

## **EFEITO TERMO-IÔNICO**

### **I. Objetivos**

- Estudo da função trabalho e do potencial de contato entre metais
- Caracterização da corrente de saturação de uma válvula termo-iônica
- Efeito de carga espacial
- Determinação da relação  $e/m$
- Diodo

### **II. Introdução**

O efeito termo-iônico começou a ser pesquisado no final do século passado, após sua descoberta por Thomas Alva Edison. Com o modelo de metais de Drude, foram propostos os primeiros modelos para explicar esse fenômeno, que passou a ter uma grande importância prática na construção de válvulas termo-iônicas (que funcionavam como retificadoras e amplificadoras de sinais nos antigos rádios), de canhões eletrônicos (usados até hoje nos tubos de vídeo), etc. Para seu completo entendimento, porém, uma série de conceitos deverá ser abordada.

### **III. Fundamentos Teóricos**

#### **A função trabalho**

Como você já deve ter visto no curso de Física, pode-se ionizar positivamente qualquer átomo (ou seja, retirar pelo menos um elétron dele). No modelo de Bohr, um dos “pioneiros” voa para fora do “sistema solar” atômico. Mas para isso, certa quantidade de energia foi cedida ao átomo: essa é denominada “energia de ionização”.

Esse mesmo fenômeno, a ionização, ocorre também em moléculas e arranjos mais complexos de átomos. Um bloco metálico, por exemplo, pode perder ou ganhar elétrons. Neste caso, apesar de estar envolvida a energia para separar (ou aproximar) o elétron de sua carga-imagem, um outro fator, interno ao sistema formado pelos átomos que compõem o bloco metálico, também aparece é: a “afinidade” do metal com os seus elétrons. Isto resulta na denominada “função trabalho”, ou seja, a energia necessária para retirar um elétron de um bloco metálico eletricamente neutro.

Então vejamos: dentro de um bloco metálico, os elétrons mais externos dos átomos que o compõem não conseguem se fixar em um deles; esses elétrons não estão sendo “localizados”, e passam de átomo quase que livremente. Desta forma se

comportam como um gás, circulando através da estrutura cristalina do metal <sup>1</sup>, composta por íons positivos. É de se esperar que para retirar um elétron desse “banho” de cargas positivas tenha-se que fazer trabalho.

