

## Notas e Discussões

# Construção e caracterização de uma célula fotoelétrica para fins didáticos

(Build-up and characterization of a photoelectric cell for didactic purposes)

João Bernardes da Rocha Filho<sup>1</sup>, Marcos Alfredo Salami<sup>2</sup> e Vicente Hillebrand<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup>MCT/Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Recebido em 29/5/2006; Revisado em 3/8/2006; Aceito em 5/9/2006

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a caracterização de uma célula de efeito fotoelétrico e um sistema de excitação e de medição adequados para uso didático em aulas de Física. A célula é semelhante às primeiras desenvolvidas no século XIX, e o sistema de medição envolve transistores, uma bateria e um multímetro, e permite estimar a corrente fotoelétrica produzida na célula. O desenvolvimento é uma resposta à inexistência de células fotoelétricas comerciais disponíveis, que tem impedido os professores de trabalhar concretamente esse conteúdo.

**Palavras-chave:** efeito fotoelétrico, ensino de Física.

The article presents the build-up and characterization of a photoelectric cell and a system of excitation and measurement for use in physics classes. The cell is similar to those developed earlier in the XIX century and the measurement apparatus consists of transistors, battery and multimeter, which allows to estimate the photoelectric current. Due to the unavailability of commercial photoelectric cells, physics teachers have been hindered to discussing adequately the photoelectric effect. For this purpose, the system shown here provides quite appropriate tool.

**Keywords:** photoelectric effect, Physics education.

## 1. Introdução

Sabe-se que a luz interage com a matéria produzindo três efeitos elétricos:

(a) *Efeito fotovoltaico.* Aplicado na produção de células de conversão direta de luz em energia elétrica, é amplamente usado como fonte de energia, por meio de painéis fotovoltaicos;

(b) *Efeito fotocondutivo.* Aplicado na produção de células cuja resistência elétrica varia conforme a intensidade da luz incidente, usadas tradicionalmente na automação da iluminação pública, e;

(c) *Efeito fotoemissivo.* Diretamente relacionado com o efeito fotoelétrico descoberto por Hertz, em 1887, e descrito teoricamente por Einstein, em 1905.

No âmbito da sala de aula, tanto o efeito fotocondutivo quanto o efeito fotovoltaico permitem a realização de experimentos relativamente simples. De um lado, porque os Resistores Dependentes de Luz (LDRs) são baratos, e podem ser adquiridos em lojas de componentes eletrônicos, e de outro, porque dispositivos semicondutores comuns, como transistores desencapsulados, podem servir como material de experimentação para a

geração de fotoeletricidade. Com um mínimo de recursos o professor pode atrair o interesse de seus alunos para a Física, com experimentos nessa área. Estas duas possibilidades foram propostas, de forma conceitual e prática, em artigos como o de Valadares e Moreira [1], onde são apresentados exemplos de uso de LDRs e sua curva de sensibilidade espectral, e em Valadares *et al.* [2], onde são propostos experimentos com diodos iluminados, visando a observação de tensões e variações de resistência entre seus terminais. Experimento semelhante, usando LDRs, mas sem uma abordagem conceitual paralela, também foi proposto por Cruz, Leite e Carvalho [3]. Se o professor dispuser de uma célula fotoelétrica comercial a vácuo, então poderá realizar o experimento tradicional, como proposto por Tavolaro e Cavalcante [4].

O efeito fotoemissivo, porém, que é base do efeito fotoelétrico, não é abordado experimentalmente, em geral, porque as células fotoemissivas são raríssimas no mercado nacional. Elas não são feitas com semicondutores, mas sim com a antiga tecnologia das válvulas termiônicas e ligas metálicas especiais, sendo há muito

<sup>1</sup>E-mail: jbrfilho@puccrs.br.

usadas apenas para finalidades didáticas, deixando de ser comuns no final do século XX. Assim, se o professor de Física não dispuser de um conjunto didático comercial específico – raros em nosso meio pelo custo elevado – provavelmente não fará experimentos envolvendo o efeito fotoelétrico.

