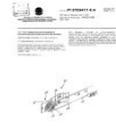


» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)

---

**Depósito de pedido nacional de Patente**

(21) Nº do Pedido: PI0206278-0 A2

[Leia-me antes](#)

(22) Data do Depósito: 29/08/2002

(51) Classificação: G09B 23/22

(54) Título: APARELHO DIDÁTICO E PROCESSO PARA DEMONSTRAR O EFEITO FOTOELÉTRICO

"APARELHO DIDÁTICO E PROCESSO PARA DEMONSTRAR O EFEITO FOTOELÉTRICO". É descrito um aparelho didático (100) para demonstrar o Efeito Fotoelétrico, constituído de módulo A contendo lâmpada de mercúrio (101), reator (102) e tubo metálico móvel (104) para colimar o feixe policromático de luz gerado pela lâmpada (101), e módulo B constituído principalmente de célula fotoelétrica (119), gerador de potencial (118) e medidor de corrente (117) formando um circuito em série, de modo a produzir fotoelétrons, dimensionar a corrente fotoelétrica e medir o potencial de parada dos fotoelétrons, que equivale a medir a energia cinética dos fotoelétrons, a energia cinética sendo proporcional à frequência da radiação incidente. Um gráfico das energias cinéticas determinadas para diferentes frequências permite determinar a constante de Planck "h" utilizada por Einstein para demonstrar o Efeito Fotoelétrico. O processo para demonstrar o Efeito Fotoelétrico com auxílio do aparelho (100) da invenção também é descrito.

(57) Resumo:

(71) Nome do Depositante: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (BR/RS)

(72) Nome do Inventor: José Irineu Kunrath / Mauro Fin

(74) Nome do Procurador: Paulo Afonso Pereira Cons. Em Marcas E Patentes LTDA S/C

## **APARELHO DIDÁTICO E PROCESSO PARA DEMONSTRAR O EFEITO FOTOELÉTRICO**

### **CAMPO DA INVENÇÃO**

A presente invenção refere-se a um aparelho didático e a um  
5 processo para demonstrar o Efeito Fotoelétrico. Mais especificamente,  
a presente invenção refere-se a um aparelho didático para demonstrar  
o efeito fotoelétrico que compreende um primeiro módulo destinado a  
produzir um feixe discreto de radiação visível e um segundo módulo  
destinado a produzir fotoelétrons bem como dimensionar a corrente  
10 fotoelétrica e medir o potencial de parada ou energia cinética dos  
fotoelétrons. A invenção é igualmente dirigida a um processo para  
demonstrar o efeito fotoelétrico com auxílio do aparelho didático da  
invenção. A invenção é particularmente útil para o ensino de Física  
Moderna em instituições de ensino superior.

### **FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO**

Durante a transição do século 19 para o século passado, verificou-se  
que a Física Clássica não conseguia explicar certos fenômenos, o  
que deu origem a uma Nova Física ou Física Quântica.

A origem da Física Quântica é na verdade uma experiência de  
20 1839 feita por Alexander Edmund Becquerel ao estudar as  
propriedades elétricas dos metais Quando estes eram atingidos por  
Radiação Ultravioleta. Conforme o compêndio “Eletricidade”, de A.  
Kuhlmann, Cia. Melhoramentos, p. 53, SP, 1925, Becquerel utilizou em  
suas experiências uma pilha de Leclenché, em que um eletrodo de  
25 Zinco é o polo negativo e o Carvão é o polo positivo. A força  
eletromotriz da pilha era de 1,49 Volts. No entanto, quando o eletrodo  
de Zinco era atingido por um feixe de radiação UV, a diferença  
de potencial (ddp) entre o Zinco e o Carvão aumentava, atingindo até

1,57 Volts. A incidência de uma radiação vermelha não causava alteração na ddp. A conclusão do estudo é que a ddp dependia do tipo de eletrodo e do grau de polimento de sua superfície e da frequência da radiação incidente, este efeito sendo conhecido como o Efeito Fotovoltaico.

Um segundo efeito interessante foi observado por Willoughby Smith em 1879, através de um experimento em que uma película semicondutora de Selênio era iluminada por radiação UV, a película de Selênio estando conectada a um circuito elétrico que inclui um galvanômetro e uma fonte de força eletromotriz. W. Smith verificou que em ausência de força eletromotriz no circuito, a radiação UV não é capaz de produzir nenhuma ddp que possa gerar no semicondutor de selênio uma corrente elétrica mensurável. Logo, a radiação UV deveria afetar de uma maneira ou outra somente a resistência interna do Selênio. Este efeito ficou conhecido como Efeito Fotocondutor. Vide a este respeito a obra E. Perucca, "Física General Y Experimental", Editorial Labor S. A , Barcelona, p. 1906 (1944).

Um passo adiante na compreensão dos fenômenos envolvidos foi dado por J. Elster e H. Geitel em 1900, que substituíram o Selênio por Tálcio enquanto a superfície fotossensível era irradiada por um intenso feixe de Radiação Solar em vez de radiação UV emitida por uma lâmpada de Hg. O experimento permitiu verificar que a resistência interna do semicondutor oscilava muito com a variação da Intensidade Luminosa incidente. Quanto mais luz, tanto menos resistência interna. Assim, em ausência de luz a resistência interna era de 10000 Ohms, 8000 em presença de radiação UV e de apenas 1000 Ohms em presença de radiação solar. Enquanto isso, a corrente (foto)elétrica subia de 80 microampéres para 260 microampéres, a força eletromotriz

aplicada sendo mantida constante. Os pesquisadores concluíram que o número de fotoelétrons emitidos por uma superfície fotossensível é diretamente proporcional à Intensidade da Radiação Incidente. Todos os experimentos realizados apontavam para duas perguntas fundamentais: Por que e como a radiação UV provoca alterações na resistência interna de superfícies fotossensíveis. Era imperioso, portanto, descobrir o nexo causal entre a incidência da radiação UV e a alteração das propriedades elétricas dos materiais fotossensíveis. Essa tarefa coube a Albert Einstein.

10 Ainda um outro fenômeno, conhecido como Descarga elétrica Induzida, foi observado por H. Rudolph Hertz, ao efetuar um experimento com bobinas de Ruhmkorff constituídas de uma bobina primária P ao redor da qual foi enrolada uma grande quantidade de espiras, que compõe a bobina secundária S. O diâmetro do fio das  
15 espiras de P é grande e o número delas é pequeno, enquanto que em S o número de espiras é grande e o diâmetro é pequeno. O primário P é conectado a uma bateria. O sistema gera uma força contra eletromotriz que será tanto maior quanto maior for a diferença entre o número de espiras existentes em P e o número de espiras existentes  
20 em S. A força contra eletromotriz pode atingir até 100.000 volts, esta ddp sendo capaz de provocar uma descarga elétrica ou faísca de até 10 centímetros entre os terminais da bobina S. Através de uma modificação do arranjo experimental, Hertz foi capaz de comprovar o nexo causal entre a radiação UV e a Descarga Elétrica Induzida. Vide  
25 J. Kleiber, "Grundriss der Physik", Leibniz Verlag, München, p. 80 (1932).

A partir daí Wilhelm Hallwachs pode afirmar que as faíscas elétricas observadas por Hertz eram cargas elétricas negativas

emitidas pela superfície metálica das esferas do faiscador de Hertz sobre o qual incidia radiação UV. Através de um experimento com um disco de zinco sobre o qual incide radiação UV de uma lâmpada de mercúrio, o disco estando conectado a um eletroscópio, Hallwachs  
5 afirmou que a radiação UV provoca o aparecimento de cargas negativas numa chapa de zinco, tal efeito sendo conhecido como Efeito Hallwachs. Este efeito está detalhado em L. Graetz, “Die Elektrizität und Ihre Anwendungen”, Leibniz Verlag, München, p. 434 (1921).

Com base nos conhecimentos ameadados por seus antecessores,  
10 e nos diversos Efeitos conhecidos em 1900, Philipp E. A. Lenard afirma que o Efeito Hallwachs pode ser observado não somente para o zinco mas também para todos os outros metais, sendo provocado igualmente por luz visível, as cargas elétricas negativas liberadas pela superfície metálica por incidência de radiação UV e/ou luz visível eram elétrons, a  
15 energia cinética dos fotoelétrons sendo proporcional à frequência da radiação incidente. Estas afirmações tinham bases empíricas, já que Lenard substituíra o disco de zinco por uma outra superfície metálica, e a lâmpada de mercúrio por uma lâmpada de arco a qual emitia um espectro contínuo que era decomposto por filtros óticos.

20 Para comprovar que as cargas elétricas negativas liberadas por uma superfície metálica eram elétrons, Lenard recorreu à experiência de J. J. Thomson que conseguira comprovar, através de deflexão magnética, que os raios catódicos eram elétrons. A comprovação de Thomson utilizava o Efeito Termoiônico. Lenard por sua vez queria  
25 produzir os raios catódicos utilizando apenas o Efeito Hallwachs. O dispositivo experimental de Lenard faz incidir um feixe de luz visível produzido por uma lâmpada de arco e que atravessa uma lâmina de quartzo, sobre um disco de alumínio conectado a um eletroscópio.

O Efeito Hallwachs é então observado. Para tornar as descargas elétricas liberadas pelo disco de alumínio um feixe de raios catódicos basta acelerar essas descargas através de uma ddp apropriada. Foi então introduzido um ânodo no sistema, e o disco de alumínio foi dotado de um furo que servia de colimador para o feixe de raios catódicos. Uma ddp variável aplicada entre o colimador e a placa metálica positivamente carregada proporcionava aos raios catódicos uma energia cinética ( $mv^2/2$ ) medida em eletron-volts (**eV**), de modo que

$$10 \quad (mv^2/2) = eV \quad (\text{equação 1})$$

Por aplicação de um campo magnético uniforme, perpendicular ao feixe de raios catódicos, o feixe colimado foi defletido. Os resultados foram publicados no periódico *Annalen der Physik*, 2, p. 359 (1900), sob o título “Erzeugung von Kathodestrahlen durch Ultraviolettes Licht”.

