.

O ajuste da Eq.(3) aos dados experimentais, no entanto, resultavam em valores de n totalmente descabidos - muito embora o comportamento exponencial sempre fosse verificado. Esta discrepância advém do tratamento clássico considerado originalmente, e a equação de *Richardson* foi corrigida por *Saul Dushman* mediante a adoção de uma distribuição de *Fermi-Dirac* para o gás elétrons livres. Feita esta correção, a emissão termiônica passa a ser corretamente descrita pela equação de *Richardson-Dushman*:

$$j = 4\pi \frac{k_B^2 e m}{h^3} T^2 \exp\left(\frac{-W}{k_B T}\right) \quad \text{ou} \quad j = A_0 T^2 \exp\left(\frac{-W}{k_B T}\right), \quad (4)$$

onde a constante A_0 (cte de *Richardson*) é igual a $\sim 1.2 \times 10^6 \text{ A m}^{-2} \text{ K}^{-2}$.

Na prática, contudo, a equação de *Richardson-Dushman* deve ainda levar em consideração a eventual reflexão de elétrons (resultando em pequenas correções no valor de A_0), bem como a dependência da função trabalho com a temperatura [$W = W_0 + \alpha T$]. Desta forma, a expressão mais completa para a equação de *Richardson-Dushman* assume o seguinte formato:

$$j = A_0 \exp\left(\frac{-\alpha}{k_B}\right) T^2 \exp\left(\frac{-W}{k_B T}\right). \quad (5)$$

Carga espacial & Corrente de saturação – No processo de emissão termiônica, a remoção de elétrons não pode continuar indefinidamente. Em função do desequilíbrio de cargas gerado, após alguns instantes, desenvolve-se na superfície do metal um potencial de frenamento que visa preservar a sua integridade. Para entendê-lo melhor, consideremos duas placas metálicas A e B no interior de uma ampola em vácuo, e interligadas por meio de um amperímetro ideal. Consideremos, ainda, que as placas A e B estejam, respectivamente, às temperaturas T e T_0 , tal que $T > T_0$. Nesta situação, deve-se verificar uma corrente de elétrons da placa A para a placa B. Esta corrente, no entanto, será bem inferior àquela prevista pela equação de *Richardson-Dushman*. Isto ocorre devido: (a) à existência do potencial de contato e, (b) ao surgimento de uma nuvem de elétrons (ou carga espacial) nas imediações da placa A. Esta nuvem de elétrons origina-se a partir do desequilíbrio de cargas e altera o potencial experimentado pelos elétrons emergentes (Fig. 3).

Uma maneira eficiente de eliminar o efeito destas cargas espaciais consiste em se aplicar uma *ddp* externa, a qual atuará fornecendo cargas elétricas adicionais para a placa A.

Na prática, com a placa A mantida à temperatura T fixa, varia-se a ddp externa até que se obtenha uma corrente constante entre as placas. Esta é a chamada corrente de saturação, a qual depende apenas da temperatura T .

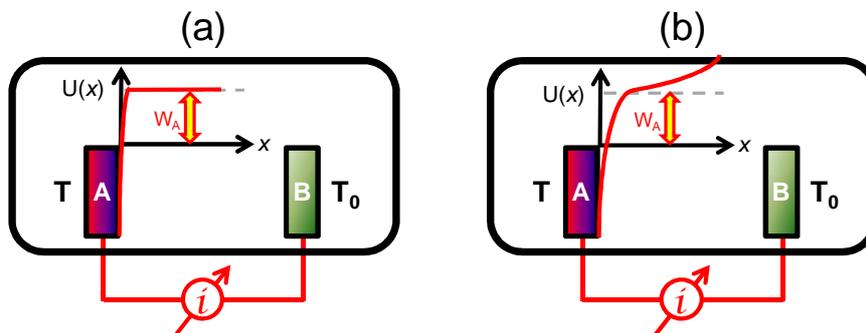


Figura 3 – Representação de duas placas metálicas (A e B) mantidas no interior de uma ampola sob vácuo. As placas encontram-se às temperaturas T e T_0 e estão interligadas por meio de um amperímetro. Nas figuras temos ainda representados os potenciais $U(x)$ experimentados pelos elétrons removidas da placa A: (a) na ausência de cargas espaciais, e (b) após a formação da nuvem de elétrons (cargas espaciais).

