

Projeto para o curso F 609A - Tópicos de Ensino de Física I

Tube de Raios Catódicos

Orientador: Prof. Dr. Luís Eduardo E. de Araújo
Departamento de Eletrônica Quântica – Unicamp
Orientando: Marcos Moreira Junior
Curso: 40 - Licenciatura em Física
Ano: 2011

Palavra chaves: Cathode ray tube, Crookes tube, datasheet 555, flyback.

1 - Cópia do projeto:

Tema do projeto:

Construção de um tubo de Crookes também conhecida como tubo de raios catódicos. O modelo que será construído será semelhante ao usado por Julius Plücker e Johann Wilhelm Hittorf publicado no Poggendorffs annalen der Physik und Chemie 1858 [1]. Este tubo foi usado para demonstrar a influência do campo magnético sobre um feixe de elétrons, mais tarde em 1827 Thomson estudando os raios catódicos descobriu o elétron [2] e [7].

Importância:

Com o invento do tubo de raios catódicos a física ganhou um instrumento valioso de estudo de física básica e da estrutura da matéria.

Com esse instrumento e os novos conhecimentos adquiridos com ele, houve um rápido desenvolvimento de novas tecnologias, como o surgimento das válvulas, que possibilitou a criação dos primeiros computadores eletrônicos, o imageamento por raios x, as primeiras câmeras de vídeo, as telas para reprodução de imagens de TV os TRC (tubos de raios catódicos) [1], entre outras.

A possibilidade de um estudante poder perceber, pela luz emitida por um anteparo com material fluorescente, que há algo sendo transportado de um eletrodo ao outro, quando é aplicada uma tensão sobre eles pelo espaço onde não existe ar, e que esse algo se chama elétrons, além disso poder ver o efeito da interação dos elétrons em movimento na direção perpendicular a um campo magnético, que resulta na deflexão do feixe de elétron [7] e [8], tudo isso torna real a teoria ensinada em sala de aula.

A experiência, por materializar algo abstrato para o aluno, e portanto “irreal”, em algo real, dá valor ao novo conhecimento adquirido, além de ajudar a limpar a imagem de que ciência é algo distante de seu cotidiano, restrito a alguns poucos escolhidos, mostra através da história que o conhecimento e as tecnologias são feitas de pequenas contribuições e muita paciência.

Projeto:

Consiste de um tubo de vidro evacuado, provido um eletrodo em cada extremidade, uma placa de alumínio com um rasgo retangular central para colimar o feixe e uma placa de alumínio na longitudinal ao tubo onde será depositado fósforo branco que fluorecerá quando atingido por elétrons, figura1.

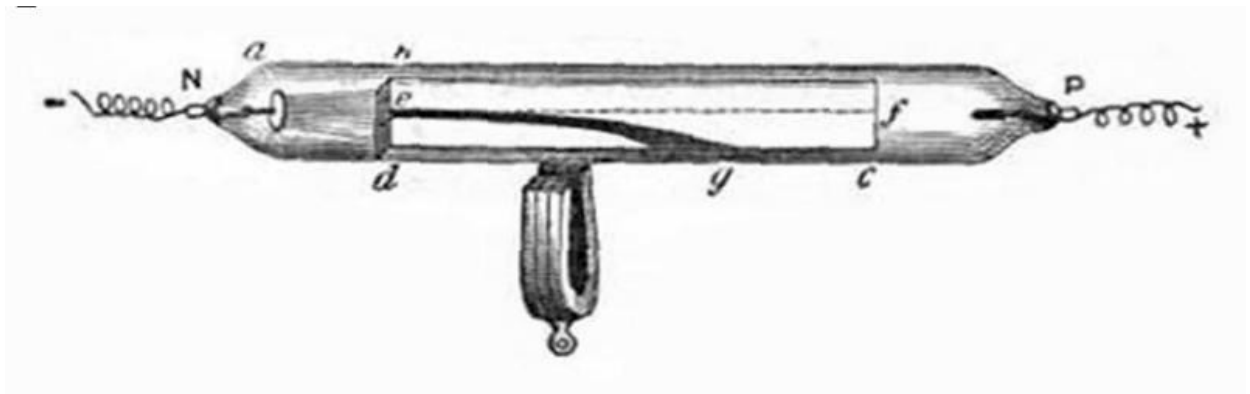


Figura 1: Tubo de Crookes, utilizado para demonstrar a deflexão dos raios catódicos, publicada na "[William Crookes \(November 1879\) On Radiant Matter, Popular Science Monthly, London, p.158.](#)
Copiado do site: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crookes_magnetic_deflection_tube.png.

Será usado para o projeto mecânico materiais descartados, uma lâmpada fluorescente tubular, uma lâmpada fluorescente compacta, e uma lata de refrigerante, seguindo os passos.

1 – A lâmpada fluorescente será cortada, e lavada.

2 – O fósforo branco retirado na lavagem será reutilizado para compor a superfície fluorescente indicadora da presença do feixe de elétrons que aparece como o item 6 na figura 2.

3 – A chapa, a qual o fósforo será depositado, item 6, e o anteparo com furo para colimar o feixe, item 4, serão confeccionados com alumínio de lata de refrigerante.

4 – Os eletrodos, cátodo e ânodo, serão feitos com botões usados em calça jeans, seu uso se justifica por muitos deles terem uma superfície lisa e arredondada feita de aço.

5 – O tubo de vidro retirado de uma lâmpada fluorescente compacta, após lavagem, será soldado ao corpo do tubo de raios catódicos, seu propósito é o de poder realizar vácuo no seu interior, conforme mostrado no item 3 da figura 2 .