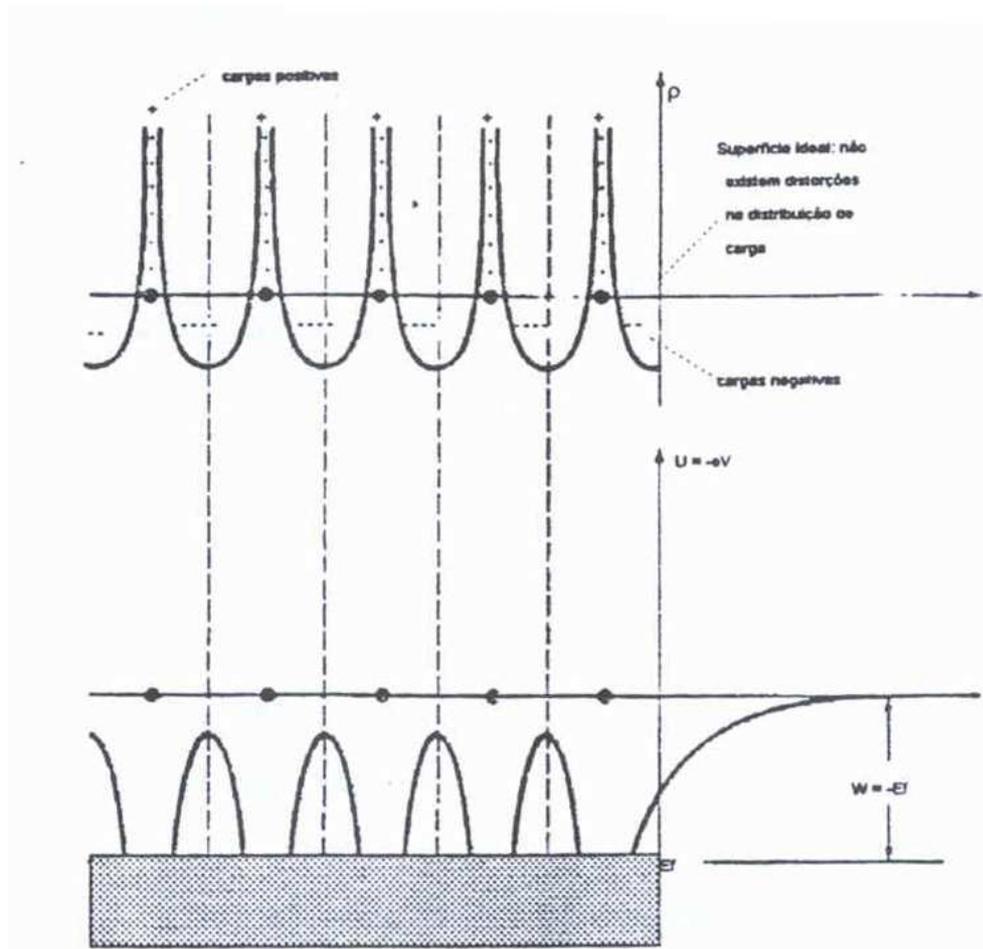


Figura 1: na parte superior, a variação da densidade de cargas dentro de um cristal metálico. Note que os picos positivos estão sobre a posição dos íons. Na parte inferior, o potencial sentido pelos elétrons é o maior nível de energia ocupado. A superfície não apresenta distorções, ou seja a distribuição de cargas na superfície é semelhante (a menos do corte) é encontrada no interior do cristal (de Ashcroft-Mermim, pg. 356).

Existe, porém, mais um fator envolvido, que complica nossa análise da ionização do metal, temos que fazê-lo por uma superfície! E o que garante que na sua superfície metálica não possam existir rearranjos de cargas, que venham a afetar a energia necessária para a retirada do elétron? Na verdade, as medidas de função do trabalho tem provado que esses arranjos existem, e que os campos elétricos de interface são tão intensos que as funções trabalho passar a depender fortemente do estado ou da forma como essas superfícies foram preparadas.

<sup>1</sup> Este modelo para metais foi inicialmente proposto por Drude – Ver Ashcroft-Mermim, cap. I

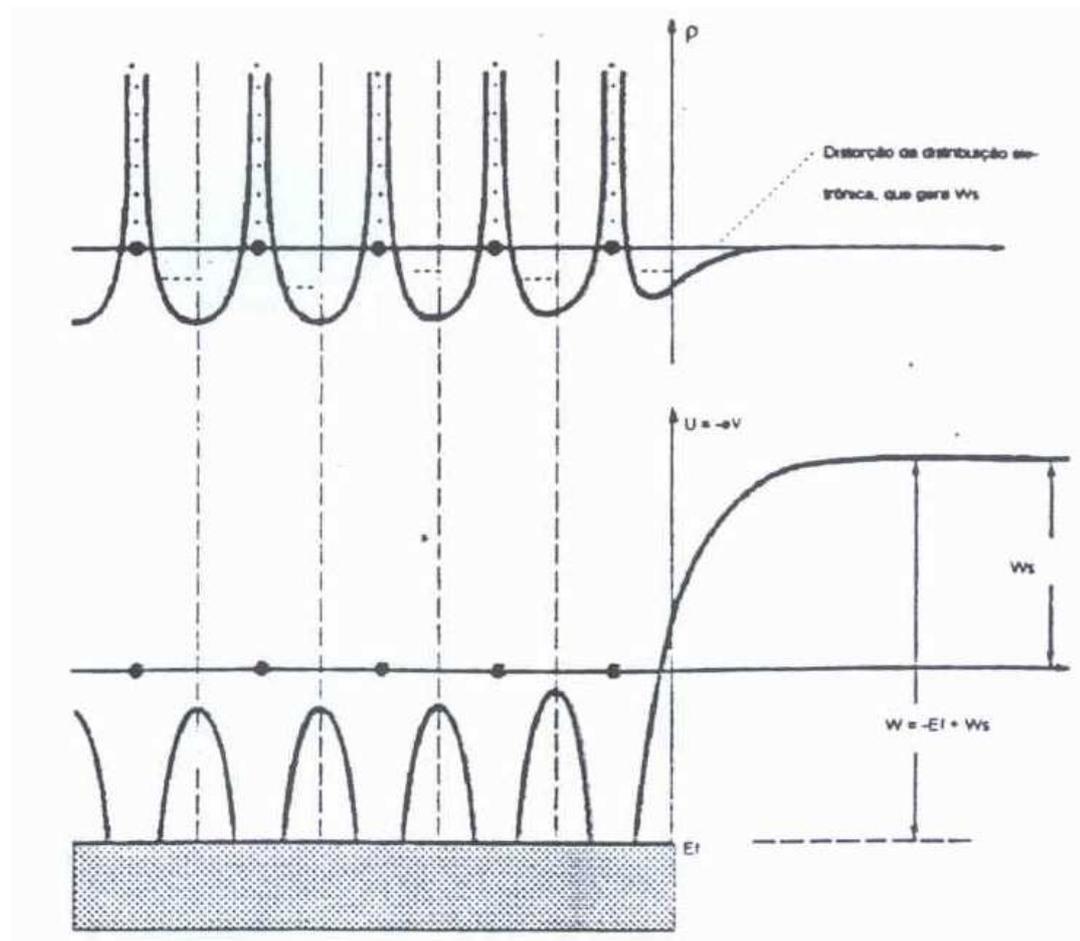


Figura 2: Aqui, distorções superficiais aumentam a energia necessária para extrair um elétron do metal. As distorções estão representadas pela mudança na distribuição de carga na superfície (de A -M, pg 358)

Para um mesmo metal, então, pode-se medir diferentes valores de função trabalho, dependendo do estado de contaminação superficial, orientação cristalina, etc. E a caracterização exata da função trabalho de um metal é uma tarefa para sistemas complexos de medida de propriedades superficiais, envolvendo ultra-alto-vácuo com tratamento térmico e outras técnicas sofisticadas.