Lei de Child-Langmuir – Antes do regime de saturação, pode-se calcular a dependência entre a corrente entre as placas e a ddp aplicada externamente. A correlação prevista entre j (corrente por unidade de área do anodo) e V_{AB} (ddp externa) recebe o nome de lei de *Child-Langmuir* e costuma apresentar boa concordância com os resultados experimentais. A menos de algumas constantes fundamentais (e , m e ϵ_0) a densidade de corrente j entre as placas A e B varia com o quadrado da sua separação (d^2) e com $V_{AB}^{3/2}$ - razão pela qual a lei de *Child-Langmuir* também é conhecida como "lei dos 3/2's de potência":

$$j = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_{AB}^{3/2}}{d^2}. \quad (6)$$

Procedimento Experimental

A figura a seguir (Fig. 4) apresenta uma visão geral da montagem experimental a ser utilizada.

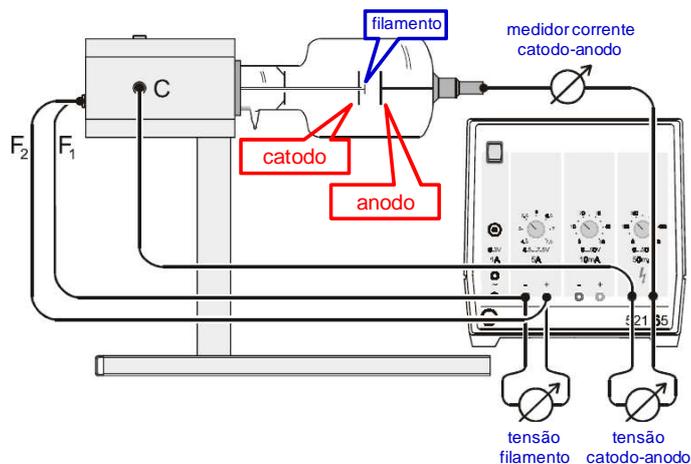


Figura 4 – Tubo *Leybold 555-610* (incluindo suporte) com sua correspondente fonte de alimentação. Na figura estão indicados o catodo+filamento e anodo, bem como algumas conexões elétricas.

Temperatura do catodo – Todas as etapas desta prática dependem da temperatura do catodo metálico. Esta temperatura é determinada pela aplicação de uma corrente elétrica no filamento que se encontra próximo ao catodo (Fig. 4). A alimentação do filamento é feita por intermédio de uma fonte exclusiva, a qual opera entre 0 e 2.5 A (@ 6.3 V).

Quanto maior a tensão-corrente aplicada, maior a temperatura do catodo, a qual tarda cerca de 20-30 min até se estabilizar. A temperatura do catodo é determinada por intermédio de um pirômetro óptico (*RatioScope 5*). Procure se familiarizar com o seu correto funcionamento (<http://PirometroOptico.pdf>).

 Antes de prosseguir, verifique se todas conexões elétricas (fontes-tubo-medidores) estão corretas e seguras.

 Não se esqueça que, uma vez iniciado o aquecimento do tubo *Leybold*, este alcançará altas temperaturas, podendo ocasionar queimaduras.

Efeito termiônico – A partir da montagem indicada na Fig. 4, determine a corrente I entre o catodo-anodo em função da aplicação de um potencial externo V (em intervalos de 20 V de 0–200 V, e em intervalos de 50 V de 200–500 V). Repita o procedimento para 5 diferentes temperaturas do catodo (por volta de 1600, 1700, 1800, 1850, e 1900 °C, por exemplo).