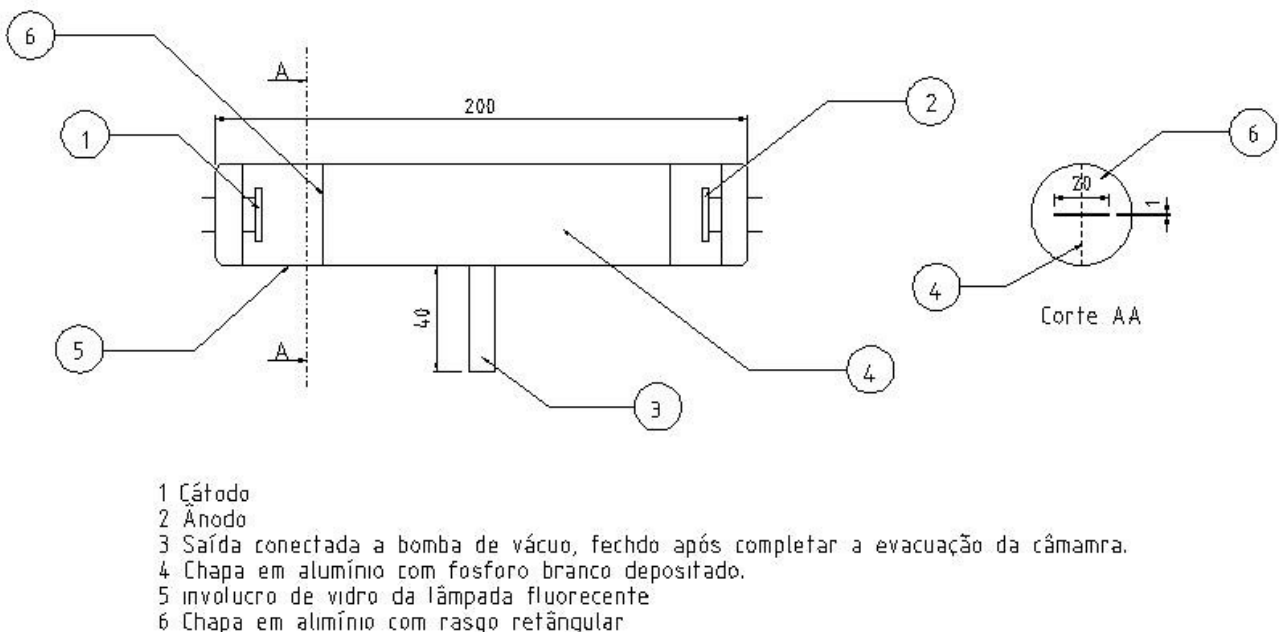


Figura 2: Projeto mecânico usando lâmpada fluorescente descartada. Desenhado no software livre LibreCAD.

Lista de materiais:

Quantidade	Descrição
1	Lâmpada fluorescente tubular;
1	Lâmpada fluorescente compacta;

2	Botões em aço com superfície lisa usados em calças jeans;
1	Lata de refrigerante.

Para o acionamento do tubo de raios catódicos, emissão de cátodo frio, será construída uma fonte de alta tensão. Ela consistirá de uma fonte de corrente contínua comercial de baixa tensão, um oscilador astável de onda quadrada [4], com um transistor auxiliar (Q1), para acionar um transformador flyback (transformador usado para gerar altas tensões em televisores com tubos de raios catódicos), e um circuito retificador de alta tensão (HV DIODE), como ilustrado na figura3.

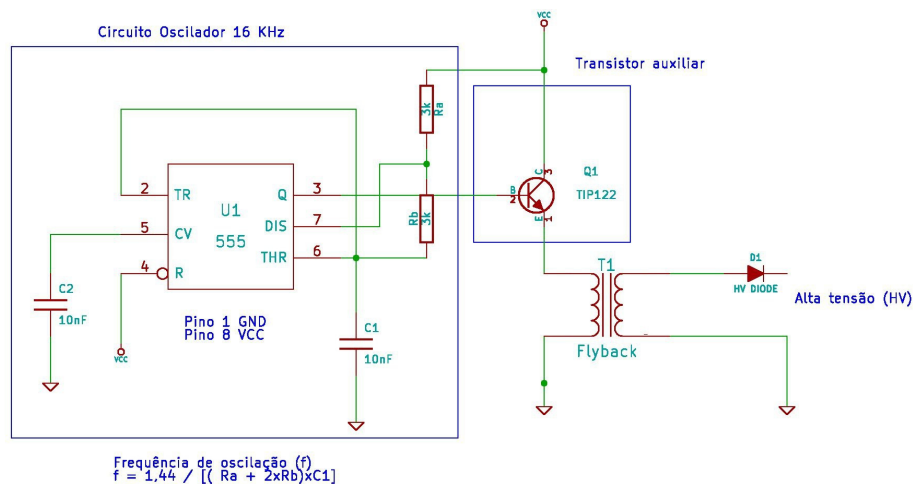


Figura 3: Esquema circuito da fonte de alta tensão, desenhado no software livre Kicad.

A frequência do oscilador escolhida, 16 KHz, tem esse valor porque a frequência de ressonância do flyback está em torno de 15 KHz [10], e por ser possível encontrar os valores comerciais exatos de Ra e Rb. A pinagem do flyback será determinada de acordo como o modelo usado.

Lista de materiais:

Quantidade	Descrição
1	CI 555 (LM555N, NE555, ou similar) - U1;
2	Resistores 3 kΩ 1/8 W – Ra e Rb;
2	Capacitores cerâmicos 10 nF – C1 e C2;
1	TIP122 – Transistor – Q1;
1	Transformador flyback (modelo a determinar) – T1;
1	Fonte de corrente contínua 12 V 5 A;
1	Placa para montagem;
1	Caixa plástica.

A maior parte dos componentes eletrônicos, será reaproveitado de sucata.

Originalidade:

O projeto proposto é bem conhecido, há vários exemplos de tubos de raios catódicos construído de diversos formatos tanto no brasil quanto no exterior, são achados com muita frequência no YouTube, como mostrado nas referências [5] e [6].

Declaração :

Eu Marcos Moreira Junior declaro que fornecerei todo o material para o experimento.

Meu orientador, o Prof. Dr. Luiz Luís Eduardo E. de Araújo concorda com os termos aqui estabelecidos para o projeto e declara que poderá dispor de todos os elementos necessários a menos de exceções indicadas embaixo.

Exceções: ("NÃO HA").