### O contato de dois metais

O que ocorre quando dois metais diferentes são colocados em contato? Estamos pressupondo que ambos estejam inicialmente eletricamente neutros. Bem, como dito anteriormente, dadas as diferenças de função trabalho, os elétrons de um deles deverão ter maior facilidade para sair do metal que os do outro. O contato permite uma troca de cargas (em termodinâmica, os dois metais formam um sistema

com troca de partículas que procura minimizar sua “energia livre” total<sup>2</sup>). A situação pode ser representada pela figura abaixo:

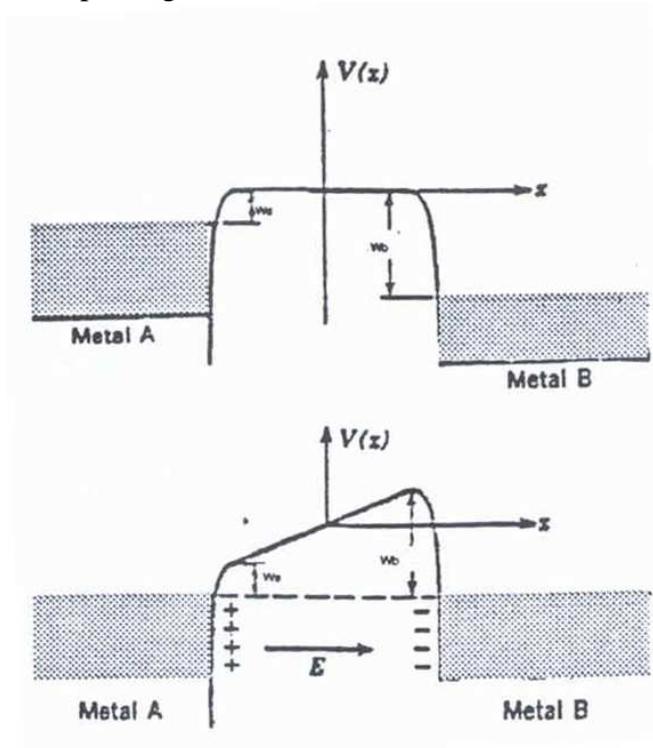


Figura 3: O efeito do contato entre dois metais, inicialmente neutros. A variação do potencial entre as placas é esquemático (de Leighton – Principles of Modern Physics- pg. 354)

Então, como o metal A tem maior facilidade para perder elétrons que o metal B, eles irão migrar de A para B até que a d.d.p. desenvolvida compense a diferença de potencial químico entre os metais<sup>3</sup>. Essa d.d.p. é denominada potencial de contato e igual a:

$$V_A - V_B = -e(W_A - W_B)$$

Note que a **quantidade de carga** transferida não é o parâmetro importante, mas sim a d.d.p. criada por essa transferência! Assim, um sistema formado por dois metais em

<sup>2</sup> Ver Reif – Statistical and Thermal Phys.

<sup>3</sup> Esse conceito de potencial químico, apesar de parecer estranho neste contexto, é a origem da Energia de Fermi e característico de sistemas em contato, onde existe troca de partículas. Para um aprofundamento nesse ponto, ver Reif.

contato, com alta capacitância, precisará de uma quantidade menor de carga para equilibrar o sistema que um outro, com baixa capacitância.<sup>4</sup>

Em que é isso importante? Bem, se você está trabalhando com um aparelho onde elétrons tenham que ir de uma placa metálica a outra, a existência do potencial de contato implica na existência de um campo elétrico entre as placas **mesmo que não exista d.d.p. aplicada!** Ou seja, mesmo com um sistema em curto, os elétrons sentirão um campo elétrico entre essas placas<sup>5</sup>. Vejamos as conseqüências disso no seu experimento.