15 Lenard determinou igualmente o valor do raio de curvatura “r” da trajetória descrita pelo feixe defletido com auxílio de um tubo de raios catódicos sem filamento, o que permite finalmente determinar a carga específica (e/m) do elétron. A descrição do tubo de raios catódicos sem filamento está no artigo do periódico *Annalen der Physik* citado imediatamente acima, à página 25. Assim Lenard confirmou que as cargas elétricas negativas liberadas por uma superfície de alumínio ao incidir uma radiação UV e/ou Luz Visível, eram realmente elétrons.

25 A fim de comprovar a afirmação segundo a qual a energia cinética dos fotoelétrons ( $mv^2$ ) era proporcional à frequência  $\nu$  da radiação incidente, Lenard utilizou uma lâmpada de espectro contínuo, onde para selecionar os diversos comprimentos de onda, filtros óticos eram utilizados, produzindo feixes que eram colimados e focalizados por meio de uma lente sobre uma superfície fotossensível de rubídio ligada

a um conector. Sempre que um dos feixes selecionados era focalizado pela lente sobre a superfície fotossensível de rubídio, ocorria a liberação de elétrons na superfície metálica, os quais fluíam para a terra através de um galvanômetro. Com auxílio de um reostato de cursor móvel, era aplicada uma barreira de potencial variável, contrária ao fluxo dos fotoelétrons para a terra. Aumentando este Potencial de Retardo até cessar completamente a corrente fotoelétrica Lenard obteve o valor correspondente à Energia Cinética com que os fotoelétrons fluíam para a terra. Ao fazer incidir os mais diversos comprimentos de onda foi possível observar que os potenciais de parada eram diretamente proporcionais às Freqüências das radiações incidentes. Quanto maior a Freqüência tanto maior o Potencial de Parada e portanto maior a Energia Cinética dos fotoelétrons. Outros detalhes estão no compêndio por L. Graetz, "Die Elektrizität und Ihre Anwendungen", Leibniz Verlag, p. 434 (1921).

Assim como Lenard para explicar o Efeito Hallwachs se valeu dos conhecimentos obtidos por J. J. Thomson ao realizar a experiência da deflexão magnética dos raios catódicos, Einstein, para explicar o Efeito Fotoelétrico, se valeu do princípio da Quantização da Radiação do Corpo Negro proposta por Max Planck em 1900.

Quando uma radiação eletromagnética incide sobre um corpo negro, a parte da radiação que não é refletida é absorvida. A radiação refletida é maior nos corpos coloridos do que nos corpos negros. De acordo com o princípio da conservação da energia, se um corpo negro estiver em equilíbrio térmico com o meio ambiente, a taxa de radiação absorvida deve ser igual à taxa de radiação reemitida.

A radiação reemitida por um corpo negro é predominantemente uma radiação invisível, de grande comprimento de onda, conhecida

como radiação térmica.

Corpo negro ideal é o que absorve toda a radiação incidente, e portanto deve reemitir toda a radiação absorvida, esta reemissão não significando uma reflexão.

5 Conforme os princípios da Física Clássica, ao tentar determinar a função distribuição espectral da radiação reemitida por um corpo negro, se chegaria a um impasse no sentido de que para certos comprimentos de onda reemitidos, a função distribuição espectral tenderia ao infinito, o que é inaceitável. Max Planck então sugeriu que para obter  
10 comprimentos de onda tendendo a zero e distribuição espectral igualmente tendendo a zero, seria preciso considerar valores discretos da energia irradiada pelo Corpo Negro. Ora, a Teoria do Corpo Negro enunciada por Max Planck não era compatível com os princípios da Teoria Eletromagnética Clássica. A compatibilização procurada por  
15 Max Planck somente seria possível à luz da Teoria Quântica, que se aplicaria não somente à radiação do Corpo Negro, mas permearia todo o leque espectral das Radiações Eletromagnéticas.

Foi Albert Einstein, em 1905, que para explicar o Efeito Fotoelétrico afirmou que a quantização não se verificava somente no fenômeno da  
20 Radiação do Corpo Negro, mas que era característica de todo o leque espectral das Radiações Eletromagnéticas, desde o infravermelho até o ultravioleta mais energético. Segundo Einstein, todos os comprimentos de onda localizados entre 7000 Å e 4000 Å compõem o Espectro Visível, enquanto o Espectro Ultravioleta abrangia todos os  
25 comprimentos de onda compreendidos entre 4000 Å e 1000 Å. Assim, o comprimento de onda da raia vermelha do átomo de Hidrogênio, a 6563 Å, está dentro dos limites do espectro visível, o mesmo valendo para as raias azul e violeta emitidas pelo átomo de mercúrio e que

medem 4350 e 4046 Å. As principais raias emitidas pelo átomo de Hg pertencem ao espectro ultravioleta e medem 3663, 3125 e 2536 Å.

A expressão matemática que relaciona o comprimento de onda  $\lambda$  com a respectiva frequência  $\nu$  é

$$5 \quad \nu = c/\lambda \quad (\text{equação 2})$$

Ao combinar esta expressão com a expressão dos valores discretos de energia irradiada pelo Corpo Negro,

$$E_n = n h \nu \quad (\text{equação 3})$$

10 é possível calcular o valor de todas as frequências e posteriormente o valor de todas as energias dos ftons do espectro visível e do espectro ultravioleta para por exemplo um átomo de mercúrio.

De acordo com os princípios da Física Quântica, as parcelas de energia luminosa das ondas eletromagnéticas foram chamadas de Quantum, e por serem quanta de luz, foram chamadas de ftons.

15 Em relação ao Efeito Fotoelétrico, Einstein teorizou que cada fton de luz incidindo sobre uma superfície fotossensível transferia toda a energia ( $h\nu$ ) para um único elétron livre do cristal. Portanto, quanto maior a energia do fóton, tanto maior a frequência deste fóton, e portanto tanto maior a energia absorvida pelos fotoelétrons, como havia

20 sido previsto anteriormente por Lenard. Isto significa que todos os fotoelétrons liberados por ftons de mesma frequência ( $\nu$ ) e portanto de mesma energia ( $h\nu$ ) apresentam todos a mesma Energia Cinética ( $eV$ ). De acordo com a teoria, se estes fotoelétrons tiverem sido liberados por superfícies fotossensíveis diferentes, suas energias cinéticas

25 seriam diferentes, embora as frequências das radiações incidentes tivessem sido as mesmas. Isto porque, para bombear um elétron livre existente no interior de um metal e deslocá-lo até a superfície deste cristal, é necessário realizar um trabalho. Para realizar este

trabalho é necessário gastar energia (eV), que será descontada da energia do fóton incidente. Ou seja, a energia do fóton incidente será parcialmente gasta com a função trabalho “ $\phi$ ” e a energia do  $h\nu$  incidente que sobrar, será transformada em Energia Cinética ( $mv^2/2$ ) dos fotoelétrons. Ou seja, matematicamente,

$$E = h\nu = \phi + mv^2/2 \quad (\text{equação 4})$$

Como a função trabalho “ $\phi$ ” é diferente para diferentes superfícies fotossensíveis, as energias cinéticas dos fotoelétrons, provenientes de superfícies fotossensíveis diferentes, serão diferentes, embora tenham sido liberadas por ftons de mesma freqüência, e portanto de mesma energia.

Já quando a energia de um fóton incidente for exatamente igual a “ $\phi$ ”,

$$h\nu = \phi \quad (\text{equação 5})$$

Neste caso existe Efeito Fotoelétrico, embora não haja Corrente Fotoelétrica, já que a Energia Cinética dos fotoelétrons é zero.

Já quando a energia de um fóton incidente for inferior a  $\phi$ , não haverá nem Efeito Fotoelétrico nem Corrente Fotoelétrica.

A freqüência “ $\nu$ ” para a qual a equação 5 for válida, foi denominada de Freqüência de Corte ou “ $\nu_0$ ” abaixo da qual, em condições normais não há Efeito Fotoelétrico nem Corrente Fotoelétrica. Para alguns metais, o  $\nu_0$  se localiza no espectro UV, como para o Tungstênio (W) cujo comprimento de onda de corte “ $\lambda_0$ ” é de 2730 Å. Já o “ $\lambda_0$ ” do átomo de Sódio é de 5 640 Å (alaranjado). Para aplicações em coletores de energia solar, o interesse é sintetizar superfícies fotossensíveis cujas freqüências de corte caiam na região espectral do vermelho.

A relação entre a Intensidade Luminosa incidente e o número de Fotoelétrons produzido é tal que quanto maior a Intensidade

da radiação incidente, maior o número de Fótons incidentes (“n”  $h\nu$ ). Portanto maior deve ser também o número de Elétrons Livres atingidos por estes “n”  $h\nu$  e portanto maior será o número de Fotoelétrons produzidos.

5 O Efeito Hallwachs pode ser explicado segundo a Teoria Quântica da Luz, já que quando uma radiação **UV** incide sobre uma superfície fotossensível, cada foton transfere toda a sua energia de um “**hν**’ incidente a um elétron livre, deslocando-o até a superfície externa do cristal, a qual ficará neutralizada, caso ela esteja positivamente  
10 carregada, ou polarizando-a negativamente, caso ela esteja eletricamente neutra.

