

# O EXPERIMENTO DE FRANCK E HERTZ

## **Material Utilizado:**

- Para experimento com válvula de neônio:
  - 1 válvula de Franck–Hertz de neônio (LEYBOLD 555 870)
  - 1 soquete (LEYBOLD 555 871) para a válvula de Franck–Hertz de neônio com cabo múltiplo
  - 1 fonte dedicada ao experimento de Franck–Hertz (LEYBOLD 555 88)
  - 1 osciloscópio de dois canais
  - 2 cabos blindados, BNC / 4 mm
  - 7 cabos para conexão (elétrica)

**Objetivo do Experimento:** Demonstrar a quantização da energia através do espalhamento inelástico de elétrons por um gás monoatômico e medir a primeira energia de excitação do átomo.

---

## INTRODUÇÃO

Um gás monoatômico constitui um sistema físico bastante conveniente para demonstrar a quantização da energia em sistemas ligados. Historicamente, a quantização da energia de um átomo foi primeiramente evidenciada através de experimentos em espectroscopia, onde foram demonstradas a emissão e a absorção de radiação por gases atômicos em valores discretos de frequência  $\nu$ , correspondentes a transições entre estados quânticos separados energeticamente por  $\Delta E = h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck.

Consequentemente é esperado que a transferência de energia a átomos por qualquer mecanismo deva sempre ocorrer em quantidades discretas (para o átomo ligado – isto é, não completamente ionizado). Um tal mecanismo de transferência de energia é através de espalhamento inelástico de um elétron pelo átomo como um todo. Neste processo de colisão, uma vez que o átomo é muito mais massivo que o elétron, apenas uma fração muito pequena da energia cinética do elétron incidente é transformada em energia cinética de recuo do átomo (para a conservação da quantidade de movimento). Desta forma, se o átomo que é bombardeado não se torna ionizado, quase toda a energia do elétron incidente é transferida ao sistema atômico.

Em 1914 Frank e Hertz realizaram um experimento em que trocas energéticas entre elétrons livres e um sistema atômico foram investigadas. Especificamente, eles demonstraram (i) que é possível excitar átomos por bombardeamento de elétrons de baixa energia, (ii) que a energia transferida dos elétrons incidentes para os átomos tinham sempre valores discretos e (iii) que estes valores estavam em concordância com os obtidos em experimentos de espectroscopia para os níveis energéticos atômicos.

O aparato necessário para a realização deste experimento, representado esquematicamente na Fig. 1, consiste basicamente de uma válvula preenchida pelo vapor monoatômico em investigação, contendo em seu interior um filamento para a emissão de elétrons, uma estrutura adequada de grades (eletrodos) para a aceleração desses elétrons a um potencial (variável) desejado e uma arranjo para a medição da corrente eletrônica resultante. A tensão  $U_1$  entre a grade  $G_1$  e o catodo (*tensão de controle*) proporciona uma aceleração inicial aos elétrons emitidos pelo catodo, bem como controla a densidade espacial de elétrons nesta região. A tensão  $U_2$  (*tensão aceleradora*) acelera os elétrons entre as grades  $G_1$  e  $G_2$ , com o propósito principal de proporcionar colisões inelásticas entre estes e os átomos do vapor. A tensão  $U_3$  (*tensão desaceleradora*) desacelera os elétrons na região entre a grade  $G_2$  e o anodo.