Sigilo: (SOLICITA-NÃO)

Referências:

[1] <http://www.crtsite.com/page7.html>

Página que tem por objetivo contar a história da física de instrumentos de laboratório como tubos de raios catódicos, tubos de raios x, da eletrônica feita em vidro como as antigas câmaras de tubo.

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson

Wikipédia, Thomson - referência do estudo dos raios catódicos por Thomson e sua descoberta do elétron.

[3]

<http://www.electrotherapymuseum.com/Library/SirWilliamCrookes/pages/1880Crookes0015.htm>

Texto começa no final da página

A página pretende ser um museu de invenções estranhas e esquisitas perdidas na história, relacionadas a eletricidade e seu uso em terapia.

[4] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>

Folha de dados (datasheet) do componente LM555N da Texas Instruments

[5] <http://www.youtube.com/watch?v=vIf9sTeKUTo>

Demonstração de alguns tipos de tubos de raios catódicos

[6] <http://www.youtube.com/watch?v=ITBBbR941jY>

Demonstração didática de um tubo de raios catódicos do mesmo modelo proposto no projeto.

[7] Halliday, D. - Fundamentos da Física, vol. 3, 6ª ed. – páginas 138 a 156.

[8] Raymond A. Serway / John W. Jewett, Jr. – Princípios da Física, vol. 3, 3ª ed. – páginas 825 a 831.

[9] http://www.feiradeciencias.com.br/sala15/15_37a.asp

Página que se dedica a divulgar temas relacionados a feira de ciências.

[10] <http://www.electronics-lab.com/projects/misc/001/>

A página Electronics Lab, se dedica a divulgação de circuitos eletrônicos em geral.

[11]

http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2004/003320Ricardo-Nagai-RF.pdf

Válvula diodo para estudo termoiônico.

[12]

2 -Resultados Obtidos:

Utilizando uma lâmpada fluorescente “queimada”, foi construído um protótipo do tubo de raios catódicos, para criar vácuo no interior do tubo um compressor de geladeira foi utilizado bomba de vácuo. O protótipo difere do projeto original, por ter o tubo que vai ligado a bomba de vácuo, localizado na lateral ao junto ânodo, figura 6, enquanto no projeto original, esse tubo está localizado na posição central do tubo de raios catódicos, como visto na figura 2 item 3.

No protótipo foi usada massa plástica como vedante da conexão que vai ligada a bomba de vácuo, isso facilita a abertura para poder fazer ajustes no tubo de raios catódicos.

Na figura 4, vemos as partes em separado do tubo de raios catódicos antes da montagem, elas são:

1. o tubo de vidro da lâmpada fluorescente após ser cortado;
2. os eletrodos feitos com botões de calças jeans;
3. a peça composta de colimador mais a tela fluorescente, feitas em alumínio.

A figura 5 mostra como deve ser o posicionamento das peças que formão o tubo de raios catódicos.

O circuito eletrônico já esta operacional, sendo preciso resolver um aquecimento do oscilador 555 que esta com sobrecarga.

Os testes mostram um arco formado entre cátodo e o colimador, e novamente se formando no extremo da tela fluorescente até o ânodo, figura 6.

O esperado é a formação de um feixe de elétrons entre o cátodo e ânodo, sendo a função do colimador a de permitir a passagem de um feixe estreito de elétrons, de forma que esses elétrons ao se chocarem com a tela, produziriam uma fluorescência na cobertura de fosforo branco que a reveste, essa fluorescência apareceria como linha reta ao longo da tela. Tanto o colimador como a tela não devem conduzir os elétrons como observado nas figuras 6 e 7.

O próximo passo é melhorar o vácuo usando técnicas de adsorção em carvão ativado, e por sublimação de um fio metálico aquecido.

A técnica por carvão ativado é simplesmente usar um elemento de grande área superficial para reter os gases no sistema, isso é feito aquecendo o carvão ativado em vácuo, para que os gases retido nele sejam expulsos pela bomba mecânica, em seguida, com o sistema fechado e a bomba mecânica isolada, o carvão ativado é resfriado, para que dessa forma ele retenha o restante dos gases na câmara.

A técnica por sublimação, muito utilizada na confecção de válvulas eletrônicas, uma corrente elétrica provoca seu aquecimento em um fio metálico até o ponto onde o metal começa a evaporar e a depositar nas paredes internas da válvula, esse filme fino formado pela deposição de metal possui alta capacidade de adsorver os gases dentro da válvula [14] e [15].

O circuito eletrônico pode ser visto na figura 3, a ele será acrescentado um amplificador operacional e um transistor, esse dois componentes terão a função de isolar o circuito oscilador do transistor que controla o transformador flyback, já que o oscilador 555 está apresentando aquecimento devido a elevada corrente necessária para ativar o transistor T122.

Outro ponto que foi mudado no circuito original, é o uso de dois trim-pots multivoltas (pequenos potenciômetros multivoltas) no lugar dos resistores dos resistores Ra e Rb, isso é necessário para ajustar largura do topo da onda quadra que entra no flyback, pois seu funcionamento depende de um sinal que não é simétrico, os novos Ra e Rb possibilitam achar a ressonância do circuito formado pelo resistor conectado a entrada do flyback e sua bobina primário. O resistor de 3Ω 7W acrescentado limita a corrente que chega ao flyback evitando sua queima.

O passo final será o acondicionamento do circuito eletrônico em uma caixa, e a montagem do tubo em um suporte.