- **O Efeito Fotoelétrico**

- **Qualitativo**

O Efeito Fotoelétrico pode ser demonstrado de modo Qualitativo  
15 através de uma montagem como a do eletroscópio de Dufay, que consiste de um frasco de vidro fechado por uma rolha atravessada por uma haste metálica encimada por um condutor esférico. Duas folhas de metal muito delgadas balançam na extremidade inferior da haste. Carregando eletricamente a esfera através de um bastão de vidro ou  
20 ebonite eletrizados, as cargas elétricas acumuladas se distribuem homogeneamente, até atingir as folhas de metal provocando nestas uma forte repulsão. Para descarregar o eletroscópio, basta conectar a haste com o solo. Quando a esfera está sendo descarregada as folhas de metal vão se abraçando.

- **Quantitativo**

Sob o ponto de vista prático, procura-se demonstrar o acerto da Teoria de Einstein sobre o Efeito Fotoelétrico, conforme a equação

$$E = h\nu = \phi + eV$$

Pela qual a Energia Cinética  $eV$  dos fotoelétrons é diretamente proporcional à Freqüência " $\nu$ " da radiação incidente.

O equipamento destinado a comprovar esta proporcionalidade deve ser capaz de:

- 5
- Produzir e monocromatizar feixes luminosos, cada um composto por ftons de freqüências iguais;
  - Medir, direta ou indiretamente, a Energia Cinética " $eV$ " dos fotoelétrons liberados por cada Freqüência " $\nu$ " incidente.

10 Para alcançar cada um destes objetivos são necessários os seguintes equipamentos:

- a) um Monocromador;
- b) um Fotocátodo ou Superfície Fotossensível; e
- c) um Amplificador.

15 Normalmente a produção de feixes monocromáticos é conseguida por meio de uma lâmpada de mercúrio cujo espectro de emissão inicia com a raia amarela de 578.9 nm, seguida da raia verde a 546.1 nm Seguida pelas raias azul de 435.8 nm violeta de 404.6 nm e ultravioleta de 365.5 nm.

20 Como a lâmpada emite todas as raias ao mesmo tempo, é necessário monocromatizar o feixe incidente no fotocátodo. Para isto, conforme o fabricante, é empregado: um Prisma de Visão Direta (Leybold Didactic GmbH), Filtros Ópticos (Phywe Systeme GmbH), um para cada cor, ou uma Rede de Difração (Pasco Scientific).

25 A fim de dimensionar com precisão o Potencial de Parada que é igual à Energia Cinética com que os fotolétrons fluem para solo, tradicionalmente são utilizados dois métodos:

- a) zerar a corrente fotoelétrica através de um potencial de retardo(utilizado pelos fabricantes Phywe Systeme e Leybold Didactic);

b) medir diretamente a ddp que se estabelece entre as placas de um condensador, onde se acumulam os fotoelétrons arrancados do fotocátodo (utilizado por Pasco Scientific).

5 Conforme o método a), os fotoelétrons, bombeados até a superfície do fotocátodo (superfície fotossensível), são coletados pelo Anodo, donde fluem para “terra”, não sem antes serem forçados a passar por um galvanômetro acoplado a um Amplificador dimensionado para amplificar uma corrente de nano-amperes que pode ser medida numa escala no Galvanômetro. Este é o método didático mais utilizado  
10 atualmente.

O Fotocatodo emissor de elétrons e o Anodo coletor de fotoelétrons compõem uma célula fotoelétrica, ambos encapsulados em um bulbo de Quartzo. A superfície fotossensível do Fotocatodo emissor utiliza o Potássio, cuja função trabalho é de 2,2 eV e cuja sensibilidade  
15 espectral oscila entre 300 nm e 600 nm. Um problema é que a raia proveniente da desionização do átomo de Hg, cujo comprimento de onda mede 253,6 nm, não consegue produzir fotoelétrons no potássio.

Por isso a montagem proposta por esses fabricantes pode estar ilustrando o Efeito Compton, em vez do Efeito Fotoelétrico.

20 O Anodo Coletor é fabricado de platina, este metal sendo recomendado tendo em vista o alto valor de sua Função Trabalho, que atinge o valor de 6.3 eV. Este valor, somado ao formato de anel do fio de platina evita o surgimento de um segundo Efeito Fotoelétrico. Para evitar que a sublimação dos átomos de potássio do fotocátodo emissor  
25 se depositem sobre o anel de platina o Anodo Coletor é aquecido fazendo circular através do mesmo uma corrente elétrica de cerca de 1,5 A, 120V, o que é conseguido com um reostato de cursor móvel, ligado em série, que regula a corrente até o filamento ficar vermelho. O

calor produzido reevapora os átomos de potássio. Esse procedimento deve ser efetuado 15 minutos antes de efetuar um experimento.

A empresa Pasco Scientific apresenta um aparelho para medir Efeito Fotoelétrico conforme o método b), pelo qual mede-se a ddp que se estabelece entre as placas de um capacitor onde se acumulam os fotoelétrons arrancados do fotocátodo. Inicialmente a corrente fotoelétrica aumenta exponencialmente mas logo atinge um valor de saturação e a ddp que se estabelece nos terminais do capacitor C é proporcional à carga elétrica “q” nele acumulada. A constante de proporcionalidade é chamada de capacitância “C”. Em linguagem matemática,

$$V(t) = (1/C).q(t) \text{ ou } q(t) = C.V(t)$$

Como  $dq/dt = i$ ,

$$i = C.dV/dt$$

Somando todas as cargas elétricas “q” acumuladas no capacitor C durante o período de tempo “dt”, resulta que

$$V(t) = (1/C) \int i dt$$

Sendo “q” dado em Coulombs e “V” em Volts, a capacitância “C” será dada em Coulombs por Volts (C/V), que é por definição o Farad.

Em Termos práticos, para medir a ddp que se estabeleceu entre as placas do capacitor, com o armazenamento dos fotoelétrons gerados no fotocátodo sem descarregar o mesmo, é necessário intercalar um amplificador de alta impedância entre o capacitor e o voltímetro. O amplificador empregado no aparelho Pasco Scientific tem um resistor de  $10^{13} \Omega$ , apresenta uma alta resistência de entrada e uma baixa resistência de saída, fornecendo um ganho de tensão igual a um. Antes de fazer uma segunda leitura de ddp, correspondente à incidência de uma segunda frequência “ $\nu_2$ ”, é necessário descarregar o

Capacitor, tal operação sendo efetuada com auxílio de um interruptor, que conecta o capacitor ao fio terra.

O equipamento se compõe de três blocos, a saber:

5 i) um primeiro bloco destinado à produção de fotoelétrons, que inclui um Anodo, quase pontual, e um Fotocátodo em forma de calota esférica e cujo foco coincide com o posicionamento do ánodo. Para minimizar a possibilidade de ocorrer um segundo Efeito Fotoelétrico o anodo é pequeno e feito de Platina, com  $\phi = 6,3 \text{ eV}$  (função trabalho elevada). O fotocátodo é feito de césio, cuja  $\phi = 1,38 \text{ eV}$  permite a  
10 utilização de ftons de mais de 800 nm de comprimento de onda (infravermelho) para produzir fotoelétrons ao incidir sobre a superfície de Césio. No interior do fototubo existe alto vácuo, o que faz os fotoelétrons produzidos no Fotocátodo, impulsionados pela repulsão coulombiana mútua, se dirigirem através do vácuo para o anodo. A  
15 pequena dimensão do anodo força os fotoelétrons a continuar até as placas do capacitor C onde se acumulam até atingir um ponto de saturação que é o Potencial de Parada.

ii) um segundo bloco formado pelo Capacitor “C” juntamente com um Interruptor.

20 iii) o terceiro bloco se destina a medir a ddp resultante do armazenamento dos fotoeletrons em “C”, e se compõe de um amplificador de alta impedância ( $10^{13} \Omega$ ) e um voltímetro destinado a medir o Potencial de Parada dos fotoelétrons. Esta ddp é igual à Energia Cinética (eV) dos fotoelétrons, tal como previsto por  
25 Einstein, através da fórmula

$$E = h \nu + \text{“eV”}$$

Tendo medido a Energia Cinética para cada Freqüência incidente, e conhecendo o valor da Função Trabalho do fotocátodo, é possível

determinar analiticamente o valor da Constante de Planck “h”, através da fórmula

$$h \nu = \phi + eV$$

Como  $\phi = h \nu_0$

5 Pode-se escrever  $h \nu_1 = h \nu_0 + eV_1$  e

$$h \nu_2 = h \nu_0 + eV_2$$

Subtraindo  $h \nu_2$  de  $h \nu_1$ , obtém-se que

$$“h” = e(V_1 - V_2) / (\nu_1 - \nu_2)$$

cujo valor tabelado é

10 
$$h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

como 1 eV é igual a  $1.602 \times 10^{-19}$  “J”

$$“h” = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Para determinar graficamente a Constante de Planck basta assinalar os valores das Freqüências e das Energias Cinéticas respectivamente sobre os eixos das abscissas e das ordenadas. A partir dos pontos assinalados são traçadas retas paralelas aos eixos cartesianos. Unindo os pontos de interseção destas paralelas, obtém-se uma reta inclinada, a qual forma um ângulo “ $\alpha$ ” com o eixo das abscissas, como mostra a FIGURA 2.

20 A tangente a este ângulo corresponde à Constante de Planck.

A determinação experimental do valor da Constante de Planck através do Efeito Fotoelétrico permite confirmar que:

- A Onda luminosa não é um *continuum*, mas se compõe de pulsos quantizados ou fótons;
- 25 • A energia luminosa não é proporcional à intensidade luminosa mas à Freqüência da onda luminosa;
- A Intensidade Luminosa é proporcional ao Número de Fótons (“n”  $h\nu$ ) e só indiretamente proporcional ao tempo de exposição;

- O foton incidente transfere toda sua energia a um único elétron livre, existente numa superfície fotossensível;

- Para cada superfície fotossensível existe uma única frequência “ $\nu_0$ ” abaixo da qual em condições normais não pode ocorrer Efeito Fotoelétrico.