Este artigo apresenta, então, o resultado de uma pesquisa que conduziu ao desenvolvimento e caracterização de uma célula fotoelétrica, e a uma técnica de experimentação bastante didática e simples envolvendo o efeito fotoelétrico. Dessa investigação experimental resultaram diversas atividades didáticas em turmas regulares e oficinas extracurriculares. Essa experimentação, entretanto, não pode ser realizada sem os equipamentos de proteção contra radiação ultravioleta indicados mais adiante, pois a exposição à fonte de luz sugerida neste artigo causa cegueira permanente e queimaduras na pele.

## 2. O fenômeno físico

Hertz descobriu o efeito fotoemissivo em 1887 ao realizar experimentos com osciladores elétricos. Ao tentar medir a amplitude dos sinais produzidos por seus osciladores, medindo a distância máxima de faiscamento entre eletrodos, Hertz notou que essa distância era aumentada quando havia um arco-voltaico nas proximidades [5]. Logo percebeu que era a luz emitida pelo arco-voltaico a responsável pelo aumento da distância de faiscamento. Hertz também notou que qualquer material opaco, mas também lâminas de vidro transparente colocadas à frente dos eletrodos reduziam ou mesmo anulavam o efeito, o que o levou a presumir que era uma componente não-visível do espectro luminoso a responsável pelo fenômeno, o que foi confirmado logo depois com um espectrômetro de quartzo. Fazendo incidir sobre os eletrodos do oscilador apenas a componente ultravioleta do espectro, Hertz obteve a confirmação experimental desse efeito, que também era percebido com o uso de algumas outras fontes de luz intensa, como a queima de fitas de magnésio. Hertz também descobriu que o eletrodo negativo parecia ser crítico, pois o efeito variava de intensidade conforme a iluminação, a área, o material e a rugosidade da superfície desse eletrodo. Hoje sabemos que a radiação ultravioleta pode ser compreendida em termos de fótons que possuem energia superior à da luz visível. Conforme essa energia, os fótons têm maior ou menor probabilidade de arrancar um elétron da superfície metálica. Havendo energia excedente ela é transferida para o movimento do elétron arrancado, dando-lhe maior velocidade.

Outros pesquisadores associaram definitivamente o fenômeno ao eletrodo negativo, investigando o comportamento de esferas de zinco polidas, eletricamente carregadas e expostas à luz ultravioleta. Por aí conseguiram provar que a radiação ultravioleta tinha a propriedade de retirar elétrons de superfícies metálicas. Houve

quem sobrepusesse telas metálicas e placas metálicas polidas, eletricamente isoladas, produzindo correntes elétricas de baixa intensidade entre as peças iluminadas, sob alguma diferença de potencial. A esse dispositivo, especificamente, foi dado o nome de Célula Fotoelétrica. O desenvolvimento apresentado neste artigo envolveu especificamente esse tipo de célula.

A medição de correntes elétricas débeis era cara e complicada no final do século XIX, forçando os pesquisadores a desenvolverem células que fornecessem correntes elétricas maiores. O melhor resultado foi obtido com o uso de metais alcalinos, porém, como eles oxidavam rapidamente se expostos ao meio ambiente, as células construídas assim tornavam-se ineficientes em curtos períodos de tempo. Em seguida, foi utilizado amálgama de sódio ou potássio como superfície emissora de elétrons, reduzindo a reação ambiental e produzindo células melhores, tornando-as sensíveis também à luz visível. Nessa época essas células já eram encapsuladas a vácuo, em vidro.

Com o barateamento da produção, o uso das células fotoelétricas se disseminou, porém o surgimento dos sensores baseados em semicondutores, muito mais sensíveis, leves, pequenos e baratos, terminou com a produção comercial da célula em meados do século XX. Com seu uso restrito a aplicações educacionais, as últimas células de amálgama desapareceram do comércio por volta da década de 1970. Atualmente são produzidas artesanalmente, compradas por empresas internacionais de material didático, e custam caro porque são produzidas em baixa escala e vêm atreladas a conjuntos de experimentação.