Além dos valores de $I \times V$, para cada temperatura, não se esqueça de também anotar os valores de tensão e corrente do filamento.

De posse dos resultados experimentais, faça representações de I versus V e determine as seguintes quantidades, para cada temperatura: (a) o valor da corrente de saturação I_{sat} , (b) a tensão para a qual I_{sat} ocorre, e (c) os valores de corrente para as tensões $V = 0, 20, 40, \text{ e } 60$ V. Monte uma tabela com os resultados encontrados e discuta-os.

Lei de *Child-Langmuir* – Com os resultados de I versus V obtidos na etapa anterior, proponha uma representação gráfica conveniente e discuta acerca da validade da lei de *Child-Langmuir*. Se necessário, repita as medidas de $I \times V$ em maior detalhe (intervalo de 5 ou 10 V antes do regime de saturação) para a maior temperatura de filamento.

Função trabalho do catodo – Agora, mantendo $V = 0$ V, meça a corrente I entre as placas para várias temperaturas de catodo: idealmente, cerca de 7-10 diferentes temperaturas entre 1500 e 2000 °C. Com os resultados obtidos, e tendo por base a equação de *Richardson-Dushman* [Eq. (4)], determine a função trabalho do catodo utilizado. Discuta o resultado obtido.

Determinação da razão e/m – Conforme sabemos, toda carga elétrica em movimento descreve uma trajetória circular quando submetida à ação de um campo magnético externo. Este efeito foi explorado em detalhe na prática "Razão e/m " e também será considerado aqui. A geometria envolvida é diferente, uma vez que as cargas elétricas (elétrons) estarão se deslocando do catodo para o anodo, mas também envolve a utilização das bobinas de *Helmholtz* (Fig. 5). Aproveite para (re)ler o roteiro desta prática (<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/>) a fim de determinar a intensidade do campo magnético aplicado.

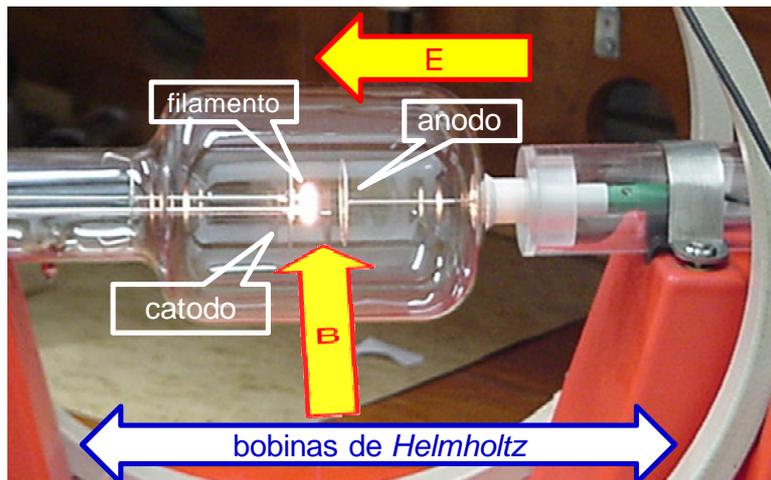


Figura 5 – Foto do tubo *Leybold 555-610* (incluindo suporte) e bobinas de *Helmholtz*. Na foto temos indicados o catodo, o filamento (em funcionamento) e o anodo. Os sentidos dos campos elétrico e magnético também estão indicados.