3 -Fotos:

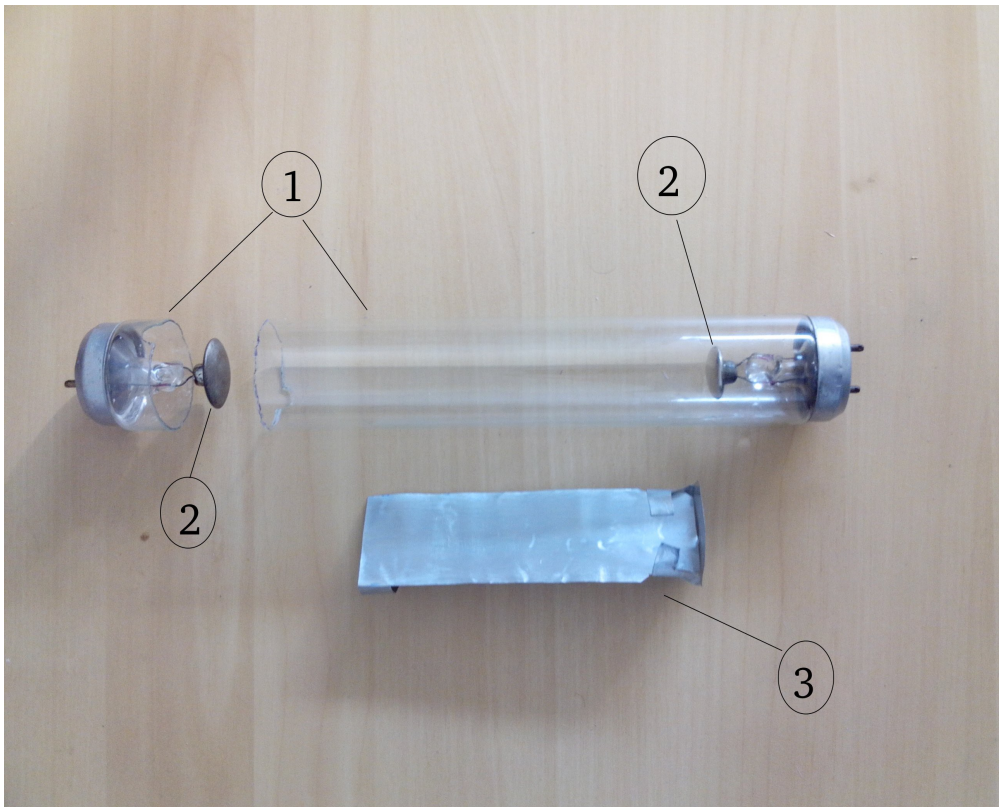


Figura 4: Peças do protótipo (1) tubo de vidro, (2) eletrodos, (3) Colimador e tela em alumínio .



Figura 5: Conjunto montados

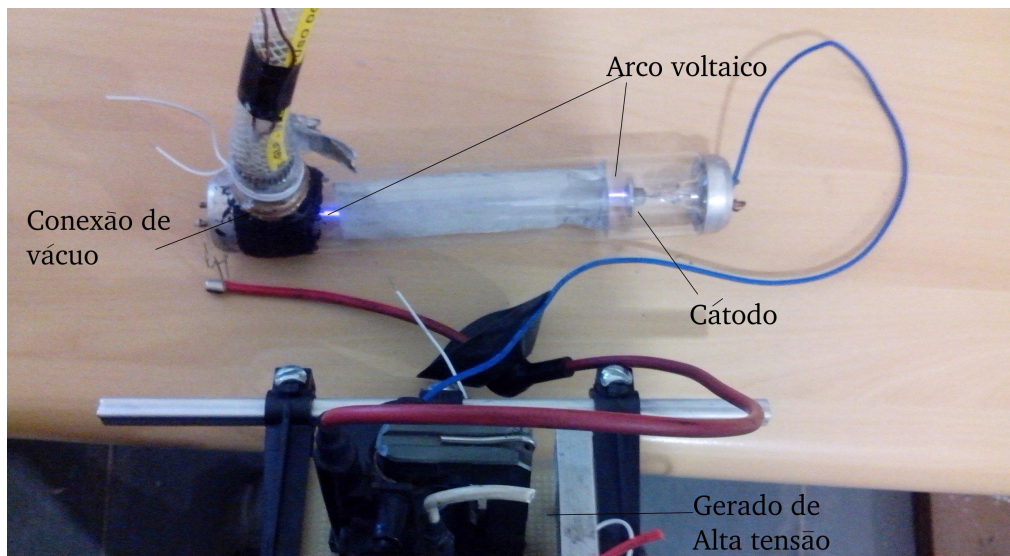


Figura 6: Protótipo do tubo de raios catódicos montado em conjunto com a fonte de alta tensão.

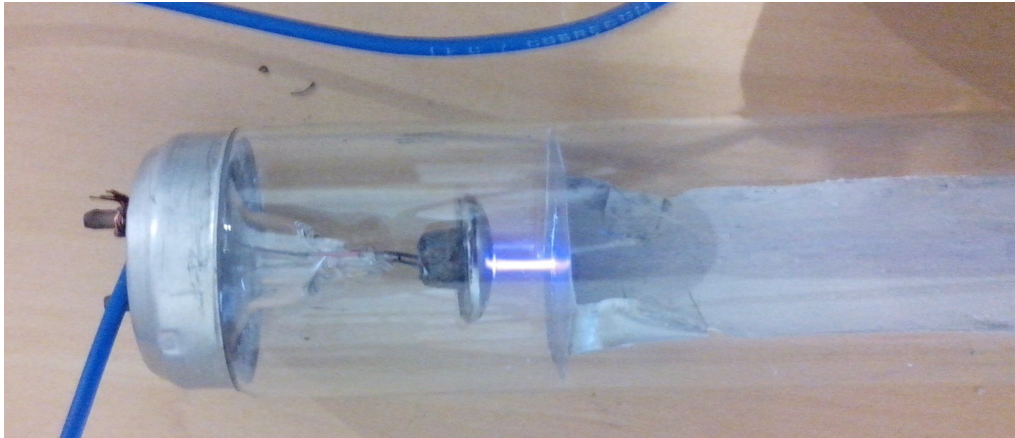


Figura 7: Aproximação onde se observa um arco se formando entre o cátodo e o colimador de alumínio.

4 - Dificuldades e Soluções:

As dificuldades estão concentradas em fazer a união entre as partes de vidro e a conexão de vácuo, a massa plástica funciona muito bem para fazer testes, mas retém muito gás por ser porosa.