### A emissão termo-iônica

Foi descoberto no final do século passado, por Edison, que um filamento quente permitia a passagem de corrente elétrica, no vácuo, só em um determinado sentido (efeito Edison). Com a teoria do elétron por Thomson, e o modelo de metais por Drude (já em 1900), o efeito Edison passou a ser explicado como sendo pela “evaporação” de elétrons pelo metal; considerando que os elétrons compunham uma espécie de gás, confinado no metal por um potencial (a função trabalho), a densidade de elétrons fora do metal deveria estar relacionada com a densidade no metal por:

$$P_{fora} = P_{dentro} e^{-\frac{w}{kT}}$$

utilizando a distribuição de Maxwell-Boltzman (clássica) para a energia dos elétrons. Cálculos mais acurados, com número e partículas que atem na interface por unidade de tempo, distribuição de velocidade dessas partículas e a densidade esperada de elétrons (cerca de um a dois por átomo) resultam na expressão para a densidade de corrente máxima emitida por uma superfície metálica, à temperatura T:

$$j = e n \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} e^{-\frac{w}{kT}}$$

onde

n = densidade de elétrons

e = carga do elétron

m = massa do elétron

Essa é a chamada *equação de Richardson*

Na verificação experimental desta expressão, encontrou-se que a dependência exponencial se confirmava bem, mas o pré-fator (raiz da temperatura e

---

<sup>4</sup> Existe um método para a medida de potencial de contato (a d.d.p. desenvolvida entre os dois metais) que se baseia nesse princípio. Um bloco de metal é mantido fixo, enquanto que o outro é aproximado e afastado do primeiro. Já que a d.d.p. entre eles fica constante, deve surgir uma corrente, causada pela variação de capacitância. A medida dessa corrente e da capacitância do sistema fornece o valor do potencial de contato. Esse método foi desenvolvido por Lord Kelvin (Ashcrof-Mermin; Solid State Physics, pg.361).

<sup>5</sup> Se você entendeu bem os conceitos discutidos até agora deve saber porque esse campo **não** pode realizar trabalho (ou seja, essa d.d.p. não é equivalente à d.d.p. aplicada por uma pilha, por exemplo).

constantes) não se verificavam. Em particular, o ajuste de  $n$  resultava em um valor muito pequeno!!!<sup>6</sup>

Essa expressão deve ser modificada, pra levar em conta que a distribuição eletrônica em um metal segue a distribuição estatística de Fermi-Dirac. A expressão resultante mantém o termo exponencial, mas o pré-fator se modifica:

$$j = \frac{em}{2\mu^2 h^3} (kT)^2 e^{-\frac{w}{kT}}$$

*Esta é a equação de Richardson-Dushman.*<sup>7</sup>

### Medida da corrente de saturação: carga espacial

Como foi visto no item anterior, quando um metal está a temperatura  $T$ , saem dele  $j$  Coulombs por unidade de tempo área. Evidentemente, essa não é uma situação de equilíbrio (o metal não pode ficar perdendo carga) e ela é estabelecida pelo aparecimento de um potencial de freamento, dado pelo desequilíbrio de cargas. Caso montássemos um sistema, constituído por duas placas metálicas próximas no vácuo.

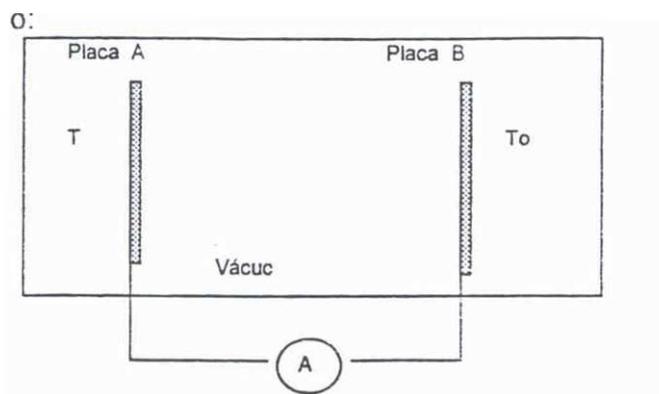


Figura 4: esquema de uma montagem para a medida de corrente termo-iônica entre duas placas metálicas submetidas a temperaturas diferentes.

sendo  $T \gg To$ , pelo fato de estarem ambas as placas ao mesmo potencial elétrico (interligadas por um amperímetro ideal) deverá existir uma corrente de elétrons de **A** para **B**. Porém, a magnitude desta corrente será bem menor que a calculada pela equação de Richardson-Dushman. E as razões para isso são:

- a) a existência de **potencial de contato**, como discutido nas duas primeiras partes da apostila

<sup>6</sup> Veja no apêndice a dedução desta expressão, copiada de V. Kondratyrv "The Structure of Atoms and Molecules" – pg. 19.

<sup>7</sup> Veja apêndice e dedução desta expressão, copiada de Ashcroft-Mermin "Solid State Physics" – pg. 362-264.

- b) o aparecimento de uma nuvem de elétrons fora da placa, o que **modifica** o potencial visto por um elétron que está saindo do metal.