5

Comercialmente há, em termos de aparelhos didáticos destinados a demonstrar a estudantes o Efeito Fotoelétrico, três empresas que comercializam tais aparelhos. Assim,

O aparelho da Leybold Didactic GmbH se compõe de Banco Óptico com 7 Cavaleiros, Lâmpada de Hg, Lente ( $f = + 50 \text{ mm}$ ), fenda de largura variável, lente de foco variável, prisma, lente ( $f = + 150 \text{ mm}$ ) e célula fotoelétrica ou fotocátodo de potássio; dois galvanômetros respectivamente de potencial de retardo (escala de zero a + 3 Volts) e de corrente fotoelétrica (escala de 0 a  $7 \mu\text{A}$ ), amplificador (escalas  $10^{11}$  a  $10^{-6} \text{ A}$ ), potenciômetro ou reostato de cursor móvel ( $1000 \Omega$ ) e dez conectores.

15

O equipamento didático da empresa Phywe Systeme GmbH compreende uma fonte de alimentação para a lâmpada de Hg, um banco óptico com 5 cavaleiros, diafragma e portante, porta célula + Pilha + Potenciômetro (potencial de retardo), amplificador (escala de zero a + 3 Volts), galvanômetro e quatro conectores.

20

O terceiro equipamento didático destinado a demonstrar o Efeito Fotoelétrico é fornecido pela empresa Pasco Scientific, e é composto de amplificador de alta impedância ( $10^{13} \Omega$ ), um fotocátodo ou diodo, um voltímetro digital em escalas de 200 mV, 2 V, 200 V, 1000 V, uma lâmpada de Hg de 100 W, uma rede difração de 300 ou 600 linhas/mm e dois conectores.

25

No entanto, os aparelhos didáticos comerciais disponíveis

apresentam um grande número de módulos – até 13 no caso do aparelho da empresa Leybold – e custo elevado, na faixa de US\$ 10.000,00. O grande número de módulos torna trabalhosa a montagem do equipamento em sala de aula, sem contar o grande espaço físico necessário para o arranjo do equipamento. O custo por outro lado inviabiliza a aquisição do aparelho por parte de uma instituição de ensino que não seja particularmente aquinhoadada em termos financeiros.

É importante citar ainda que o Efeito Fotoelétrico encontra importantes aplicações práticas, já desenvolvidas, uma das quais é a Espectroscopia Fotoeletrônica (PhotoElectron Spectroscopy ou PES), uma técnica usada para medir a distribuição de energia de elétrons que são ejetados por quanta de luz de átomos ou moléculas de uma amostra. Um aparelho que implementa esta técnica está descrito na patente US 6326617 B1.

Portanto, a técnica ainda necessita um aparelho didático para a demonstração do Efeito Fotoelétrico que contenha número reduzido de módulos, e portanto que seja de fácil montagem em sala de aula, ocupando pouco espaço físico e adicionalmente de baixo custo, tal aparelho didático sendo descrito e reivindicado no presente pedido.

## **SUMÁRIO DA INVENÇÃO**

De um modo geral o aparelho didático de acordo com a presente invenção para demonstrar o Efeito Fotoelétrico se compõe de dois módulos, um primeiro módulo, A, contendo a fonte luminosa que produz raios discretos do espectro visível do átomo de Hg, a radiação produzida sendo direcionada sobre a superfície fotossensível contida em um segundo módulo, B, contendo célula fotoelétrica e circuitos impressos.

Assim o aparelho didático (100) de acordo com a invenção para

demonstrar o efeito fotoelétrico, compreende:

Um primeiro módulo A, conectado à rede elétrica e constituído de uma caixa de alumínio (103) para envolver o módulo, contendo como fonte luminosa uma lâmpada de mercúrio (101) acionada por reator (102), a lâmpada (101) emitindo uma radiação UV e visível, a caixa (103) sendo dotada de um tubo metálico móvel (104) para colimar o feixe policromático gerado pela lâmpada (101);

Um segundo módulo B, constituído de uma fonte de alimentação, uma caixa de alumínio (108) para envolver o módulo, célula fotoelétrica (119) dotada de superfície fotossensível, trilha (105) com filtro (106) da frequência escolhida, as frequências variando entre amarelo, verde, azul, violeta e UV, dito filtro (106) estando colocado exatamente sobre o furo (107) de entrada de radiação da dita célula fotoelétrica (119), um gerador de potencial (118) e um medidor de corrente (117), a célula (119) formando um circuito série com o gerador de potencial (118) e o medidor de corrente (117), voltímetro (115) com mostrador para efetuar leituras de corrente ( $i$ ) ou potencial de retardo ( $v$ ), pelo que a lâmpada (101) emite um feixe de radiação UV e visível que é colimado e monocromatizado sobre a superfície fotossensível da célula fotoelétrica (119), produzindo uma corrente fotoelétrica ou potencial de parada lida no mostrador do voltímetro (115), as medidas de frequência e potencial de parada sendo colocadas em gráfico gerando uma reta onde a tangente do ângulo  $\alpha$  é a Constante de Planck “ $h$ ” usada na equação de Einstein para dimensionar a Quantização da luz, demonstrando assim o Efeito Fotoelétrico.

Assim, a invenção provê um aparelho didático com um sistema de contato direto “filtro-célula fotoelétrica” que elimina a incidência de frequências adjacentes pelo que o experimento de demonstração do

Efeito Fotoelétrico pode ser realizado com total claridade.

A invenção provê ainda um aparelho didático com apenas dois módulos que não necessitam de conexão entre si.

5 A invenção provê ainda um aparelho didático compacto, que exige pequeno espaço sobre uma bancada ou mesa de demonstração.

A invenção provê ainda um aparelho didático que por seu baixo custo, permite a demonstração do Efeito Fotoelétrico sem grandes despesas para a instituição de ensino.

### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

10 A FIGURA 1 anexa ilustra um esquema simplificado do fototubo e amplificador do arranjo conforme o aparelho didático da empresa Pasco Scientific.

15 A FIGURA 2 anexa é uma representação gráfica das Energias Cinéticas vs. Freqüências utilizada para a determinação da Constante de Planck.

A FIGURA 3 anexa é um desenho esquemático dos dois módulos de que se compõe o aparelho didático conforme a invenção.

20 A FIGURA 4 anexa é um desenho esquemático do módulo B que contém os equipamentos eletrônicos do aparelho de acordo com a invenção.

A FIGURA 5 anexa é um diagrama simplificado do mesmo módulo B da FIGURA 4.

A FIGURA 6 anexa é um diagrama simplificado do circuito do módulo A do aparelho de acordo com a invenção.

### **25 DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO**

Conforme mencionado anteriormente, o aparelho didático de acordo com a presente invenção para demonstrar o Efeito Fotoelétrico se compõe de somente dois módulos. O aparelho didático da invenção

está representado esquematicamente na Figura 3, o conjunto dos módulos estando designado pelo numeral (100).

O primeiro módulo contém a fonte luminosa que produz raios discretos do espectro visível do átomo de Hg, a radiação produzida sendo direcionada sobre uma superfície fotossensível. O primeiro módulo está representado como módulo A na Figura 3 anexa.

O circuito do módulo A está representado na Figura 6 e compreende um reator (102) e uma lâmpada de vapor de mercúrio (101) com conexão à rede elétrica. De acordo com a invenção a fonte luminosa é uma lâmpada de mercúrio (101), de alta pressão de 125 W e acionada por reator (102). Lâmpada de mercúrio (101) e reator (102) são materiais disponíveis no comércio. É preferível cortar o bulbo externo da lâmpada (101) para incorporar a radiação UV ao feixe emergente emitido pelo vapor de mercúrio. Lâmpada (101) e reator (102) estão inseridos em uma caixa (103) de alumínio para dissipar o calor gerado ao ambiente. As dimensões da caixa (103) podem ser 15 cm de altura por 20 cm de largura e 15 cm de profundidade.

Conforme a Figura 3, a saída do feixe de radiação UV e visível se localiza na parede lateral da caixa (103) onde também se encontra um tubo metálico móvel (104) cujo objetivo é colimar o feixe policromático sobre o filtro (106) do módulo B, dito filtro (106) atuando como monocromador para monocromatizar o feixe policromático emitido pela lâmpada (101), o filtro (106) estando embutido na parede externa do módulo B, exatamente sobre o furo (107) de entrada de radiação da célula fotoelétrica (não representada).

O segundo módulo do aparelho didático está representado como Módulo B na Figura 4 anexa.

O segundo módulo, B, contém a célula fotoelétrica e circuitos, de

modo a:

- Produzir fotoelétrons;
- Dimensionar a corrente fotoelétrica assim produzida; e
- Medir o potencial de parada dos fotoelétrons produzidos.

5 A medida do potencial de parada equivale a medir a energia cinética dos fotoelétrons, já que esta energia é proporcional à frequência da radiação incidente.

O módulo B compreende uma caixa de alumínio (108) de 18 cm de largura por 14 cm de altura e 18 cm de profundidade, onde se  
10 encontram todos os componentes eletrônicos do sistema de medida, incluindo a célula fotoelétrica (não representada) com sua respectiva janela, que vem a ser um furo redondo (107) de cerca de 3 cm localizado na parede lateral esquerda do aparelho (100). Exatamente sobre este furo (107) e rente à parede da caixa  
15 (108) é colocado um trilho (não representado) em forma de “U” cuja função é acomodar os diversos filtros (106), um de cada vez, que são encaixados no trilho. Uma vez encaixado no trilho, o filtro (106) obstrui totalmente o furo (107) da célula fotoelétrica, atuando portanto como monocromador, colimando o feixe diretamente sobre a célula  
20 fotoelétrica. Esta por sua vez possui um cátodo com superfície fotossensível de potássio.