O tubo não será selado com vidro por três motivos:

1. O corpo do tubo de raios catódicos deve ser preaquecido para que ele não rache, isso é fácil para tubos de pequenos diâmetros, mas para diâmetros como o usado no projeto exige uma certa prática.
2. O uso da placa de fenolite na confecção da peça do colimador e da tela fluorescente exige que não seja aplicada altas temperaturas sobre ela, o calor acarretaria sua decomposição.
3. Os eletrodos são soldados com estanho 60% e chumbo 40%, liga comumente usada em soldagem de componentes eletrônicos, que se funde a 290 °C.

Esses problemas podem ser solucionados utilizando um par de flanges, que serão confeccionadas com alumínio fundido, usando moldes de gesso para dar forma, o processo relativamente simples, já que o alumínio tem ponto de fusão em 660 °C.

Uma das flanges será fixada ao tubo vidro com cola epóxi, pois o epóxi possui boa aderência ao vidro, permitindo boa vedação e por não possuir solventes voláteis, o que traria problemas para a obtenção de vácuo, a outra flange, fará a conexão do tubo de raios catódicos ao sistema de vácuo. Será usado como vedante entre as flanges um anel de alumínio [16], a vedação se dará por esmagamento do anel entre as duas flanges. Os testes feitos para a fundição da flange pode ser vistos nas figuras 8, 9 e 10.

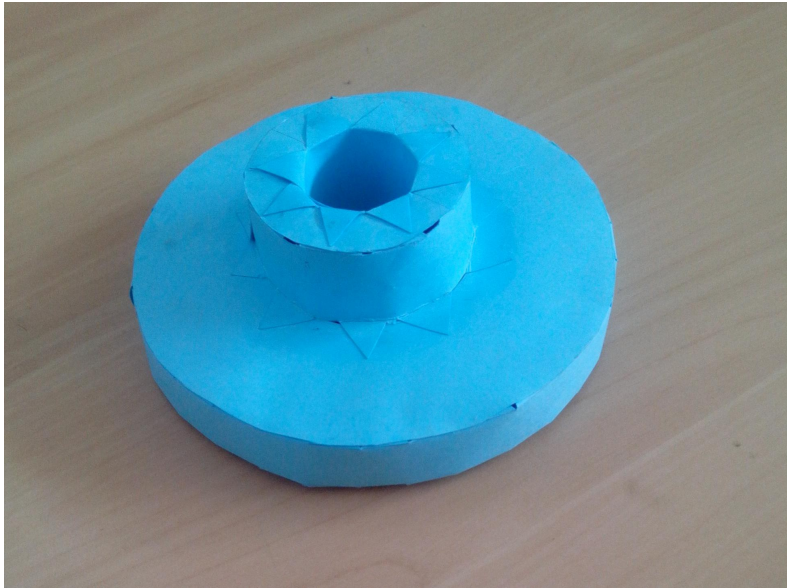


Figura 8: Modelo de flange de teste, usada na confecção do molde em gesso.



Figura 9: Molde em gesso.



Figura 10: Flange em alumínio.

Para criar as peças finais será usada a técnica de molde por cera perdida. Esta técnica consiste na criação de um modelo em cera da peça final para depois cobri-la com gesso, deixando aberturas no molde de gesso para a entrada do metal líquido e para as saídas dos gases. Após a secagem do molde de gesso, a cera será derretida, deixando uma cavidade a qual será preenchida com alumínio derretido, esta técnica permite a criação de peças com alta precisão, requerendo muito pouco acabamento [17] e [18].

Atenção, o molde de gesso deve estar muito bem seco, ele é submetido a secagem em forno por algumas horas antes de se colocar o metal derretido, caso o molde esteja ainda úmido, a alta temperatura do metal derretido em contato com a umidade no molde poderá gerar um excesso de gás dentro do molde, isso poderá acarretar sua explosão, causando queimaduras sérias.

Observado as figuras 6 e 7, vemos que o colimador e a tela de alumínio, impossibilitam que os elétrons incidam sobre a superfície fluorescente, pois conduzem os elétrons que deveriam atravessar o colimador e se chocar com a cobertura de fósforo.

Na versão final o colimador e a tela fluorescente, feitos em alumínio, serão trocados, por outros, confeccionados com placa de circuito impresso de fenolite sem a camada de cobre. O fenolite é um material isolante, fácil de ser trabalhado, isso evitará a formação de arco.

Comparando as referências [1] e [3], vemos que em [1] é dito que a tela é feita de alumínio, não citando o material do colimador, já na referência [3], a qual reproduz um documento escrito por William Crookes, o colimador é descrito como sendo feito de mica, um ótimo isolante elétrico, não é citado o material de que é feita a tela fluorescente, supõe-se também ser feita de mica.

Outra observação é de que a tela deve possuir uma inclinação dentro do tubo, de forma que os elétrons que viajam em linha reta do cátodo para o ânodo se choquem contra ela.

5 - Pesquisa Realizada:

Palavras chave : Técnicas de vácuo, Técnicas de fundição.

[13] Robert Eiseberg, Robert Resnick – Física Quântica – 14ed.

Página 51 - 56 e 846 – 847

Necessário ao entendimento

[14] <https://www.youtube.com/watch?v=GAMRHcbE3g0>

Making a type C triode vacuum tube – Mostra passo a passo a construção uma válvula triodo, o método para a obtenção de vácuo é mostrada aos 48 min e 10 s.

[15] <http://webbif.ifi.unicamp.br/apostilas/f640/Cap6-D.pdf>

Apostila do curso f640 - Método da Física experimental II - Apostilas sobre técnicas de vácuo

[16] John F. O`Hanlon – A User`s Guide to Vacuum Technology – 3ed. 621.55 Oh1u

Página 290.

Importante na escolha dos materiais usado em sistemas de vácuo.

[17] <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Processos%20de%20Fundição%20e%20Sinterização%20de%20Alumínio.pdf>

Página 17 - Escola politécnica da USP - Introdução à Manufatura Mecânica PMR 2202 Processos de Fundição e Sinterização (Metalurgia do Pó) Profa. Izabel Machado.

[18] http://www3.fsa.br/mecanica/arquivos/02_Fundição.pdf

página 9

Apostila do curso de mecânica sobre processos de fundição do Centro Universitário Santo André.