Para um melhor entendimento deste último ponto, vamos retornar ao esquema proposto:

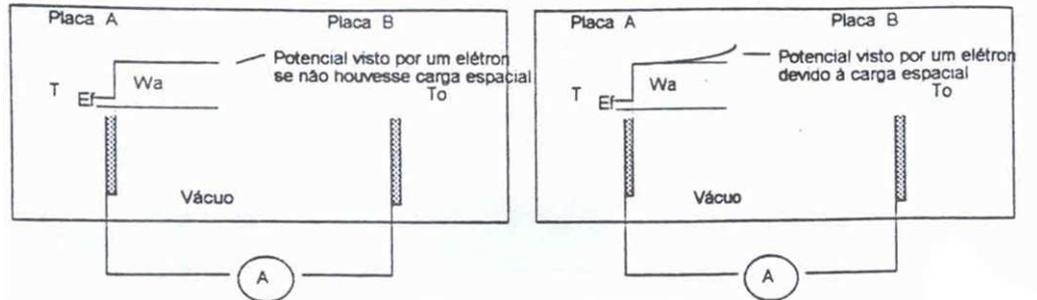


Figura 5a e 5b: potencial visto por um elétron que sai da placa A e vai para B, supondo a ausência e existência de cargas espaciais. A variação do potencial é esquemática.

ou seja, pela presença dos elétrons ejetados pela própria placa, cria-se uma nuvem de cargas negativas que impede a saída de mais elétrons, diminuindo a corrente que circula no circuito. Para eliminar esse efeito um ad.d.p. externa é aplicada às placas, até que não haja mais essa nuvem; nessa situação, a corrente medida **não** depende mais da d.d.p. aplicada, mas sim da temperatura da placa. Atingiu-se a situação de saturação.

Um cálculo detalhado da dependência da corrente medida, em função da d.d.p. externa aplicada, é mostrada no apêndice. É assumido que a condição de saturação não foi atingida e despreza-se o potencial de contato. O resultado é bastante interessante:

$$j = \frac{\sqrt{2}}{9\mu} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V_{Ba}^{3/2}}{d^2}$$

ou seja, a corrente depende da d.d.p. com uma potência 3/2 e do valor de e/m.

### Como medir a temperatura do filamento.

É utilizando um pirômetro óptico da Capintec Instruments modelo HOT SHOT RATIO-SCOPE 5. Recomendamos a leitura das páginas que foram retiradas do manual de instruções e estão transcritas no final da apostila. Poderão assim entender os princípios de funcionamento e

realizar as medidas necessárias da temperatura. Subseqüentemente às páginas do pirômetro seguem instruções sobre o procedimento experimental da prática.

## PROCEDIMENTOS.

O tubo a ser usado neste experimento é aquele referenciado como tubo diodo de demonstração da Leybold 555 610.

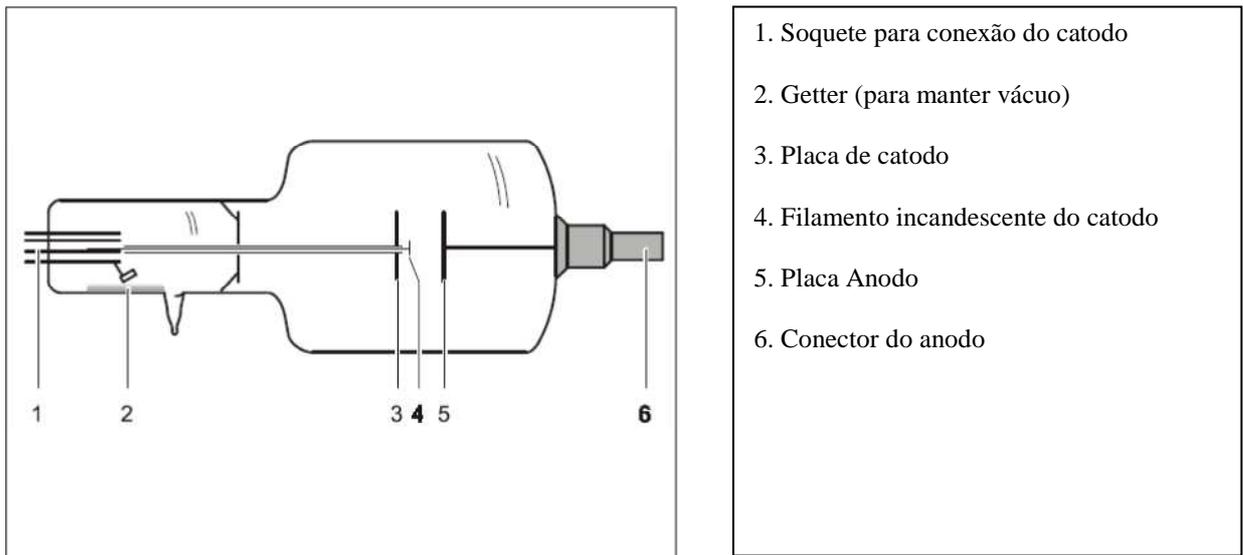
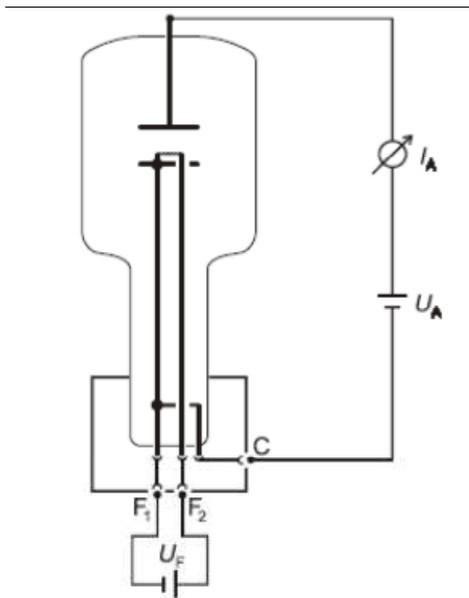