Externamente, o módulo B apresenta uma chave (110) para ler  
alternativamente corrente fotoelétrica ou potencial de retardo; uma  
chave (111) para estabelecer potencial zero; uma chave (112) para  
25 escala x1, x10 ou x 100 para a corrente fotoelétrica, uma chave (113) entre  $-3V$  e  $+3V$  para medir o potencial, uma chave (114) de leitura, um mostrador (115) de nanoampéres/volts, e uma chave (116) para o ajuste zero.

De acordo com o princípio da invenção, o contato direto “filtro-célula fotoelétrica” permite a realização do experimento de demonstração do Efeito Fotoelétrico em locais sem nenhum tipo de condições especiais. Para trocar a frequência incidente basta trocar o  
5 filtro. Para dimensionar o valor da corrente fotoelétrica, basta selecionar a escala de corrente adequada. O aparelho é dotado de dispositivo que permite a leitura da corrente fotoelétrica ou do potencial de parada.

• **Processo para demonstrar o Efeito Fotoelétrico com auxílio  
10 do Aparelho Didático (100) da Invenção**

O aparelho didático (100) de acordo com a invenção é operado do seguinte modo:

a) Colocar o módulo A contendo a fonte luminosa (101) em frente ao furo (107) da célula fotoelétrica na lateral esquerda do módulo B, o  
15 furo (107) estando coberto pelo filtro (106) desejado;

b) variar a distância entre os dois módulos A e B conforme a sensibilidade necessária, com distância menor gerando corrente fotoelétrica maior, e distância maior gerando corrente fotoelétrica menor;

20 c) ligar o aparelho (100) na corrente elétrica;

d) com a chave leitura (114) virada para baixo, ajustar o zero do nanoamperímetro lido no mostrador (115), estando a chave de escala (112) na posição x 100;

25 após o ajuste, retornar a chave leitura (114) para cima e colocar a chave de escala (112) na posição x1;

e) para medir a corrente fotoelétrica, colocar a chave zero (111) na posição para baixo e a chave (110) “corrente” ou “potencial” na posição “corrente”;

f) potencial

f) ler no mostrador (115) o valor integral da corrente fotoelétrica em nanoampéres, se necessário aumentar a sensibilidade do nanoamperímetro do aparelho (100) com as posições x10 e x100 da chave de escala (112);

5 g) para medir o valor do potencial de parada, colocar a chave (111) potencial zero para cima, e ajustar o controle “potencial” (113) até que a corrente lida no mostrador (115) seja zerada, pelo que o potencial de parada iguala a energia cinética dos fotoelétrons;

10 h) ler o valor do potencial virando a chave (110) “corrente” ou “potencial” para baixo (posição “potencial”) e ler o valor do potencial de parada, em volts, no mostrador (115), obtendo valores de potencial de parada correspondentes aos valores de freqüências incidentes correspondentes aos filtros usados;

15 i) construir um gráfico colocando nas ordenadas os valores dos potenciais de parada assim obtidos e nas abscissas os valores das freqüências incidentes, de modo a obter o valor numérico da constante de Planck, usada na equação de Einstein para dimensionar a Quantização da luz.

20 Verifica-se que o presente aparelho didático dispensa módulos usuais nos aparelhos do estado da técnica, tais como Bancos Ópticos, Lentes, Galvanômetros, Voltímetros, e/ou Amperímetros, tanto digitais como analógicos, como também fontes de Alimentação do potencial de retardo. Todas estas funções foram reunidas no módulo B do aparelho (100) da invenção, leve e compacto.

25 **▪ Estrutura eletrônica do aparelho didático (100)**  
A Figura 4 ilustra esquematicamente a estrutura eletrônica contida no módulo B do aparelho didático da invenção.

Basicamente a estrutura eletrônica compreende quatro áreas distintas:

- O medidor de corrente digital (117);
- O gerador de potencial de parada (118);
- 5 • mostrador digital (115);
- a célula fotoelétrica (119).

O coração do sistema eletrônico é o medidor de corrente (117), constituído de um amplificador de corrente cuja principal característica é a baixíssima corrente residual de entrada, tipicamente na casa de 100  
10 fA ( $1 \text{ fA} = 10^{-15}$  ampères), ou  $10^{-13}$  ampères. Esta característica permite detectar correntes de entrada de até cerca de  $10^{-11}$  ampères com facilidade.

O circuito basicamente converte a corrente de entrada em um sinal de saída de tensão, apto a ser medido pelo voltímetro digital (mostrador  
15 (115)).

O ganho de conversão pode ser escolhido em três escalas, x1, x10 e x100. Na escala x1 o ganho é de 1 mV (milivolt) de saída por nA (nanoampère) de entrada. Além da chave (112) para seleção da escala de trabalho, o amplificador (117) possui também um ajuste de zero  
20 (116) para garantir a precisão das medidas ao longo do tempo e em qualquer temperatura ambiente.

O gerador de potencial de parada (118) é uma fonte com tensão de saída ajustável entre  $-3$  e  $+3$  volts. Suas principais características são a baixa resistência de saída e a alta estabilidade da tensão de saída em  
25 função da temperatura ambiente.

O mostrador (115) é um voltímetro digital de  $3 \frac{1}{2}$  dígitos, com fundo de escala de 2,00 volts, alta precisão de medida (cerca de 0,1%) e alta impedância de entrada (cerca de 200 M $\Omega$ ).

A célula fotoelétrica (119) é uma peça única, sendo uma ampola de vidro em vácuo com um fotocatodo revestido de potássio e um ânodo coletor de elétrons. Uma fonte de alimentação não representada na Figura 4 provê as diversas tensões necessárias ao funcionamento do gerador de potencial (118), do medidor de corrente (117) e do mostrador (115).

A Figura 5 ilustra a essência do funcionamento do sistema eletrônico do módulo B, e deve ser entendido em conjunto com a Figura 4.

De acordo com a Figura 5, a célula fotoelétrica (119) funciona como um gerador de corrente, proporcional à quantidade e a energia da luz incidente no fotocatodo da célula (119). A medida do Efeito Fotoelétrico é fundamentalmente um circuito série entre o gerador de potencial (118), o medidor de corrente digital (117) ou galvanômetro, e a célula (119). O gerador (118) pode ter sua voltagem ajustada entre  $-3$  e  $+3$  volts, e serve para anular a corrente  $I$ , a fim de determinar a energia cinética dos fotoelétrons.

Através da observação das Figuras 4 e 5 fica claro que a célula fotoelétrica (119) forma um circuito série com o gerador de potencial (118), a chave potencial zero (111), a chave “leitura” (114) e o medidor de corrente (117). Com a chave potencial zero (111) virada para a esquerda e a chave “leitura” (114) fechada, é reproduzido o circuito da Figura 5. A chave “leitura” (114) quando aberta, desliga a entrada do medidor de corrente (117) do circuito de medida, deixando o mesmo com corrente de entrada zero. Esta situação permite o ajuste de zero do medidor de corrente (117).

A chave (111) potencial zero quando virada para a direita, retira do circuito o gerador de potencial (118), simulando assim a situação de

potencial zero.

A chave (110), “corrente” ou “potencial”, está ligada ao voltímetro (mostrador) digital (117). A chave (110) permite efetuar a leitura ou do sinal na saída do medidor de corrente (i) ou do potencial de retardo (v).

5 Tanto a saída do medidor de corrente (117) quanto do gerador de potencial (118) estão referenciados ao terra.

• **Comparação entre o aparelho didático (100) da invenção e os aparelhos do estado da técnica Leybold, Phywe e Pasco**

• **Leybold**

10 O valor de venda do aparelho comercializado pela firma Leybold é superior a US\$ 9.000,00, o que o torna proibitivo para muitas instituições de ensino do país.

15 Além disso, os aspectos produção e colimação de 5 feixes monocromáticos (5 frequências) como UV-A, violeta, azul, verde e laranja, que sejam suficientemente intensos para fornecer 5 correntes fotoelétricas mensuráveis são de difícil execução com o aparelho Leybold.

20 Também a medição precisa das 5 correntes fotoelétricas e dos respectivos potenciais de retardo não é facilmente executada com o aparelho Leybold.

A seguir serão detalhadas as dificuldades apresentadas pelo aparelho Leybold.

25 Para selecionar 5 radiações monocromáticas emitidas por uma lâmpada de mercúrio, o aparelho Leybold se utiliza de um prisma de Visão direta.

Uma vez obtida a decomposição espectral do feixe policromático, é necessário localizar um afastamento angular conveniente, que impeça a incidência simultânea, sobre a superfície fotossensível, de duas ou

mais freqüências adjacentes. Assim, para freqüências próximas, a distância entre o prisma e a célula fotoelétrica não pode ser inferior a 50 cm. Isto levou o fabricante a intercalar no banco óptico uma fenda variável, o que afeta a intensidade luminosa, já que ela varia com o quadrado da distância ( $I$  é proporcional a  $1/d^2$ ).

A fim de compensar as perdas inevitáveis decorrentes do arranjo proposto, o fabricante apelou para a melhoria do caminho óptico e para um poderoso amplificador da corrente fotoelétrica.

A melhoria do caminho óptico foi conseguida com um jogo de lentes, colimadores e objetivas. No entanto a observação da distância focal desses recursos da Óptica Geométrica exige espaço, de modo que o Banco Óptico tem 100 cm de comprimento, de modo que o caminho óptico total que os ftons emitidos pela lâmpada de Hg devem percorrer até alcançar a superfície fotossensível não é inferior a 150 cm.

Apesar de todos os recursos envolvidos, ainda havia perdas de intensidade luminosa, de modo que o aparelho Leybold requer uma sala escura para demonstrar o Efeito Fotoelétrico.