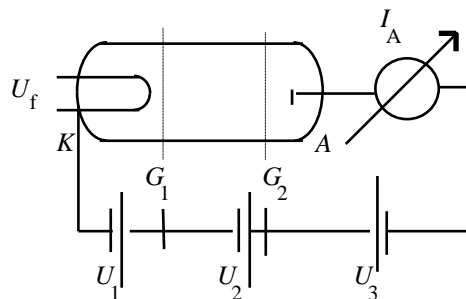


Fig. 1: Representação esquemática de uma válvula de Franck–Hertz

Para detectar a excitação de átomos no vapor, pode-se, por exemplo, observar a radiação emitida quando os átomos retornam a seu estado fundamental, ou qualquer fenômeno relacionado com esta emissão. Entretanto, uma técnica bastante conveniente (e utilizada no experimento de Frank-Hertz) consiste na *observação da corrente elétrica produzida pelo próprio feixe eletrônico*. A idéia fundamental é que, se os elétrons foram acelerados a um potencial exatamente *igual* à energia do primeiro estado excitado (na realidade, ligeiramente superior a esta energia, tendo em vista o recuo do átomo), alguns deles excitarão átomos do vapor e conseqüentemente perderão quase toda a sua energia; claramente, se tais elétrons, que foram espalhados inelasticamente, forem submetidos a um pequeno potencial retardador antes de serem coletados (pelo anodo), eles não serão capazes de superá-lo e não atingirão o anodo. Isto resultará em um forte decréscimo no fluxo de elétrons coletado pelo anodo.

A Fig. 2 mostra a configuração de potencial, correspondente à *observação de excitações múltiplas*, que será utilizada neste experimento. Nesta configuração, o potencial acelerador  $eU_2$  (onde  $e$  é a carga do elétron) entre as grades  $G_1$  e  $G_2$  é algumas vezes o valor da primeira energia de excitação  $\Delta E_1$  (isto é, a diferença de energia entre o primeiro estado excitado e o estado fundamental) do átomo investigado. Nesta condição, um elétron adquire uma energia cinética exatamente igual à primeira energia de excitação após ter percorrido apenas uma dada fração do caminho entre as grades  $G_1$  e  $G_2$ . Se o mesmo sofrer uma colisão inelástica com um átomo, ele perderá toda a sua energia cinética; subsequentemente, ele será acelerado novamente pelo campo elétrico entre as grades  $G_1$  e  $G_2$ , ganhando, após percorrer uma nova fração do referido percurso, energia suficiente para excitar um outro átomo. Desta forma, um dado elétron poderá experimentar várias colisões inelásticas (excitando um igual número de átomos) antes de chegar à grade  $G_2$ , quando terá uma pequena energia cinética remanescente. Se o potencial desacelerador entre a grade  $G_2$  e o anodo tiver um valor apropriado (que depende do número de colisões inelásticas experimentadas pelo elétron), este elétron não será capaz de superá-lo e portanto não alcançará o anodo. Uma vez que muitos elétrons experimentam um mesmo número de colisões inelásticas, este processo gerará um forte decréscimo no fluxo de elétrons coletado pelo anodo. Embora outras configurações sejam possíveis (especificamente, para a observação de excitações individuais ou para a medição do potencial de ionização do átomo), elas não serão aqui consideradas.

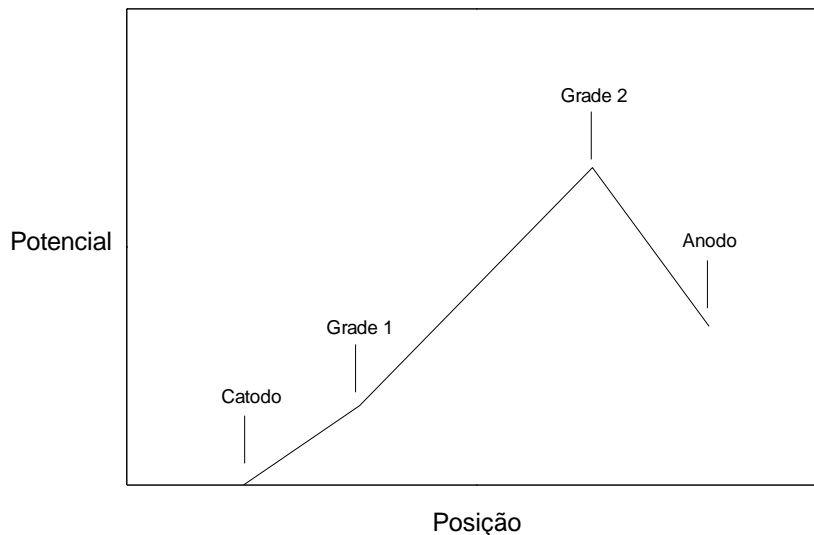


Fig. 2: Configuração de potencial elétrico na válvula de Franck–Hertz para a observação de excitações múltiplas.