Para a realização da prática, é importante garantir que os campos \vec{E} e \vec{B} sejam ortogonais. Desta forma, sob a ação do campo \vec{B} os elétrons extraídos do catodo estarão sujeitos a uma força perpendicular à direção da sua velocidade, obrigando-os a descrever uma trajetória circular cujo raio R é dado por:

$$R = \frac{mv}{eB}, \quad (7)$$

a qual é função da massa (m), carga (e) e velocidade (v) dos elétrons. Campos magnéticos mais intensos farão com que o raio R seja cada vez menor, levando a uma diminuição da corrente entre o catodo e o anodo (Fig. 6). Nesta condição, a razão e/m pode ser estimada a partir da tensão aplicada entre o catodo e o anodo (V), separados pela distância d , e da intensidade do campo magnético (B):

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(Bd)^2}. \quad (8)$$

Na prática, a determinação experimental do "campo de corte" B_{corte} não é muito bem definida. Este valor deve ser determinado a partir da intersecção das retas tangentes às duas partes da curva obtida (Fig. 6). Repita o procedimento experimental para 3 temperaturas de filamento, encontre as razões e/m associadas, e discuta os seus resultados.

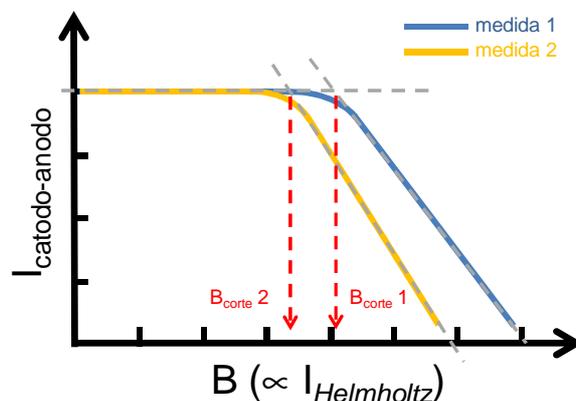


Figura 6 – Exemplos de curvas a serem obtidas para a determinação da razão e/m .

Retificação – Nas medidas realizadas até então, você deve ter notado que o valor da corrente entre o catodo e o anodo depende da polarização adotada na tensão catodo-anodo (Fig. 4). Em alguns casos, mesmo que esta última seja apreciável, nenhuma corrente será observada. Isto deve-se àquilo que chamamos de retificação, ou seja: na configuração adotada, os elétrons sempre irão do catodo para o anodo. Podemos verificar este fenômeno, com muito mais clareza, mediante a aplicação de um potencial AC entre o catodo e o anodo. Neste caso, utilizaremos um gerador de áudio como fonte AC, o qual polarizará o anodo com um potencial do tipo $V(t) = V_0 \text{ sen } (\omega t)$. Para verificarmos o efeito de retificação utilizando uma válvula termiônica (tubo *Leybold*) precisaremos, ainda: de um resistor de 10 kΩ e de um osciloscópio de dois canais. Uma visão geral da montagem a ser utilizada é apresentada na Figura 7.