Usada na escolha da técnica mais adequada para a confecção da flange de alumínio.

6 - Descrição do Trabalho:

Um tubo de raios catódicos é simplesmente um sistema fechado onde é feito vácuo, nele encontram dois eletrodos em extremos opostos, aos quais é aplicada uma tensão elétrica, com o objetivo forçar a passagem de elétrons pelo espaço livre entre eles. O aparato montado é semelhante ao que Julius Plücker e Johann Wilhelm Hittorf usaram para demonstrar a influência do campo magnético sobre os raios catódicos em 1858 [1].

Os elétrons que atravessam o espaço entre os dois eletrodos são acelerados devida diferença de potencial existente entre eles, adquirindo uma energia cinética dada por

$$K = eU - w_0$$

onde e é a carga do elétron, U a tensão aplicada ao eletrodos e w_0 é a função trabalho do material que compõe o cátodo (eletrodo negativo), já que é por ele que os elétrons partem em direção ao ânodo (eletrodo positivo).

Sabendo a energia cinética, podemos encontrar a velocidade o elétron dentro do tubo através da formula [13]

$$K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

colocando v em evidencia temos

$$v = \sqrt{c^2 - \frac{m_0 c^4}{K + m_0 c^2}}$$

supondo que ele não colida com nenhuma molécula de gás dentro do tubo.

Aplicando-se um campo magnético perpendicularmente ao tubo de raios catódicos, como o produzido por um pequeno imã, fazemos com que o campo elétrico dos elétrons, que viajam do cátodo ao ânodo, interaja com esse campo magnético que está perpendicular a trajetória dos elétrons, essa interação resulta no aparecimento de uma força sobre os elétrons, força esta de direção perpendicular aos vetores velocidade e campo magnético, resultando em um desvio na de sua trajetória, que poderá ser visualizado na tela fluorescente.

Essa força que aparece no sentido perpendicular a trajetória dos elétrons e ao campo magnético, é descrita pela equação vetorial

$$\vec{F} = q_0 \vec{v} \times \vec{B}$$

onde q_0 é a carga do elétron, \vec{v} é o vetor velocidade da carga e \vec{B} o vetor campo magnético.

Essa equação vetorial pode ser escrita na forma escalar como

$$F = q.v.B.\text{sen}(\theta)$$

onde θ é o ângulo formado pelos vetores velocidade e campo magnético.

Um modo de visualizarmos a direção dos vetores é usar a regra da mão direita, sendo que o polegar indica a direção da força, e os outros dedos a direção que vetor velocidade \vec{v} que faz um ângulo θ em relação a ao vetor \vec{B} [7], como mostra a figura a baixo.

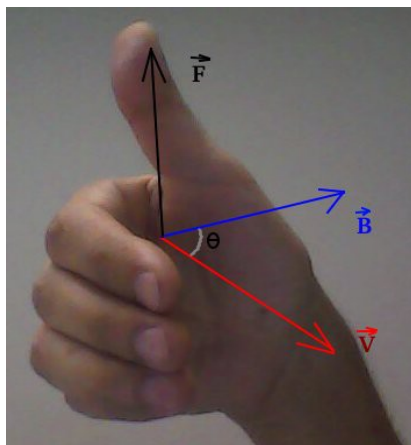


Figura 11: Regra da mão direita.

No caso do elétron no nosso tubo de raios catódicos, o vetor \vec{F} apontará para baixo devido aos elétrons possuírem carga negativa, supondo que o vetor campo magnético, esteja na mesma direção que a mostrado na figura 11.

7 - Declaração do Orientador:

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião: (O aluno está realizando um excelente trabalho de instrumentação, com soluções criativas para os problemas encontrados. O trabalho está tendo um bom andamento e pode-se esperar que será concluído satisfatoriamente até o término do semestre.)

8 - Dia e Horário da Apresentação:

Quarta-feira, 13 de Novembro das 16 às 18 horas.

Apêndice

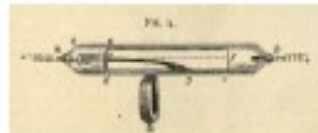
Referência [1]



Glass tube workshop of A.C. Cossor
1896.

(picture courtesy of Alastair Wright)

The Cathode ray deflecting tube (Crookes nr 14) demonstrates the influence of a magnetic field to the electron beam. The visible beam appears on the aluminum sheet covered with phosphor, will bent away from the center when a magnet is held near the tube. This phenomena was discovered by Julius Plücker and Johann Wilhelm Hittorf. Plücker published it in the *Poggendorffs annalen der Physik und Chemie* 1858.



For these mechanical effects the exhaustion need not be so high as when phosphorescence is produced. The best pressure for this electrical radiometer is a little beyond that at which the dark space round the negative pole extends to the sides of the glass bulb. When the pressure is only a few millimetres of mercury, on passing the induction-current a halo of velvety violet light forms on the metallic side of the vanes, the mica side remaining dark. As the pressure diminishes, a dark space is seen to separate the violet halo from the metal. At a pressure of half a millimetre this dark space extends to the glass, and rotation commences. On continuing the exhaustion the dark space further widens out and appears to flatten itself against the glass, when the rotation becomes very rapid.

Here is another piece of apparatus (Fig. 13) which illustrates the mechanical force of the radiant matter from the negative pole. A stem (*a*) carries a needle-point in which revolves a light mica fly (*b b*). The fly consists of four square vanes of thin, clear mica, supported on light aluminium arms, and in the center is a small glass cap, which rests on the needle-point. The vanes are inclined at an angle of 45° to the horizontal plane. Below the fly is a ring of fine platinum wire (*c c*), the ends of which pass through the glass at *d d*. An aluminium terminal (*e*) is sealed in at the top of the tube, and the whole is exhausted to a very high point.