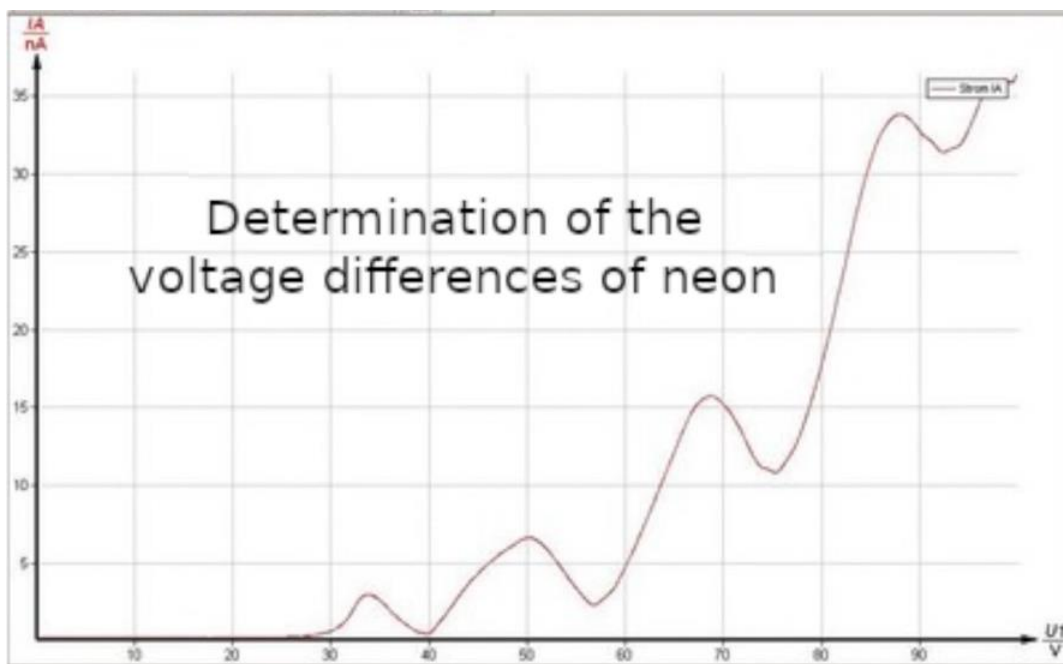
Uma maneira bastante conveniente de realizar o experimento no modo de observação de excitações múltiplas consiste em fornecer como tensão aceleradora  $U_2$  um sinal periódico do tipo “dente de serra” (como acima explicado, com uma amplitude da ordem de algumas vezes o valor  $\frac{\Delta E_1}{e}$ ), o que é adequado para o registro dos resultados na tela de um osciloscópio configurado para a operação “X-Y”. Se parte do sinal dente de serra é fornecido ao canal “X” do osciloscópio e a corrente eletrônica (coletada pelo anodo) é fornecida ao canal “Y”, então uma curva persistente “corrente eletrônica versus tensão aceleradora” será formada na tela do osciloscópio, uma vez que a tensão aceleradora (periódica) estará sincronizada com a varredura fornecida ao canal “X”.

Se a densidade do vapor monoatômico e as tensões de controle, aceleradora e desaceleradora forem ajustados adequadamente, a curva “corrente eletrônica versus tensão aceleradora” terá o aspecto de uma seqüência de picos superposta a uma curva crescente monotonicamente (aqui é importante notar que uma depressão no fluxo de elétrons para o anodo corresponde a um pico na corrente eletrônica convencional medida no sentido do catodo para o anodo). Estes picos não são perfeitamente bem definidos principalmente em decorrência da distribuição de velocidades dos elétrons emitidos termoionicamente pelo filamento. A corrente de anodo claramente depende das tensões  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ , bem como da densidade do vapor. O crescimento da tensão total  $U_1 + U_2$ , responsável pela aceleração dos elétrons, faz diminuir a probabilidade de colisões elásticas, por exemplo; a magnitude da tensão  $U_3$  determina a contribuição dos elétrons que experimentaram colisões inelásticas à corrente de anodo; a densidade do vapor através do qual o feixe eletrônico passa também influencia substancialmente os resultados, uma vez que uma densidade alta produz uma corrente de anodo elevada mas picos pouco pronunciados (e de modo contrário, uma baixa densidade produz uma