Figura 6. *Tubo diodo de demonstração Leybold 555610 mostrando seus elementos principais*

Folha de instruções do tubo se encontra em

[http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/BancoApostilasImagens/ApEfTermoionico\\_Tubo/TuboLeyboldDiodo-555610E.pdf](http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/BancoApostilasImagens/ApEfTermoionico_Tubo/TuboLeyboldDiodo-555610E.pdf)



$U_F$ . Tensão de aquecimento do filamento 0 até 6,3 V

$I_F$ . Corrente de aquecimento aprox 2,5<sup>a</sup> @ 6,3V

$U_A$ . Tensão de anodo de -500 até +500V

$I_A$ . Corrente de anodo aprox 6mA@300V@6,3V

Pressão  $<10^{-6}$  hPa.

Figura 7. Esquema de montagem elétrica para observar a emissão termiônica.

#### Instrumentos necessários:

- 1) Tubo de diodo demonstração Leybold 555 610
- 2) Suporte para o tubo de diodo com bobinas de Helmholtz da Leybold 555 581
- 3) Fonte de alimentação para o filamento do tubo
- 4) Fonte de alimentação para aplicar campo entre catodo e anodo até 500V cc
- 5) Fonte de alimentação para as bobinas de Helholtz, 30V-2<sup>a</sup>
- 6) Gerador de áudio
- 7) Resistor maior que 10k $\Omega$  1W
- 8) Osciloscópio 2 canais
- 9) Multímetros e miliamperímetros
- 10) Fios para conexões elétricas necessárias

1.- **EXPERIMENTO SOBRE CARGA ESPACIAL.**- Conforme foi visto na introdução, existe a emissão de elétrons por causa de aquecimento de um metal, o presente experimento trata observar essa emissão **sem a aplicação de campo elétrico entre catodo e anodo**. Monte o esquema elétrico da seguinte figura e obtenha vários parâmetros que configuram o comportamento de emissão em função da temperatura do filamento principalmente, para cada voltagem e corrente aplicado no filamento corresponderá uma temperatura a ser medida com o pirômetro óptico e conseqüentemente também haverá uma corrente muito pequena entre catodo e anodo, faça um gráfico respectivo e conclua.

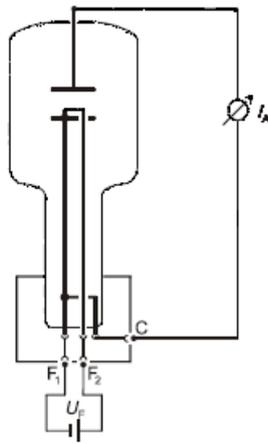


Figura 8. Esquema de montagem elétrica para observar carga espacial.

2.- **O EFEITO TERMOIONICO COM CAMPO APLICADO.**-Para efetivamente entender o efeito termo-iônico nada mais importante do que aplicar um campo elétrico entre cátodo e ânodo conforme o seguinte esquema

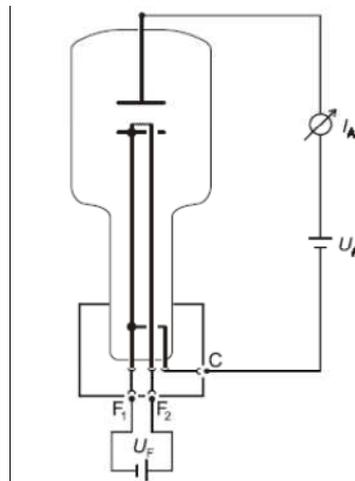


Figura 9. Esquema de montagem elétrica para observar o efeito termo-iônico aplicando campo elétrico

2(a).- Estando o filamento frio não haverá fluxo de corrente entre cátodo e ânodo, mesmo que aumente a tensão  $U_A$ . Verifique essa situação e explique. Aliás existem outros fenômenos físicos que dizem a respeito de emissão fria, saberia dizer o que é?