Ao contrário do aparelho Leybold, o aparelho didático (100) da invenção opera à luz do dia, em sala ou mesmo ao ar livre. Não são utilizados prismas nem rede de difração, apenas 5 filtros encaixáveis na parede lateral da caixa metálica (108) do amplificador da corrente fotoelétrica. Na parte interna da mesma parede lateral da caixa metálica (108), encostada em um furo (109) e defronte ao filtro óptico se acha posicionada a célula fotoelétrica (119). A distância máxima entre célula (119) e filtro óptico é inferior a 5 mm.

Assim, a geometria escolhida para o aparelho didático (100) permite reduzir a distância entre a lâmpada de Hg e a superfície fotossensível para menos de 15 cm, contra 150 cm do aparelho da

empresa Leybold.

Aproximidade de 15 cm entre lâmpada e célula faz com que a intensidade luminosa seja grande, e esta deve ser diminuída, situação exatamente contrária àquela encontrada no aparelho Leybold.

- 5 Para diminuir a intensidade luminosa basta usar uma lâmpada de Hg mais fraca, por exemplo de 100 W de potência, em vez de 150 W. Alternativamente pode-se deslocar a fonte luminosa (101) para mais longe da célula fotoelétrica (119), ou selecionar uma das escalas inferiores do amplificador (117), as escalas disponíveis sendo  $10^{-11}$  A, 10  $10^{-10}$  A,  $10^{-9}$  A,  $10^{-8}$  A,  $10^{-7}$  A,  $10^{-6}$  A, e  $10^{-5}$  A.

- Um problema adicional do aparelho Leybold é que a corrente elétrica do amplificador é dimensionada por um simples galvanômetro de bobina móvel, à qual está acoplado o ponteiro do galvanômetro. Este ponteiro mostra o valor numérico da corrente fotoelétrica na escala 15 escolhida. Tendo em vista a presença de campos eletromagnéticos espúrios produzidos por transformadores e/ou retificadores, e ponteiros móveis afastados por uma distância apreciável de uma escala fixa, ocorre o fenômeno de paralaxe, ou imprecisão congênita.

- Já o aparelho (100) da invenção compreende um medidor de corrente 20 digital (117) acoplado a um mostrador (115) que contém duas divisões, uma divisão superior onde pode ser lido o valor numérico da corrente fotoelétrica, enquanto a divisão inferior do mostrador (115) apresenta o valor numérico da voltagem ou potencial de retardo aplicada. A chave (110) inversora pode acionar o amperímetro e o voltímetro digitais.
- 25 Assim o aparelho (100) elimina o uso de bobinas móveis sujeitas a campos espúrios e os ponteiros móveis que levam a erros de paralaxe nas leituras de medidas.

- **Phywe**

O valor de venda do aparelho comercializado pela firma Phywe é superior a US \$ 8.000,00, o que o torna proibitivo para muitas instituições de ensino do país.

O conceito do aparelho da Phywe Systeme se assemelha ao do aparelho da Leybold Didactic GmbH. O aparelho compreende um Banco Óptico sobre o qual estão alinhados uma lâmpada de Hg de 150 W, um obturador com diafragma, um porta filtro e uma célula fotoelétrica, como também um amplificador e um único instrumento de bobina móvel com duas escalas encaixáveis, uma para medir a corrente fotoelétrica e outra para medir voltagem ou potencial de retardo.

Os 5 feixes são monocromatizados com auxílio de filtros, o que evita perda de intensidade luminosa. Os 5 filtros substituem o prisma utilizado no aparelho Leybold. No entanto, o aparelho Leybold ainda utiliza medidores analógicos.

#### 15 • Pasco Scientific

O valor de venda do aparelho comercializado pela firma Pasco Scientific é de cerca de US\$ 1700,00, o que o torna bastante acessível.

O aparelho não compreende a medida da corrente fotoelétrica e por conseguinte do potencial de retardo, as medidas se restringindo ao dimensionamento da quantidade de cargas elétricas em função da frequência “ $\nu$ ” da radiação incidente, o que é feito através de um amplificador de alta impedância ( $> 10^{12} \Omega$ ).

A leitura da quantidade de cargas elétricas é feita em um voltmetro digital simples. Se a ddp for “ $V_0$ ” e se este valor for colocado em gráfico em função da frequência “ $\nu$ ” da radiação incidente, a reta resultante apresenta um ângulo de inclinação que é igual a “ $h/e$ ”, onde “ $h$ ” é a Constante de Planck. O ponto onde esta reta intercepta o eixo das frequências localiza a Frequência de Corte “ $\nu_0$ ”, abaixo da qual não

existe mais Efeito Fotoelétrico. Note-se que “ $\Phi_0$ ” não é a função trabalho de nenhuma célula fotoelétrica, mas de um fotodiodo (semicondutor) que substitui a Célula Fotoelétrica.

Assim, a simplicidade do aparelho explica seu baixo preço.

- 5 Um problema do aparelho é a monocromatização do feixe emitido por uma lâmpada de Hg de 150W. O monocromador utilizado é uma Rede de Difração. Para fazer incidir cada raia sobre o fotodiodo, é necessário um braço móvel acoplado a um Banco Óptico. O uso da Rede de Difração introduz uma série de limitações para a Intensidade Luminosa, o que exige que a experiência do Efeito Fotoelétrico seja executada em uma sala escura.

À guisa de resumo, a TABELA 1 abaixo resume as principais características de cada aparelho didático disponível comercialmente, bem como aquelas do aparelho didático da invenção.

15

**TABELA 1**

FABRICANTES	LEYBOLD	PHYWE	PASCO	INVENÇÃO
ITENS				
Monocromador	Prisma*	Filtros	Rede de Difração	Filtros
Amplificador	$10^{-11}$ a $10^{-6}$ A	$10^{-11}$ a $10^{-8}$ A	$> 10^{12}\Omega$	$10^{-11}$ a $10^{-7}$ A
Medidor de corrente	Galvanômetro	Galvanômetro	Ohmímetro	Amperímetro Digital**
Medidor de Potencial de retardo	Voltímetro analógico	Voltímetro analógico	Voltímetro digital	Voltímetro digital
Método	Corrente fotoelétrica	Corrente fotoelétrica	Carga elétrica	Corrente fotoelétrica
Fotocátodo	Catodo de potássio	Catodo de potássio	Fotodiodo	Catodo de potássio

N° de Módulos	6 + 7 = 13	6 + 2 = 8	4	2
Conectores	10	4	2	Nenhum
Preço em US\$	9.050,00	8.300,00	1.700,00	1.500,00

\* Requer escuridão absoluta para demonstrar o Efeito Fotoelétrico

\*\* É possível com o mesmo mostrador medir tanto a Corrente Fotoelétrica quanto o Potencial de Retardo, com auxílio de uma chave inversora.

## REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho didático (100) para demonstrar o efeito fotoelétrico, a partir de uma fonte luminosa que emite uma radiação sobre uma superfície fotossensível, gerando fotoelétrons, caracterizado por que  
5 compreende:

a) Um primeiro módulo A, conectado à rede elétrica e constituído de uma caixa de alumínio (103) para envolver o módulo, contendo como fonte luminosa uma lâmpada de mercúrio (101) acionada por reator (102), a lâmpada (101) emitindo uma radiação UV e visível, a caixa  
10 (103) sendo dotada de um tubo metálico móvel (104) para colimar o feixe policromático gerado pela lâmpada (101);

b) Um segundo módulo B, constituído de uma fonte de alimentação, uma caixa de alumínio (108) para envolver o módulo, célula fotoelétrica (119) dotada de superfície fotossensível, trilho com  
15 filtro (106) da frequência escolhida, as frequências variando entre amarelo, verde, azul, violeta e UV, dito filtro (106) estando colocado exatamente sobre o furo (107) de entrada de radiação da dita célula fotoelétrica (119), um gerador de potencial (118) e um medidor de corrente (117), a célula (119) formando um circuito série com o gerador  
20 de potencial (118) e o medidor de corrente (117), voltímetro (115) com mostrador para efetuar leituras de corrente (i) ou potencial de retardo (v), pelo que a lâmpada (101) emite um feixe de radiação UV e visível que é colimado e monocromatizado sobre a superfície fotossensível da célula fotoelétrica (119), produzindo uma corrente fotoelétrica ou  
25 potencial de parada lida no mostrador do voltímetro (115), as medidas de frequência e potencial de parada sendo colocadas em gráfico gerando uma reta onde a tangente do ângulo  $\alpha$  é a Constante de Planck "h" usada na equação de Einstein para dimensionar a

quantização da luz, demonstrando assim o Efeito Fotoelétrico.

2. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que a lâmpada de mercúrio é uma lâmpada de alta pressão, de 125 W.

5 3. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que o trilho é em forma de “U” e acomoda os diversos filtros (106), um de cada vez, correspondentes a cada frequência resultante da monocromatização do feixe de luz incidente oriundo da lâmpada (101).

10 4. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 3, caracterizado por que o filtro (106) obstrui totalmente o furo (107) da célula fotoelétrica (119), atuando portanto como monocromador, para receber e monocromatizar o feixe policromático gerado pela lâmpada (101), colimando o feixe diretamente sobre a célula fotoelétrica (119).

15 5. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que o medidor de corrente (117) é um amplificador de corrente com baixa corrente residual de entrada, na faixa de 100 fA ou  $10^{-13}$  ampères, tal característica permitindo detectar correntes de entrada de até cerca de  $10^{-11}$  ampères.

20 6. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 5, caracterizado por que o circuito basicamente converte a corrente de entrada no medidor (117) em um sinal de saída de tensão, apto a ser medido pelo voltímetro digital (mostrador (115)), o ganho de conversão podendo ser escolhido em três escalas, x1, x10 e x100.

25 7. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 6, caracterizado por que, além da chave (112) para seleção da escala de trabalho, o amplificador (117) é igualmente dotado de um ajuste de zero (116) para garantir a precisão das medidas ao longo do tempo e

qualquer temperatura ambiente.