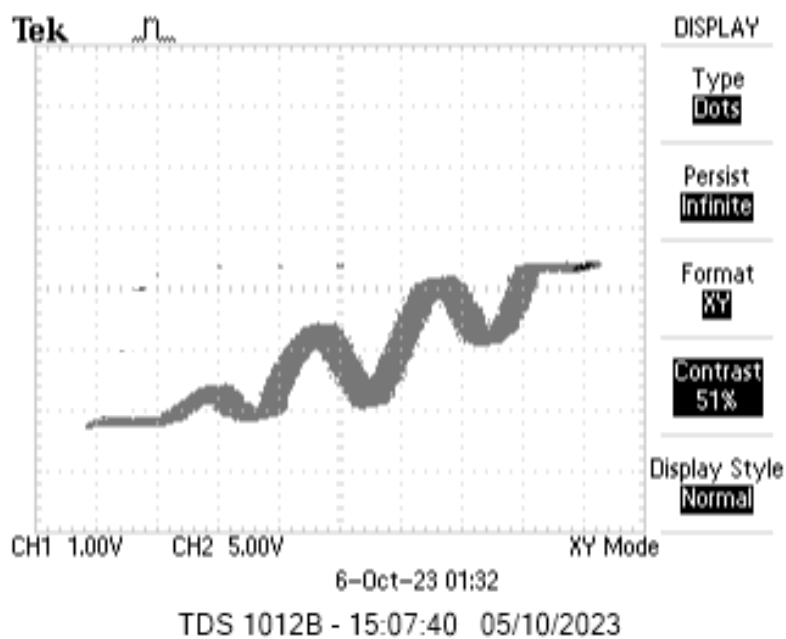
corrente mais fraca, mas picos maiores). Se o experimento é realizado com vapor de mercúrio (o tubo possui uma gota de mercúrio em seu interior), o ajuste da temperatura do tubo fornece o controle da densidade do vapor.

Um ponto importante é que **o experimento deve ser realizado com um gás monoatômico**. A razão é que, se um gás molecular é bombardeado com elétrons, podem ocorrer, como resultado de colisões inelásticas entre elétrons e as moléculas, transições entre estados quânticos moleculares, que estão energeticamente mais próximos uns dos outros (formando quase um espectro contínuo de energia). A ocorrência de tais transições degradaria a definição dos picos na curva “corrente eletrônica versus tensão aceleradora”, dificultando a observação de transições entre níveis atômicos. Alguns dos elementos preferidos para o experimento de Frank-Hertz são o mercúrio, o neônio e o argônio.

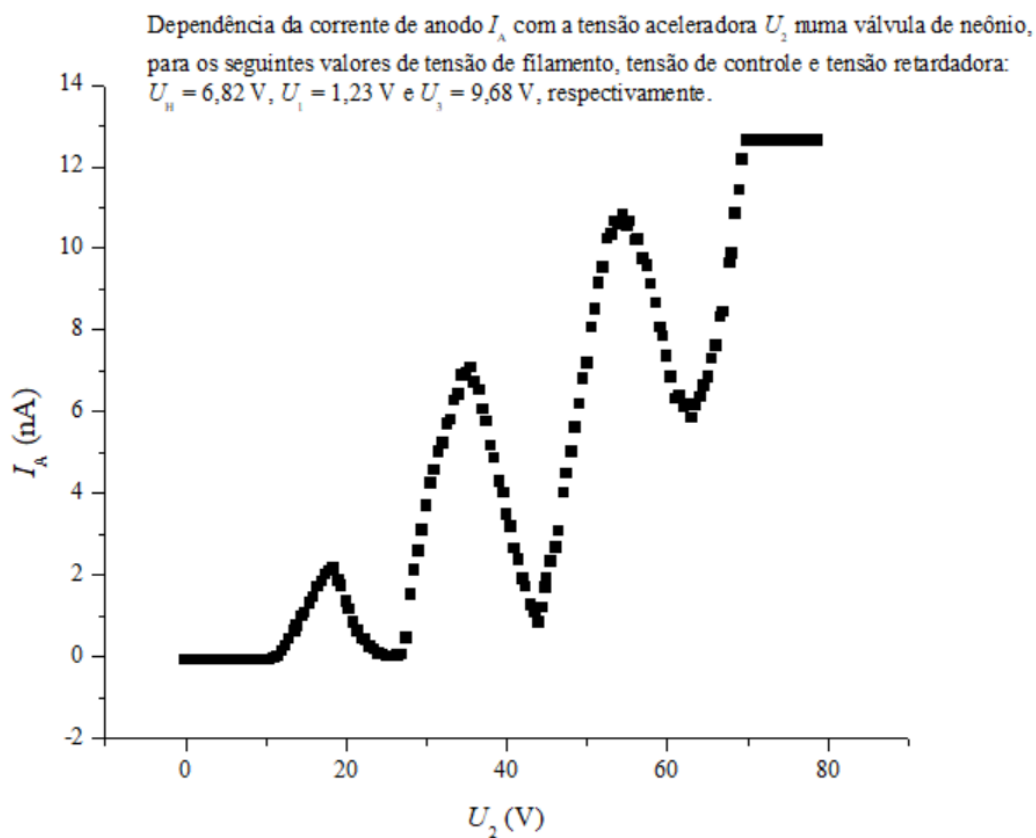
As figuras abaixo mostram resultados comumente obtidos com a válvula de neônio.