## 3. A célula fotoelétrica e o sistema de medição

Se o objetivo do professor for o estudo do fenômeno fotoelétrico propriamente dito, então uma célula fotoelétrica precisa ser obtida. A técnica desenvolvida e apresentada neste artigo permite a experimentação direta com uma célula fotoelétrica construída pelo próprio professor.

Como a amplificação de correntes fracas é hoje relativamente fácil, utilizando transistores de silício, as correntes elétricas derivadas de metais polidos submetidos à radiação ultravioleta podem ser medidas. Assim, a idéia implementada foi a construção de uma célula fotoelétrica com materiais metálicos comuns, acoplando a ela um amplificador e um medidor.

Além disso, a fonte de radiação ultravioleta utilizada foi obtida a partir de uma lâmpada de mercúrio sem bulbo, evitando o uso de arcos-voltaicos de transformadores de solda elétrica, inacessível para uma grande parcela dos professores. Em síntese, o desenvolvimento envolveu: a construção de uma célula fotoelétrica aberta, semelhante às células dos pesquisadores da década de 1890, posteriores à Hertz, utilizando materiais de baixo

custo, obtidos em ferragens comuns; a construção de um amplificador de três transistores em cascata, com ganho de corrente elevado, interligado à célula por meio de uma bateria de 9 V; o uso de uma lâmpada de mercúrio, de iluminação pública, como fonte de radiação ultravioleta (da qual foi retirado o invólucro de vidro); a detecção do efeito fotoelétrico por meio da movimentação do ponteiro de um multímetro comum, na escala de medição de resistência elétrica, que acompanha a variação da corrente fotoelétrica na célula.

Obs: a radiação ultravioleta emitida por essa lâmpada é muito intensa, e mesmo uma exposição breve causa danos aos olhos e à pele, por isso são necessários cuidados rigorosos para sua utilização. Esses cuidados são detalhados mais à frente.

A célula fotoelétrica foi constituída pela sobreposição de três camadas quadradas de materiais diferentes, com cerca de 20 cm de lado. Foram utilizadas uma chapa de alumínio polido com palha de aço (no instante do uso) e uma tela plástica isolante, sobre a qual foi colocada uma tela metálica de aço inoxidável. Esse material foi obtido em ferragens, e é comum no comércio. A tela plástica serve para isolar eletricamente a chapa de alumínio da tela de aço inox. A célula desenvolvida está representada esquematicamente nas Figs. 1 e 2.

Outros metais comuns, como cobre, zinco, ferro e latão, foram utilizados nos testes, mas não resultaram aproveitáveis porque as correntes obtidas foram muito menores do que as do alumínio, algumas vezes até indetectáveis pelo nosso sistema.

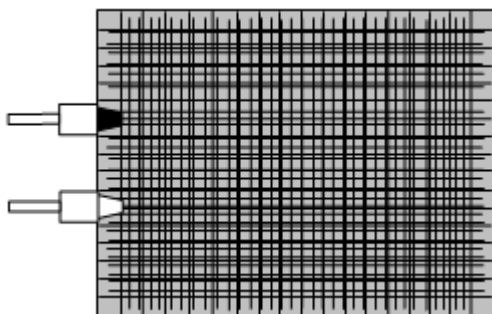


Figura 1 - Célula fotoelétrica pronta, com as telas plástica e de inox sobrepostas à placa de alumínio polido. Na lateral é possível ver a representação de garras jacaré, uma presa à placa de alumínio, e outra presa à tela de aço.

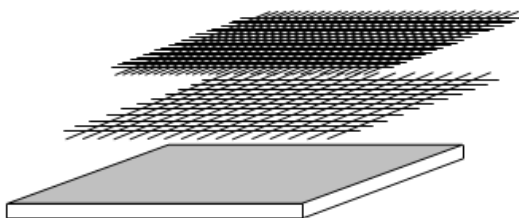


Figura 2 - Vista explodida da célula fotoelétrica. Acima, a tela de aço inoxidável, no meio a tela plástica isolante, e embaixo a chapa de alumínio polido.