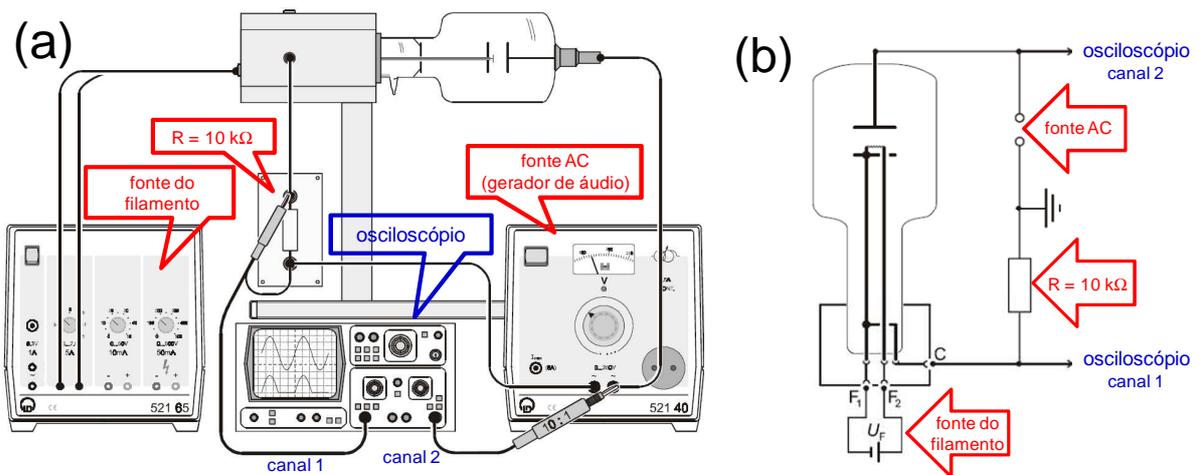


Figura 7 – (a) Representação física da montagem a ser utilizada no experimento de retificação, deixando evidente todos os componentes envolvidos. (b) Diagrama elétrico da montagem representada em (a).

Nesta parte da prática, nada será medido: os resultados serão apenas qualitativos e apenas um registro fotográfico (além das condições experimentais) é necessário.

Faça as conexões elétricas conforme indicado na Fig. 7. Atenção especial deve ser dada ao "terra" do sistema - ponto C na Fig. 7(b). Imponha uma determinada corrente (tensão) para aquecer o filamento e aguarde até que a temperatura seja atingida. Com a fonte AC (gerador de áudio) desligada, verifique o sinal obtido na tela do osciloscópio e registre o seu resultado. Agora ligue a fonte AC e observe o que acontece. Analise e discuta os resultados obtidos.

Questões

! Deduza a equação de *Richardson-Dushman* (<http://www.physics.csbsju.edu/370/thermionic.pdf>), a lei de *Child-Langmuir* [https://myncf.ncf.edu/c/document_library/get_file?uuid=989623e7-34f9-4506-95b3-6d8021daa6fc&groupId=14864] e a Eq. (8).

! Faça a análise dimensional das Eqs. (5), (6) e (8).

! Explique o princípio de funcionamento do pirômetro óptico utilizado.

! Discuta a respeito das fotos-figuras apresentadas na primeira página deste roteiro: você saberia identificá-las e dizer do que tratam?

Referências

Física Moderna

Paul Tipler, *Física Moderna* (5ª Ed., Livros Técnicos e Científicos, 2010) – **539^T595f**

Física do Estado Sólido

C. Kittel, *Introdução à Física do Estado Sólido* (8ª Ed., LTC, 2006) – **530.41^K62int**

N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics* (Thomson Learning Inc., 1976) – **530.41^A823s**

Eletrônica Básica & Efeito Termiônico

A. Mavino e D. J. Bates, *Eletrônica* (AMGH Editora, 2011) – **537.5^M262e**

L. Bertini, *Eletrônica Básica* (Almeida & Porto, 2008) – **537.5^B544e**

R. Morrison, *The fields of Electronics: understanding Electronics using basic Physics* (John Wiley & Sons, 2002) – **621.3815^M881f**

R. O. Jenkins and W. G. Trodden, *Electron and ion emission from solids* (Routledge & Kegan Paul, 1965) – **530.41^J52e**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Alva_Edison

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/John_Ambrose_Fleming

[3] H. F. Dilla and S. T. Corneliussen, “John A. Fleming and the beginning of electronics”, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23**, 1244 (2005) – <http://dx.doi.org/10.1116/1.1881652>

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Owen_Richardson

[5] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/

Simulações

<http://webs.um.es/jmz/jmz/thermionic/apartados/thermionic.html>

http://www.matter.org.uk/tem/electron_gun/electron_gun_simulation.htm

<http://demonstrations.wolfram.com/MeasurementOfElectronEMUsingAModifiedMagnetron/>

Créditos

Ao longo dos anos, este roteiro passou por diversas atualizações e melhorias. Neste processo, tiveram participação ativa os Profs H. C. Basso, M. Siu Li, e A. R. Zanatta.

As fotos da montagem experimental foram feitas pelo Prof. M. Siu Li.

As diferentes fotos-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidas da *internet*.