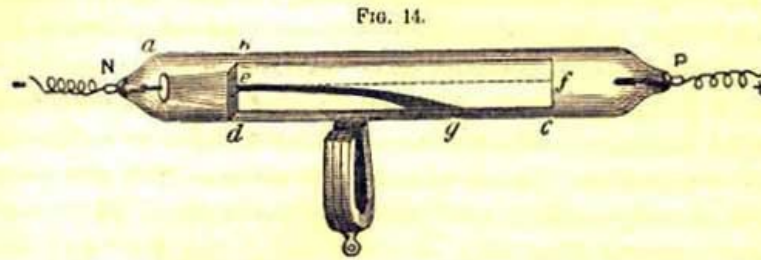
By means of the electric lantern I project an image of the vanes on the screen. Wires from the induction-coil are attached, so that the platinum ring is made the negative pole, the aluminium wire (*e*) being positive. Instantly, owing to the projection of radiant matter from the platinum ring, the vanes rotate with extreme velocity. Thus far the apparatus has shown nothing more than the previous experiments have prepared us to expect; but observe what now happens. I disconnect the induction-coil altogether, and connect the two ends of the platinum wire with a small galvanic battery: this makes the ring *c c* red-hot, and under this influence you see that the vanes spin as fast as they did when the induction-coil was at work.

Here, then, is another most important fact. Radiant matter in these high vacua is not only excited by the negative pole of an induction-coil, but a hot wire will set it in motion with force sufficient to drive round the sloping vanes.

Radiant Matter is deflected by a Magnet.—I now pass to another property of radiant matter. This long glass tube (Fig. 14) is very highly exhausted; it has a negative pole at one end (*a*) and a long phosphorescent screen (*b, c*) down the center of the tube. In front of the negative pole is a plate of mica (*b, d*) with a hole (*e*) in it, and the result is, when I turn on the current, a line of phosphorescent light (*e, f*) is projected along the whole length of the tube. I now place beneath the tube a powerful horseshoe magnet: observe how the line of light (*e, g*) becomes curved under the magnetic influ-

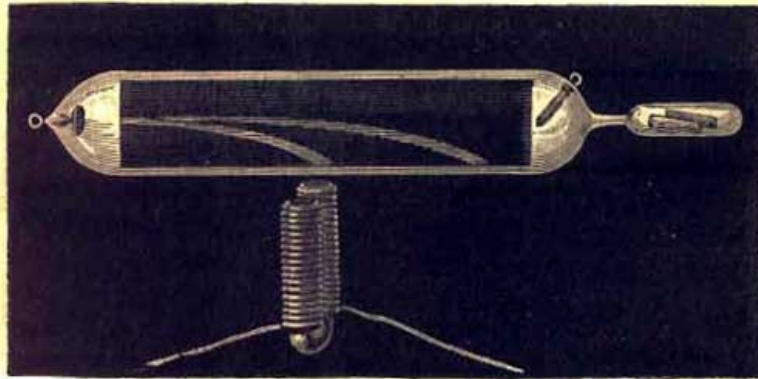
ence waving about like a flexible wand as I move the magnet to and fro.

This action of the magnet is very curious, and if carefully followed up will elucidate other properties of radiant matter. Here



(Fig. 15) is an exactly similar tube, but having at one end a small potash tube, which if heated will slightly injure the vacuum. I turn on the induction-current, and you see the ray of radiant matter tracing its trajectory in a curved line along the screen, under the influence of the horseshoe magnet beneath. Observe the shape of the curve. The molecules shot from the negative pole may be likened to

FIG. 15.



a discharge of iron bullets from a mitrailleuse, and the magnet beneath will represent the earth curving the trajectory of the shot by gravitation. Here on this luminous screen you see the curved trajectory of the shot accurately traced. Now suppose the deflecting force to remain constant, the curve traced by the projectile varies with the velocity. If I put more powder in the gun, the velocity will be greater and the trajectory flatter; and if I interpose a denser resisting medium between the gun and the target, I diminish the velocity of the shot, and thereby cause it to move in a greater curve and come to the ground sooner. I can not well increase before you the velocity of my stream of radiant molecules by putting more powder in my battery, but I will try and make them suffer greater resistance in their

Bombas de sublimação de Titânio

Titânio pode ser evaporado ou sublimado em uma superfície para formar, como no caso do bário, um filme altamente reativo, capaz de absorver uma grande variedade de filmes. Comparado com o bário, o titânio tem uma pressão de vapor muito menor para as mesmas temperaturas. Como um exemplo, para 1000°C a pressão de vapor do titânio é da ordem de 10^{-9} mtorr, enquanto a do bário é da ordem de 1 mtorr. Para alcançar a pressão de vapor de 10^{-3} mtorr, o titânio precisa ser aquecido a 1500°C, o que significa que dispositivos de potência devem ser usados.

Em geral filmes recém evaporados de vários metais exibem boas propriedades de absorção para diversos gases. A Fig. 6.52 ilustra isso através da probabilidade de adesão (ou reação) para o

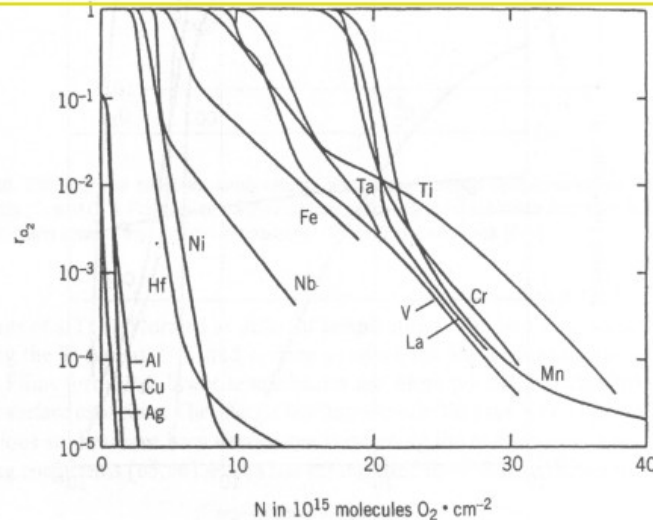


Fig. 6.52: Probabilidade de adesão para o oxigênio para diferentes filmes metálicos como função da quantidade já absorvida (Fig. 5.28 Lafferty, pg. 291)