5 8. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que o gerador de potencial (118) é uma fonte com tensão de saída ajustável entre  $-3$  e  $+3$  volts, com baixa resistência de saída e alta estabilidade da tensão de saída em função da temperatura ambiente e se destina a anular a corrente  $I$ , a fim de determinar a energia cinética dos fotoelétrons.

10 9. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que o mostrador (115) é um voltímetro digital de  $3 \frac{1}{2}$  dígitos, com fundo de escala de 2,00 volts, precisão de medida de cerca de 0,1% e alta impedância de entrada, de cerca de 200 M $\Omega$ .

15 10. Aparelho didático de acordo com a reivindicação 9, caracterizado por que o mostrador (115) contém duas divisões, uma divisão superior onde pode ser lido o valor numérico da corrente fotoelétrica, enquanto a divisão inferior apresenta o valor numérico da voltagem ou potencial de retardo aplicada.

20 11. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que a célula fotoelétrica (119) é uma ampola de vidro em vácuo com um fotocatodo revestido de potássio e um anodo coletor de elétrons e funciona como um gerador de corrente, proporcional à quantidade e à energia da luz incidente no fotocatodo.

25 12. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que quanto maior a distância entre os módulos A e B menor a corrente fotoelétrica gerada.

13. Aparelho didático (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que permite a demonstração do Efeito Fotoelétrico em condições de luz no ambiente.

14. Processo para demonstrar o Efeito Fotoelétrico com auxílio do

aparelho (100) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por que compreende as seguintes etapas:

5 a) Colocar o módulo A contendo a fonte luminosa (101) em frente ao furo (107) da célula fotoelétrica na lateral esquerda do módulo B, o furo (107) estando coberto pelo filtro (106) desejado;

b) Variar a distância entre os dois módulos A e B conforme a sensibilidade desejada;

c) Ligar o aparelho (100) na corrente elétrica;

10 d) Com a chave leitura (114) virada para baixo, ajustar o zero do nanoamperímetro lido no mostrador (115), estando a chave de escala (112) na posição x100;

e) Após o ajuste, retornar a chave leitura (114) para cima e colocar a chave de escala (112) na posição x1;

15 f) Para medir a corrente fotoelétrica, colocar a chave potencial zero (111) na posição para baixo e a chave (110) “corrente” ou “potencial” na posição “corrente”;

20 g) ler no mostrador (115) o valor integral da corrente fotoelétrica em nanoampères, se necessário aumentar a sensibilidade do nanoamperímetro do aparelho (100) com as posições x10 e x100 da chave de escala (112);

h) para medir o valor do potencial de parada, colocar a chave (111) potencial zero para cima, e ajustar o controle “potencial” (113) até que a corrente lida no mostrador (115) seja zerada, pelo que o potencial de parada iguala a energia cinética dos fotoelétrons;

25 i) ler o valor do potencial virando a chave (110) “corrente” ou “potencial” para baixo (posição “potencial”) e ler o valor do potencial de parada, em volts, no mostrador (115), obtendo valores de potencial de parada correspondentes aos valores de freqüências incidentes

correspondentes aos filtros usados;

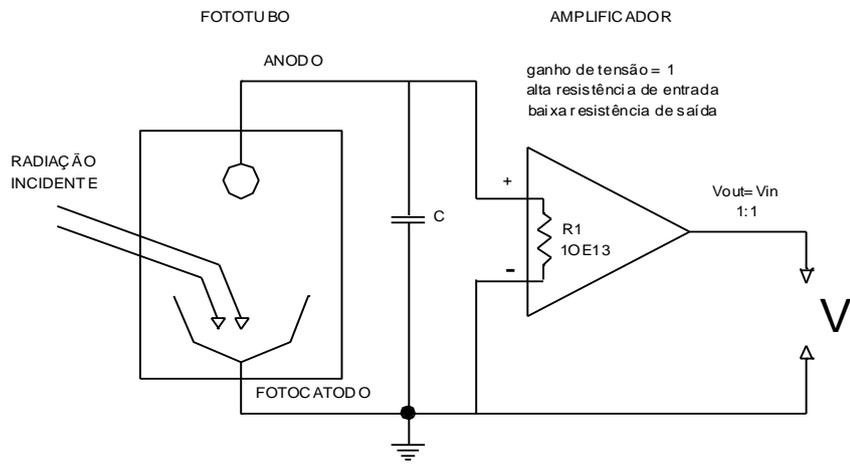
- 5 j) construir um gráfico colocando nas ordenadas os valores dos potenciais de parada assim obtidos e nas abscissas os valores das frequências incidentes, de modo a obter o valor numérico da constante de Planck “h”, usada na equação de Einstein para dimensionar a quantização da luz.

## RESUMO

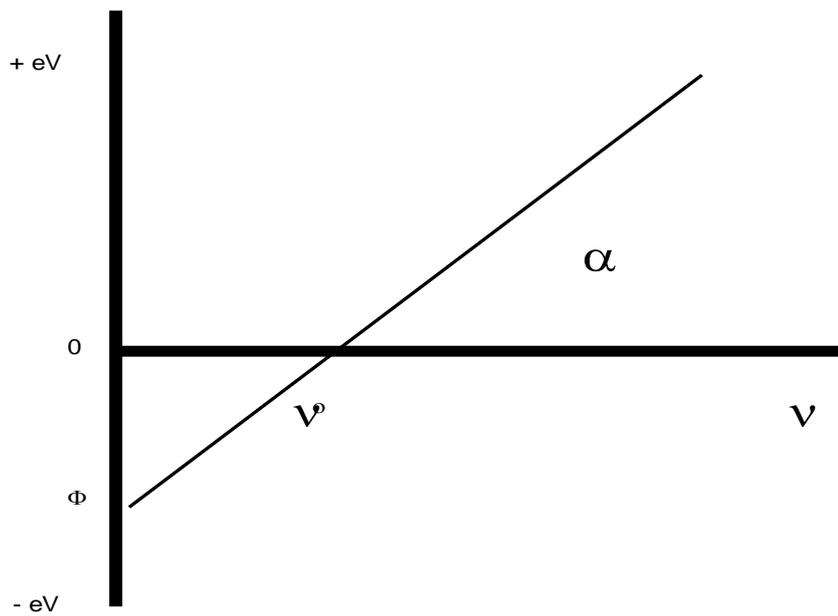
### APARELHO DIDÁTICO E PROCESSO PARA DEMONSTRAR O EFEITO FOTOELÉTRICO

É descrito um aparelho didático (100) para demonstrar o Efeito Fotoelétrico, constituído de módulo A contendo lâmpada de mercúrio (101), reator (102) e tubo metálico móvel (104) para colimar o feixe policromático de luz gerado pela lâmpada (101), e módulo B constituído principalmente de célula fotoelétrica (119), gerador de potencial (118) e medidor de corrente (117) formando um circuito em série, de modo a produzir fotoelétrons, dimensionar a corrente fotoelétrica e medir o potencial de parada dos fotoelétrons, que equivale a medir a energia cinética dos fotoelétrons, a energia cinética sendo proporcional à frequência da radiação incidente. Um gráfico das energias cinéticas determinadas para diferentes frequências permite determinar a constante de Planck “h” utilizada por Einstein para demonstrar o Efeito Fotoelétrico. O processo para demonstrar o Efeito Fotoelétrico com auxílio do aparelho (100) da invenção também é descrito.