[*Experimental physics IV:16–Franck Hertz experiment*  
(2020–Lehrportal Uni Göttingen)]  
(<https://www.youtube.com/watch?v=Jckgt5X9p60>)



Curva  $U_A$  versus  $U_2/10$ , registrada no osciloscópio, com a fonte dedicada no modo “rampa”.



Curva  $I_A$  versus  $U_2$ , “ponto a ponto”, com valores de  $I_A$  versus  $U_2$  registrados no mostrador digital da fonte dedicada.

(Outubro de 2023–Djalma Nardy Domingues) (DEFIS, UFOP)

A duas últimas figuras, acima, mostram o resultado que obtivemos recentemente com o equipamento do DEFIS–UFOP. Note a saturação da corrente de anodo para valores mais elevados da tensão aceleradora, impossibilitando a visualização de um (esperado) quarto pico. Isto significa que, em princípio, não se chegou à melhor combinação de valores para as tensões de controle ( $U_1$ ), desaceleradora ( $U_3$ ) e de filamento ( $U_H$ ).

## PROCEDIMENTO

### Experimento com a válvula de neônio

Se se escolher utilizar a válvula de neônio, então o experimento poderá ser realizado à temperatura ambiente e, neste caso, todos os passos abaixo relativos à utilização do forno devem ser omitidos. Também um outro soquete (LEYBOLD 555 871), para a válvula de neônio, deve ser utilizado. Veja representação esquemática da montagem experimental na Fig. 4. As diversas tensões para a realização do experimento também devem ser modificadas de acordo com a tabela abaixo.

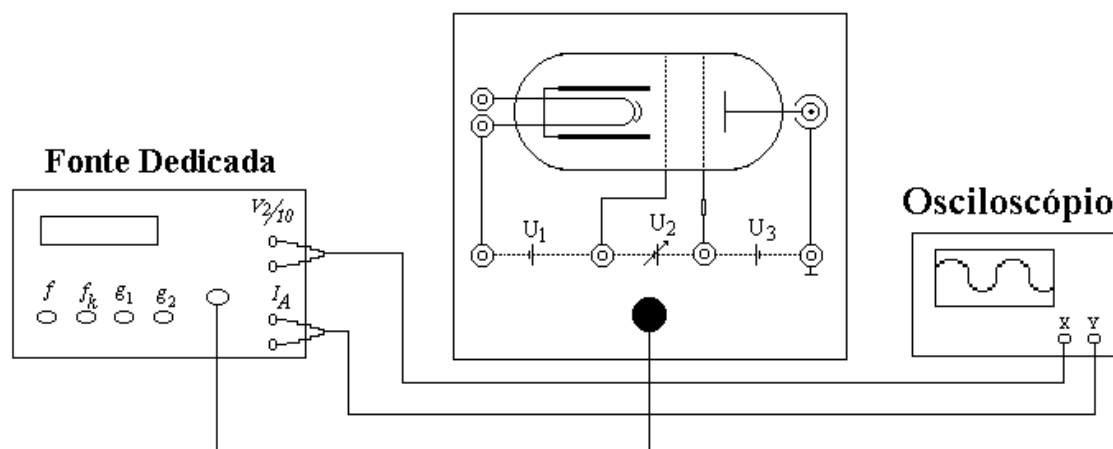


Fig. 4 – Montagem experimental para o experimento de Franck–Hertz com a válvula de neon.