oxigênio para diversos filmes metálicos evaporados. A velocidade de bombeamento é diretamente proporcional à probabilidade de adesão ou reação, e é dada em função da quantidade já absorvida. Vemos que, para filme fresco, a velocidade de bombeamento é alta e razoavelmente constante, começando a diminuir à medida que mais gás é absorvido, até, eventualmente, atingir a saturação do filme, quando então é necessário evaporar mais uma camada, para restabelecer a capacidade de bombeamento. Comparado com os demais, vemos que o titânio é muito bom absorvedor mesmo quando já contém uma quantidade relativamente grande de gás absorvido. Devido a isso, e devido também a outros fatores, o titânio é escolhido como o melhor material para absorção de gases em alto vácuo, e portanto, para a fabricação de bombas denominadas de sublimação. Em geral, o processo de sublimação é controlado usando fontes de potência convenientes que permitem o ajuste da taxa de sublimação ou ciclos de sublimação às necessidades do sistema de vácuo, que em geral deve apresentar alta superfície para receber o filme evaporado.

1.3.3 Fundição utilizando cera perdida.

O processo de utilizando cera perdida é ilustrado na **figura 27**. A primeira etapa desse processo consiste em injetar cera na matriz para a confecção dos modelos. Esses modelos de cera são conectados a um canal central. Sobre os modelos é depositada uma pasta refratária, que pode ser constituída por várias camadas, formando o molde. Quando o molde endurece, ele é aquecido para que a cera derreta e seja retirada do molde. Após a retirada da cera, o metal líquido é vazado no molde. Após a solidificação do metal ou liga, o molde é quebrado e são retiradas as peças, as quais são separadas do canal central e feito o acabamento final. A **figura 28** apresenta o modelo de cera a as peças produzidas.

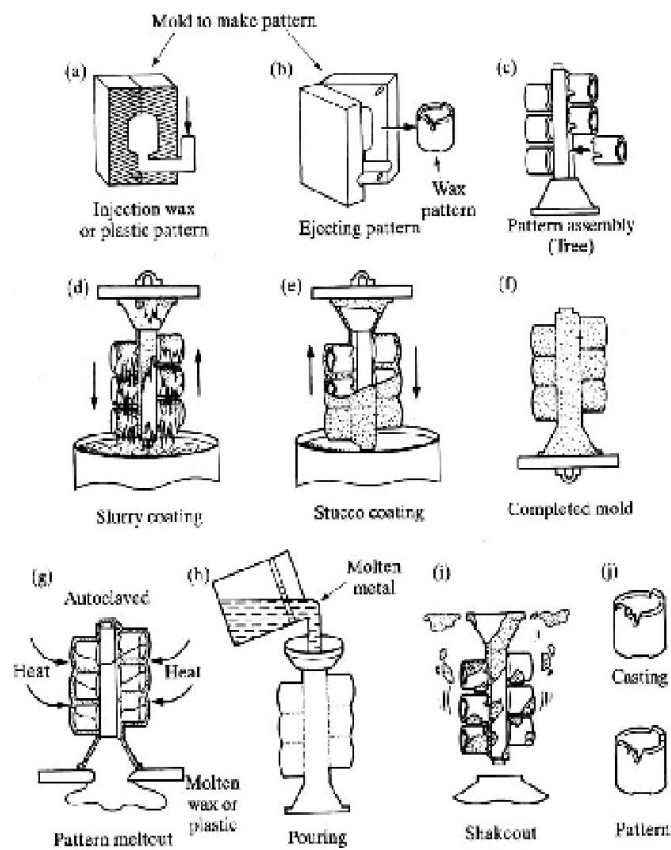


Figura 27. Etapas da fundição por cera perdida.

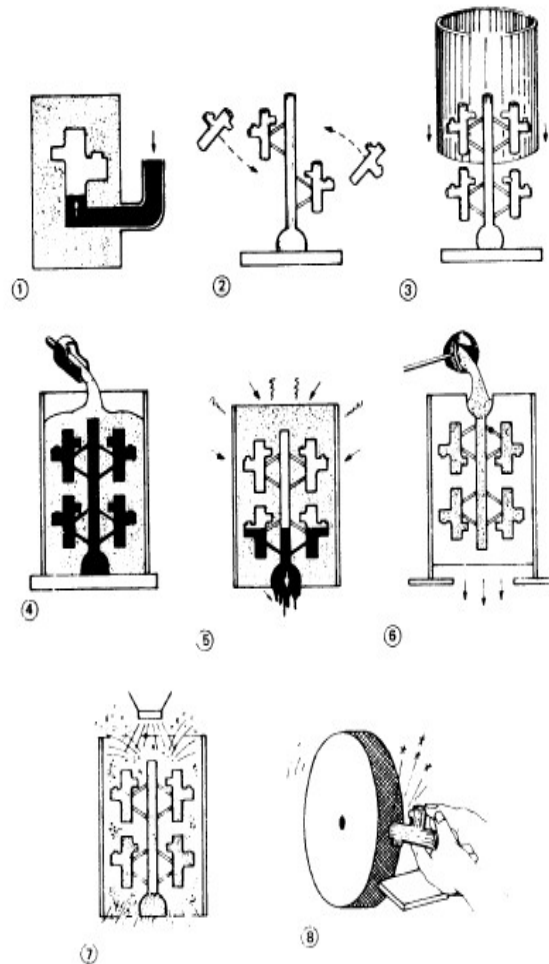


Figura 28. Modelo de cera (vermelho) e as peças produzidas.

7.1.3 Fundição de cera perdida

Utilizam-se dois moldes: um para obtenção de modelos em cera e outro para obtenção das peças no material desejado.

O primeiro molde é feito em alumínio ou outro metal que possa ser facilmente trabalhado. Já o segundo molde é composto por pasta refratária (areia fina e resina).



Vantagens:

- possibilidade de produção em massa de peças complexas
- permite cantos vivos
- utilização de qualquer metal ou liga
- peças praticamente acabadas

Desvantagens:

- altos custos
- limitação a peças pequenas (5 Kg)