2(b).- Aumentando a temperatura do filamento parametricamente, podemos levantar pares de valores de corrente  $I_A$  e tensão aplicada entre cátodo e ânodo  $U_A$  e obter gráficos similares a

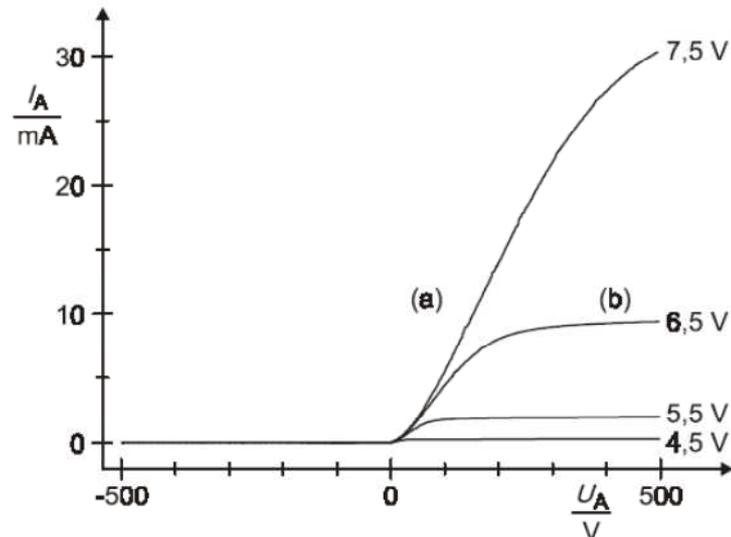


Figura 10. Exemplo de gráfico da corrente de emissão termiônica  $I_A$  em função da voltagem aplicada  $U_A$ .

Onde no lugar da voltagem paramétrica usada no filamento deverá colocar a temperatura medida com o pirômetro óptico.

3.- **EVIDENCIA DO FLUXO DE CORRENTE UNILATERAL.** - Usando tensão contínua CC, preste atenção ao amperímetro  $I_A$  que mede a corrente entre catodo e anodo e lembre como se comportou no experimento anterior, i.e. se foi positivo ou negativo, etc. Reverta a tensão aplicada e anote pares de valores de Voltagem  $U_A$  e corrente  $I_A$ . Grafique e compare com resultados anteriores quando a tensão aplicada não foi revertida e conclua.

4.- **DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO CARGA/MASSA  $e/m$ .**- Podemos mostrar que a trajetória realizada por um elétron num campo magnético com campo elétrico mutuamente perpendiculares é uma cicloide. O deslocamento vertical  $y$  de um elétron, medido desde uma superfície emissora, está dada por:

$$y_{corte} = d = \frac{2mE}{eB^2} = \frac{2mV_A}{eB^2d}$$

$$\text{então } \frac{e}{m} = \frac{2V_A}{d^2B^2}$$

A determinação experimental da corrente de corte  $I_{corte}$  pode ser obtida para diferentes temperaturas do filamento utilizando a montagem do seguinte esquema elétrico:

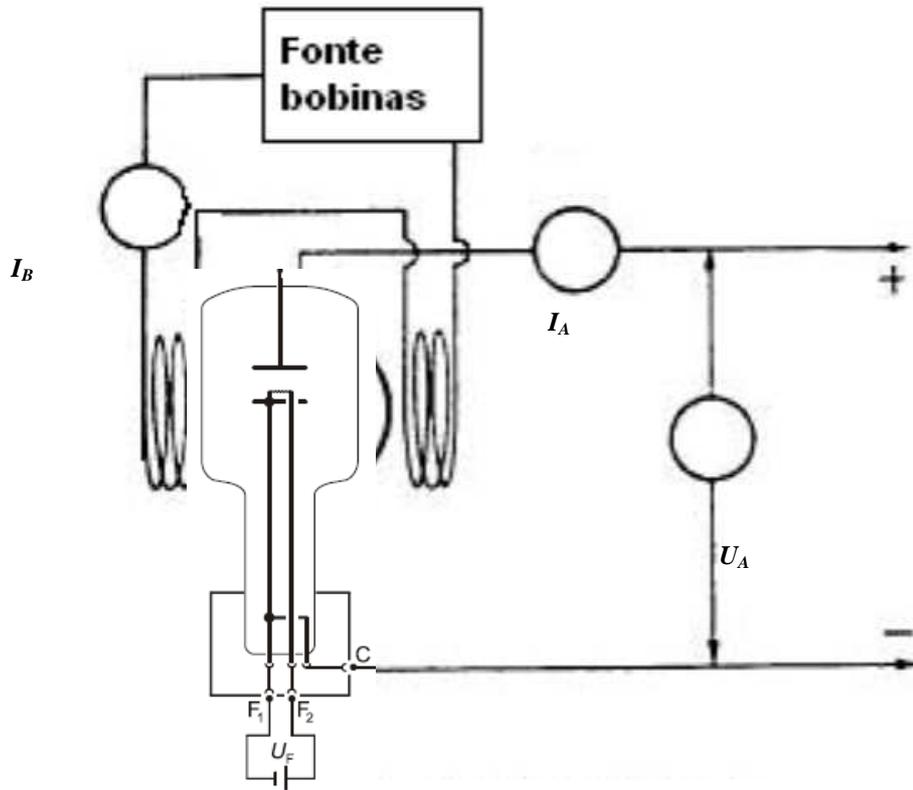
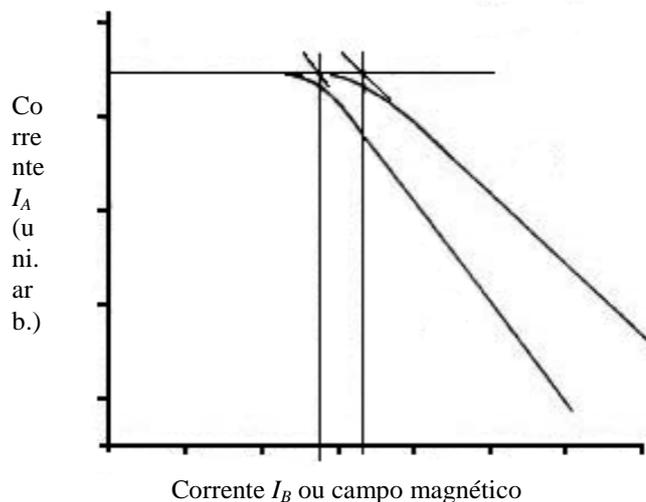