Dados Técnicos	Válvula de Neônio
Energias de Excitação dos Átomos de Neon	16 a 18 eV
Filamento	6,3 V / 0,4 A
Tensão de Controle	0 a 5 V CC
Tensão de Aceleração	0 a 80 V CC
Tensão de Desaceleração	0 a 4 V CC

1. Insira a válvula de neônio no soquete apropriado.
2. Certifique-se de que todas as chaves seletoras de tensão da fonte dedicada encontram-se na posição de mínimo antes de ligá-la. Realize a conexão entre a fonte e o soquete através do cabo múltiplo. Ligue a fonte dedicada. Insira um voltímetro no circuito de forma a permitir a medição da tensão de filamento  $U_H$ . O voltímetro deve ficar em paralelo com o par de bornes pertinentes, disponíveis no soquete da válvula.
3. Ligue o osciloscópio e faça uma calibração (automática) do mesmo, bem como o ajuste preliminar de foco e intensidade. Configure o osciloscópio para a operação no modo “X-Y” (consulte seu manual de instruções para tanto).
4. Conecte a saída “ $U_2 / 10$ ” da fonte dedicada ao canal “X” do osciloscópio. É importante saber, para o propósito de medir a tensão de aceleração no osciloscópio, que o canal “X” deste está sendo alimentado com um sinal 10 vezes menor que aquele aplicado entre as grades  $G_1$  e  $G_2$ . Conecte a saída “ $U_A$ ” da fonte dedicada ao canal “Y” do osciloscópio. A partir deste ponto você estará observando na tela do osciloscópio a curva “corrente de anodo  $I_A$  versus tensão aceleradora  $U_2$ ”.
5. Inicialmente vamos fazer uma pré-visualização da curva corrente de anodo versus tensão aceleradora. Você pode optar entre os seguintes **modos de operação**, determinados pela posição da chave seletora de modo de operação (AUTO (dente de serra ou rampa)–RESET–MAN–CASSY) da fonte dedicada:

- 5a. Coloque a chave seletora na posição “**dente de serra**” (indicado pelo símbolo correspondente a esta forma de onda). Ao fazer isto estará se submetendo o par de grades  $G_1 - G_2$  a uma tensão aceleradora  $U_2$  periódica na forma de um sinal de dente de serra.
- 5b. Coloque a chave seletora posição “**rampa**” (indicado pelo símbolo correspondente a este formato). Neste caso a tensão aceleradora  $U_2$  crescerá gradualmente a partir de zero, produzindo apenas uma varredura.
- 5c. Coloque a chave seletora posição “**MAN**”. Neste caso, a tensão aceleradora  $U_2$  poderá ser gerada de forma contínua e manual, a partir de um valor mínimo (0 V) até um valor máximo (80 V).
6. O próximo passo consiste em **observar** (no osciloscópio) a curva “**corrente eletrônica versus tensão aceleradora**” e “**otimizá-la**”. Mas o que significa isto? A ideia é que, tendo em mente que a tensão aceleradora poderá variar no intervalo de 0 V a 80 V (para qualquer dos modos de operação supracitados) e que a primeira energia de excitação  $\Delta E_1$  do átomo de neônio é aproximadamente 18 eV, idealmente deve ser possível visualizar 4 picos na referida curva, correspondente à possibilidade de ocorrer até 4 colisões inelásticas entre um elétron e os átomos de neônio. Entretanto, **a qualidade dessa curva depende de uma combinação ideal de valores** das tensões **de** controle ( $U_1$ ), desaceleradora ( $U_3$ ) e de filamento ( $U_H$ ). Tais tensões podem ser ajustadas manualmente. Com relação às tensões de controle ( $U_1$ ) e desaceleradora ( $U_3$ ), coloque a chave seletora associada ao mostrador digital na posição  $U_1$  ou  $U_3$  e atue no potenciômetro correspondente. Os valores de  $U_1$  e de  $U_3$  **devem ser ajustados** nos intervalos de de 0 a 4 V e 0 a 10 V, respectivamente, **até se obter a melhor definição na sequência de picos**. Sugerimos, como “pontos de partida” para os valores de tais tensões  $U_1 \sim 1,5$  V e  $U_3 \sim 8,0$  V. **Para ajustar** a tensão de filamento  $U_H$ , você deverá **atuar no potenciômetro situado na parte traseira da fonte dedicada**.