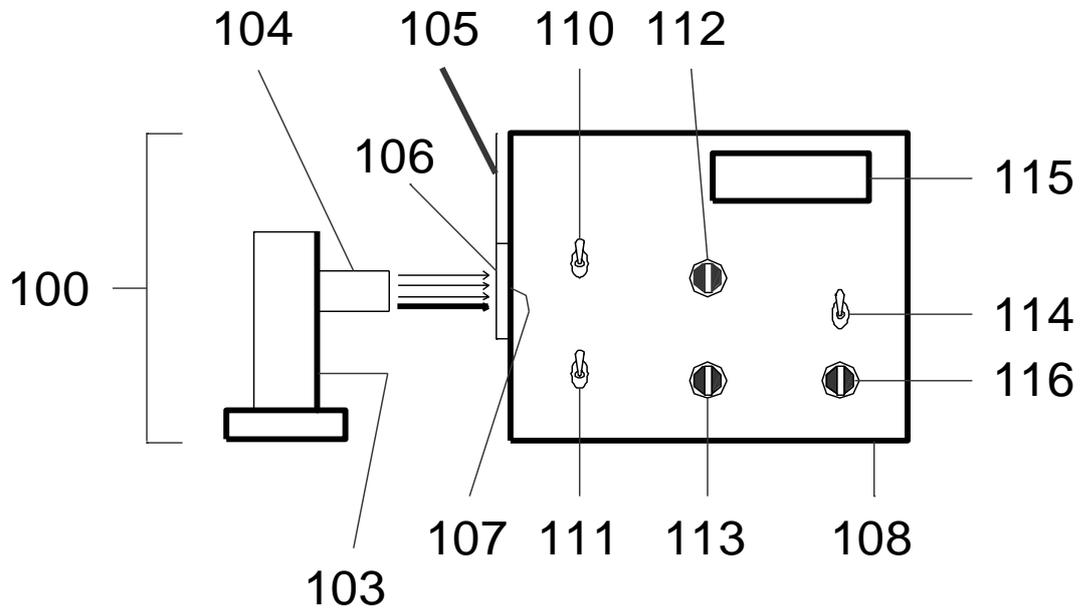
**FIGURA 1**



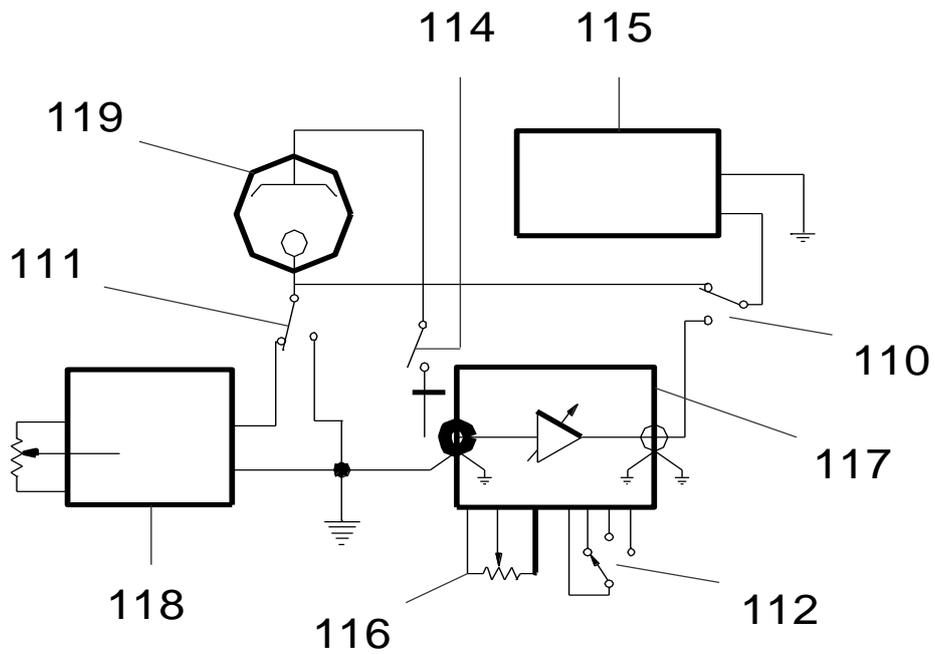
**FIGURA 2**



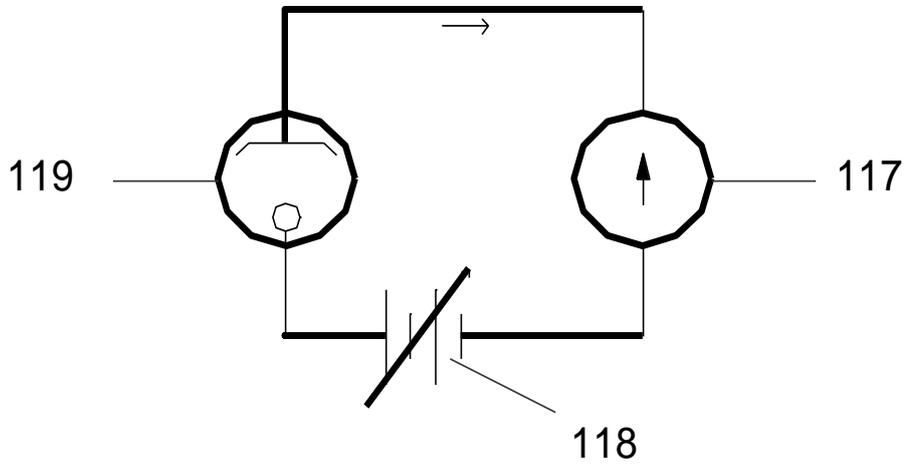
**FIGURA 3**



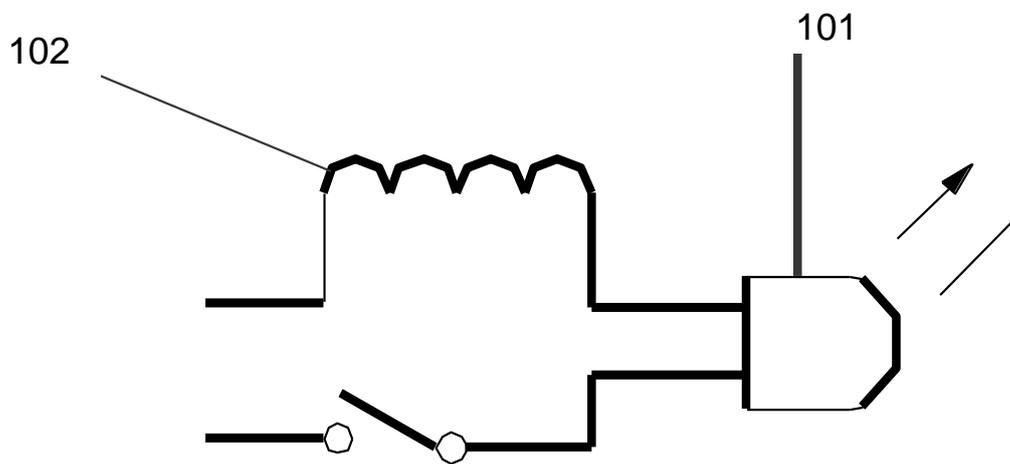
**FIGURA 4**



**FIGURA 5**



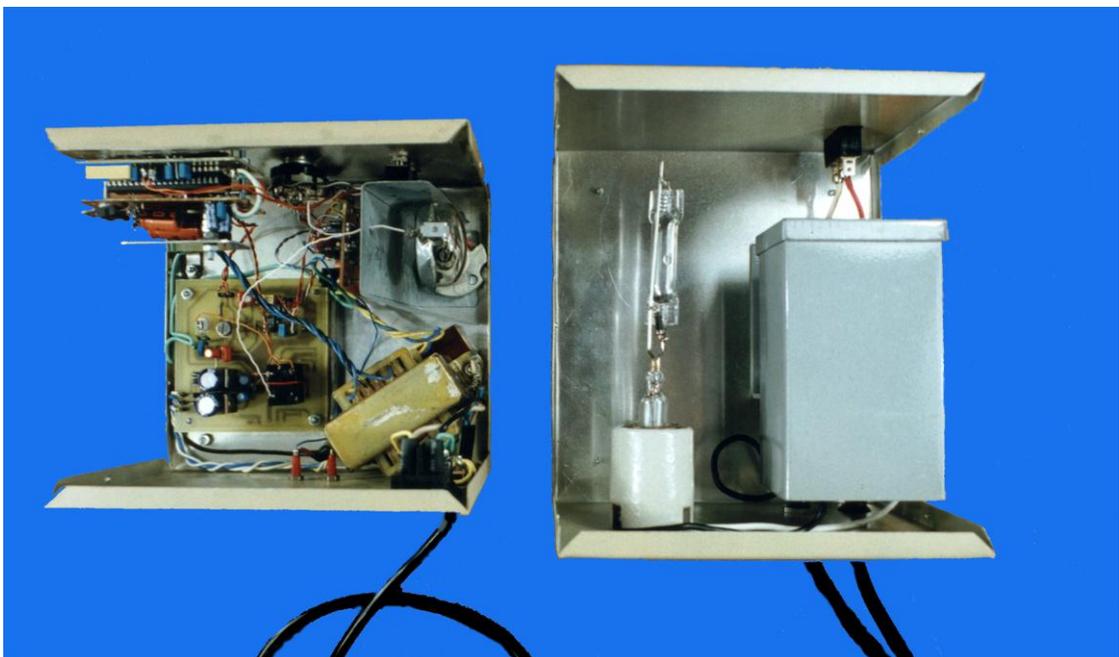
**FIGURA 6**



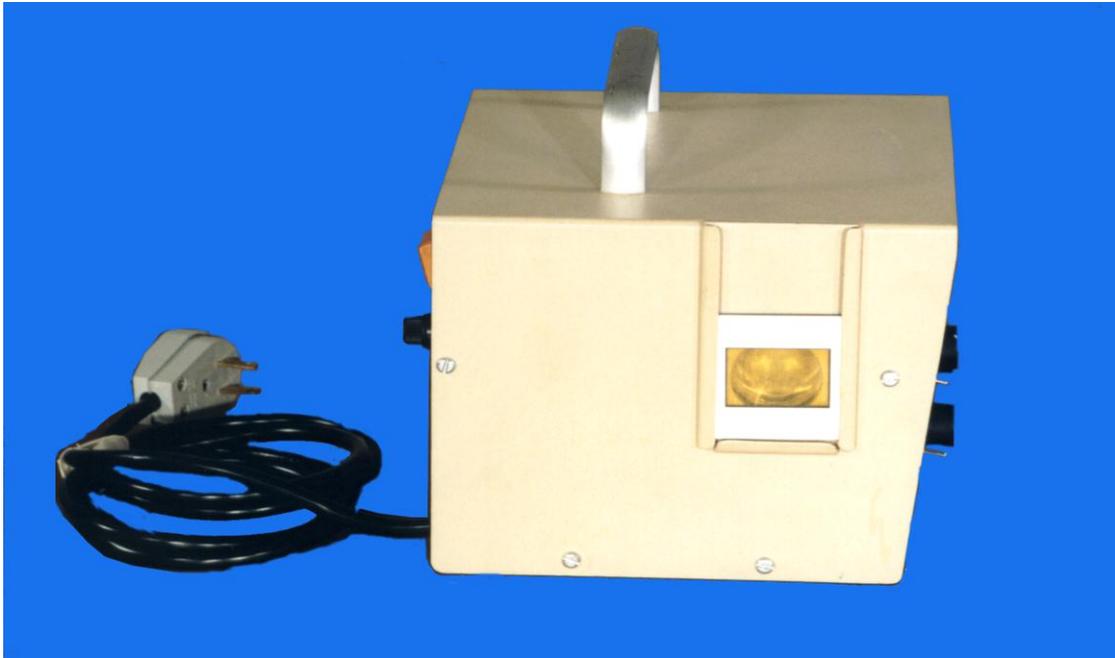
**FIGURA 7**



**FIGURA 8**



**FIGURA 9**



**FIGURA 10**