Figura 11. Esquema de montagem elétrica para determinação da relação carga/massa  $e/m$ .

A separação entre as placas (catodo-anodo) pode ser medida visualmente. O campo magnético pode ser determinado pelo valor da corrente  $I_B$  aplicada às bobinas de Helmholtz, o número de espiras (veja bem o valor) e a geometria das bobinas. Pares de valores de  $I_A$  e  $I_B$  podem ser graficadas, obtendo-se gráficos semelhantes a:



Determine  $e/m$  para várias condições de temperatura do filamento e aplicação de campo elétrico  $U_A$ , avalie seus resultados e conclua.

5.- **APLICAÇÃO COMO DIODO RETIFICADOR.**- Essa função de diodo retificador pode ser observada através do uso de uma fonte alternada (e.g. gerador de áudio)

representada por  $U_0 \sin \omega t$ , basta substituir o miliamperímetro que mede  $I_A$  por um resistor de  $10\text{k}\Omega$  ou maior que suporte carga de  $1\text{W}$  e no lugar da fonte de tensão que proporciona  $U_A$  uma outra fonte de tensão alternada.

Com o osciloscópio observe a queda de tensão que ocorre através do resistor e compare com o sinal de entrada da tensão alternada, descreva e conclua.

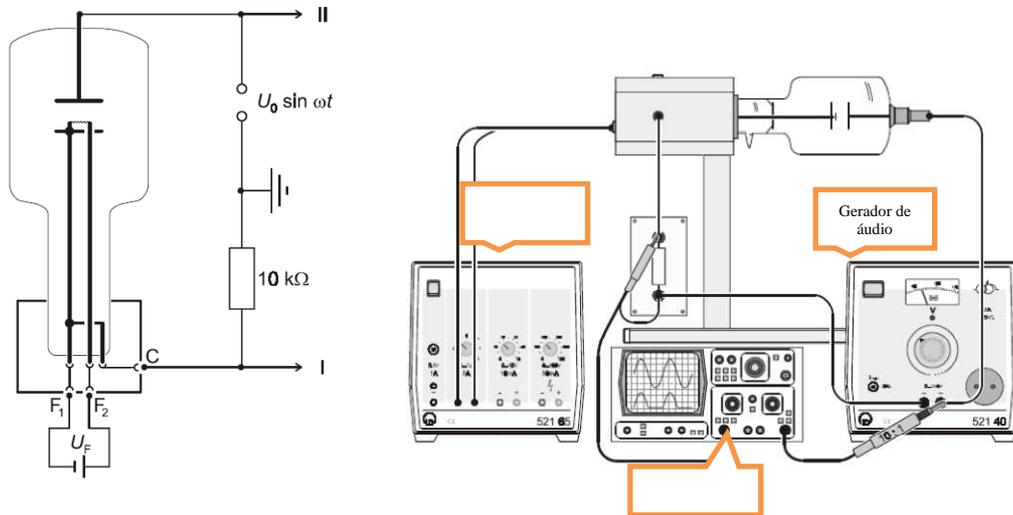


Figura 12. Esquema da montagem elétrica para observar o comportamento de diodo retificador.