Em princípio, a célula poderia ser diretamente conectada em série com uma bateria de 9 V e um multímetro na escala de medição de corrente elétrica, porém a sensibilidade do amperímetro teria que ser bem maior que a encontrada nos multímetros comerciais, o que encareceria o experimento. Por isso, a corrente fotoelétrica foi utilizada para excitar um amplificador simples, constituído por três transistores BC549 ligados em cascata, como descrito em [6]. A variável de saída é a resistência elétrica medida pelo multímetro conectado entre coletor e emissor do último transistor do amplificador.

Essa montagem garante ganhos de  $10^6$  ou  $10^7$ , e amplifica sinais tão fracos que pode sofrer influência de cargas eletrostáticas próximas, polarizando a base do primeiro transistor e fazendo o multímetro indicar um valor de resistência menor que o esperado. O experimentador deve tomar cuidados para minimizar os efeitos dessas fontes de interferência, por exemplo, ligando o pólo negativo da bateria de 9 V à rede de aterramento do laboratório, ou no metal de um cano d'água aparente, ou numa janela metálica próxima. O circuito eletrônico do sistema pode ser visto na Fig. 3.

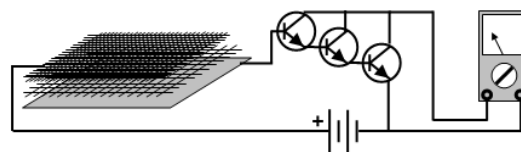


Figura 3 - Esquema de ligações entre a célula fotoelétrica, os transistores, a bateria e o multímetro.

No escuro, o circuito acima deve produzir indicação de resistência infinita. Excesso de umidade do ar pode prejudicar o desempenho do sistema, chapas de alumínio polidas algumas horas antes oxidam e simplesmente não funcionam. Além disso, deve-se tomar cuidado para não haver contato elétrico entre a tela de aço e a chapa de alumínio, o que inclusive pode danificar os transistores.

Nesta montagem o multímetro é a fonte de polarização dos terminais coletor e emissor dos transistores, por isso a polaridade dos fios é crítica. Num multímetro analógico a ponteira preta deve ser ligada ao coletor dos transistores, e a ponteira vermelha deve ser ligada ao emissor do último transistor. Se um multímetro digital for usado, talvez sua polaridade seja invertida, mas um simples teste indicará isso. O transistor BC549 é representado e se parece, respectivamente, com os desenhos da Fig. 4.

O amplificador em cascata, de três transistores, pode ser visto na Fig. 5. Se o professor preferir, pode soldá-los diretamente, um no outro, sem necessidade da placa de circuito impresso.

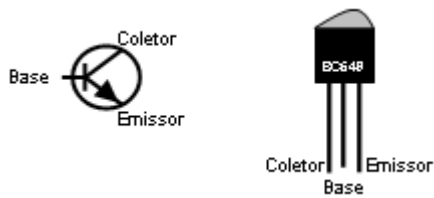


Figura 4 - Representação e disposição real dos terminais do transistor BC549.

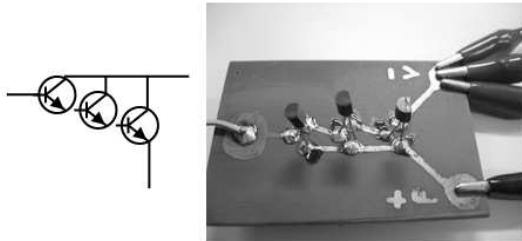


Figura 5 - Diagrama e fotografia do amplificador em cascata que utilizamos. Os três transistores foram soldados sobre uma pequena placa de circuito impresso.

#### 4. Excitação da célula fotoelétrica e os perigos da radiação ultravioleta

A célula fotoelétrica desenvolvida foi exposta à radiação emitida por uma lâmpada de mercúrio de 400 W (com reator), sem o bulbo de vidro leitoso. A célula foi colocada sobre uma cartolina preta (para reduzir a reflexão da luz) a cerca de 30 cm da fonte de luz. Uma fotografia da lâmpada aberta está na Fig. 6.