7. Uma vez otimizada a curva, **salve a imagem** observada na tela **na forma de arquivo**. A mesma **deve ser mostrada na folha de resultados**, com uma legenda adequada. Reduza a voltagem de saída da fonte a zero. Em seguida, você fará o **levantamento da dependência  $I_A$  versus  $U_2$ , ponto a ponto, no modo manual**, atuando no potenciômetro “ $U_2$ ” e fazendo as leituras de  $U_2$  e  $I_A$  registrados no mostrador digital, mudando, alternadamente, a chave seletora entre as posições correspondentes às leituras dessas grandezas. **Registre** os valores de  $U_2$  e  $I_A$  na tabela da folha de resultados. Você deverá selecionar 160 valores regularmente (aproximadamente) espaçados para os valores de  $U_2$ . Em tese espera-se que esta coleta manual tenha mais qualidade que aquela obtida da curva registrada no osciloscópio. Porquê?
- 8 **Construa** um **gráfico  $I_A$  versus  $U_2$** , com legendas e título apropriados.
9. Localize, no gráfico que você construiu, os valores de correspondentes de  $U_2$  aos picos identificados. **Registre** na tabela apropriada a correspondência entre a **posição ( $U_2$ )** desses picos com o número de ordem  **$N$**  do mesmo.
10. O intervalo (no valor de  $U_2$ ) entre máximos consecutivos na curva  $I_A$  versus  $U_2$ , quando expresso em elétron-volts, corresponde à energia cinética de um elétron que pode ser absorvida pelos átomos de neônio num evento de colisão. O número de máximos observado na curva corresponde ao número de colisões inelásticas que um elétron pode experimentar. Estamos trabalhando com a perspectiva de que os intervalos entre máximos consecutivos são iguais. Na verdade, trata-se de uma simplificação fundamentada nas ideias de que apenas uma energia de excitação do átomo neônio (a primeira energia de excitação  $\Delta E_1$ ) é relevante na discussão e que podemos ignorar as influências, na corrente de anodo, da distribuição de velocidade dos elétrons que emergem do catodo ou do espalhamento dos mesmos. Construa um **gráfico  $eU_2$  versus  $N$**  correspondente a tais pontos. Espera-se que esta dependência seja linear. Faça um **ajuste linear** do mesmo e **registre** os **parâmetros de ajuste** correspondentes. **Registre  $\Delta E_1$** , que é a inclinação deste gráfico nos fornecerá.

## FOLHA DE DADOS E RESULTADOS

### A Quantização da Energia – O Experimento de Franck e Hertz

TENSÃO DE CONTROLE:  $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  V

TENSÃO DESACELERADORA:  $U_3 = \underline{\hspace{2cm}}$  V

LEVANTAMENTO DA CURVA  
CORRENTE DE ANODO VERSUS TENSÃO ACELERADORA

$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$

LEVANTAMENTO DA CURVA  
CORRENTE DE ANODO VERSUS TENSÃO ACELERADORA

$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$	$U_2(V)$	$I_A(nA)$

DEPENDÊNCIA DO  
POSICIONAMENTO DO PICO (V) COM SEU NÚMERO DE ORDEM

$N$	$U_2(V)$

PARÂMETROS DE LINEARIZAÇÃO  $eU_2(\text{eV}) = \alpha V + \beta$

$$\alpha = (\text{_____} \pm \text{_____}) \text{ eV}$$

$$\beta = (\text{_____} \pm \text{_____}) \text{ eV}$$

PRIMEIRA ENERGIA DE EXCITAÇÃO DO ÁTOMO DE NEÔNIO

$$\Delta E_1 = (\text{_____} \pm \text{_____}) \text{ eV}$$