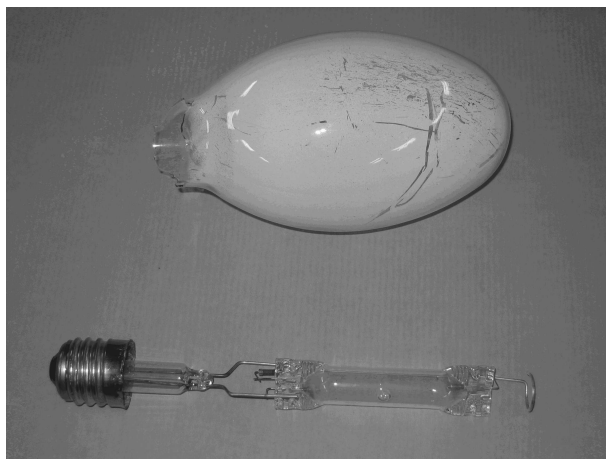


Figura 6 - O bulbo leitoso externo da lâmpada de mercúrio (acima) precisa ser quebrado para expor o tubo de quartzo interno, emissor de radiação ultravioleta, (abaixo).

Atenção: A lâmpada deve ficar oculta durante a experimentação, de modo a evitar que sua luz chegue aos olhos e à pele, mesmo por reflexão na mesa, pois um descuido nesse item pode resultar em danos graves e irreversíveis aos olhos, e queimaduras graves na pele, que só são percebidas horas depois da exposição.

A radiação ultravioleta emitida por essa lâmpada é semelhante a dos arcos-voltaicos de solda elétrica, e exige que o operador use Equipamentos de Proteção Individual (EPI). Informações detalhadas sobre os perigos da radiação ultravioleta para a saúde humana podem ser obtidos em Okuno e Vilela [7]. Se o professor não puder tomar todas as precauções contra a exposição à radiação ultravioleta não deve realizar este experimento. Os seguintes cuidados especiais devem ser tomados:

- os experimentadores devem usar óculos especiais de proteção contra radiação ultravioleta. Esses óculos são EPIs usados por soldadores, e podem ser obtidos em lojas de ferragens ou equipamentos industriais. Uma fotografia de um desses óculos pode ser vista na Fig. 7;
- a lâmpada deve ficar coberta, de modo que a radiação emitida atinja somente a célula fotoelétrica e não a pele ou os olhos dos experimentadores, mesmo por reflexão. Todo o sistema deve ser colocado dentro de uma caixa de papelão, com uma pequena abertura lateral destinada à manipulação da célula;
- é necessário o uso de luvas opacas nas mãos de quem vai manipular a célula nas proximidades da lâmpada ligada;
- uma folha de cartolina preta fosca deve ser colocada abaixo da célula, sobre a mesa que sustenta o experimento, de modo a minimizar a reflexão da luz que excede as margens da célula, para que não seja refletida pela mesa e atinja as pessoas próximas através da abertura de manipulação [8].



Figura 7 - Óculos de proteção contra radiação ultravioleta.

#### 5. Caracterização da célula fotoelétrica experimental

Embora o objetivo do experimento proposto neste artigo tenha sido simplesmente permitir a verificação da ocorrência do efeito fotoelétrico em metais comuns, aproximando a Física Moderna do cotidiano, pode ser conveniente conhecer parâmetros um pouco mais precisos sobre o comportamento da célula desenvolvida. Como provavelmente uma investigação sobre a resposta espectral da célula envolveria equipamentos e complexidade excessivas para o nível médio de ensino, cons-



truímos um experimento que permite medir a corrente fotoelétrica para diferentes distâncias da fonte de radiação ultravioleta. Uma perspectiva da montagem realizada pode ser vista na Fig. 8.



Figura 8 - Foto do experimento de caracterização da célula. Em primeiro plano aparecem o carrinho, o reator e a proteção que envolve a lâmpada. Logo atrás podem ser vistas a ponta da régua de madeira utilizada para marcar as distâncias, a célula posicionada defronte à lâmpada, e um dos multímetros utilizados. O amplificador está atrás do suporte da célula, e quase não é visível nesta fotografia.

Neste experimento a fonte de radiação ultravioleta foi sendo afastada da célula desde 0,1 m até 3 m simultaneamente à medição da resistência elétrica entre coletor e emissor do transistor de saída do amplificador, usando um multímetro digital ICEL MD6130 ligado na escala de 2000 MΩ. A corrente produzida por este multímetro, na escala de resistência utilizada, mantém relação com o valor indicado no mostrador, conforme resultados de calibração obtidos no LABELO - Laboratório de Metrologia da PUCRS, a partir dos valores de resistência que encontramos no experimento. A Tabela 1 é uma cópia do documento emitido pelo LABELO, e contém também o gráfico original do laboratório.

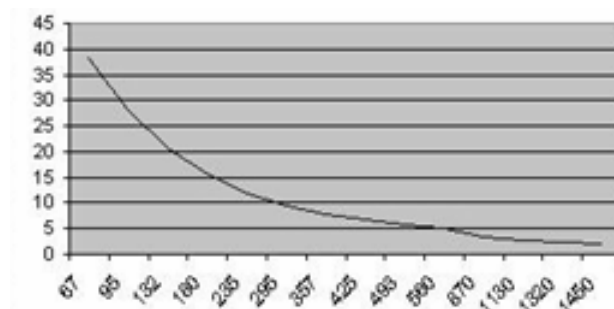
Dessa forma foi possível determinar a corrente de coletor-emissor para cada uma das distâncias escolhidas. Como o ganho do amplificador também é conhecido, sendo calculado como o produto dos ganhos dos transistores individuais ( $257 \times 189 \times 320 = 15,5 \times 10^6$ ), foi encontrado um valor aproximado para a corrente da célula em cada afastamento. A Tabela 2 mostra os valores medidos e calculados, e também o gráfico correspondente à corrente fotoelétrica em função da distância.

Na Tabela 2, a coluna 1 mostra as distâncias célula-lâmpada que foram escolhidas para a realização do experimento. A coluna 2 mostra valores da resistência elétrica medida entre o coletor e o emissor do transistor de saída do amplificador, ou seja, os valores indicados pelo multímetro. Esses valores foram posteriormente informados ao LABELO/PUCRS, quando da solicitação da calibração do multímetro ICEL MD 6130, de modo que fosse determinada a corrente produzida pelo multímetro ao indicar cada uma das re-

sistências encontradas durante o experimento. A coluna 3 mostra os valores de corrente informados pelo LABELO/PUCRS (como mostrado na Tabela 1). A coluna 4 mostra o ganho total do amplificador, calculado pelo produto dos ganhos individuais dos transistores utilizados, e a coluna 5 é a corrente fotoelétrica, obtida pela divisão dos valores da coluna 3 pelos da coluna 4. Estes dados e a curva encontrada logo abaixo da Tabela 2 mostram que a corrente fotoelétrica decai segundo uma função inversa do quadrado da distância entre a fonte e a célula, como seria de se esperar.

Tabela 1 - Dados de calibração do multímetro ICEL MD6130, obtidos no Laboratório de Eletricidade do LABELO/PUCRS, com o padrão HP3458A. Faixa de medida do Multímetro MD-6130: 2000 MΩ.

Res. aplicada (MΩ)	Cor. medida (nA)	Tensão calc. (V)
67	38,2	2,6
95	28	2,7
132	20,6	2,7
180	15,4	2,8
235	11,9	2,8
295	9,6	2,8
357	7,9	2,8
425	6,7	2,8
493	5,85	2,9
560	5,2	2,9
870	3,3	2,9
1130	2,55	2,9
1320	2,25	3,0
1459	2	2,9



## 6. Experimento sugerido

Em aplicações didáticas em turmas de Ensino Médio seria problemática a realização de um experimento semelhante ao utilizado para caracterização da célula, em função da dificuldade de isolar os alunos da radiação ultravioleta. Assim, sugerimos que o professor realize um experimento mais simples, como apresentado na Fig. 9.

Nessa montagem, a lâmpada foi posicionada acima da célula, presa a um suporte de madeira. Uma caixa de papelão cobriu a lâmpada durante o experimento, e uma folha de cartolina preta foi colocada sob a célula, para evitar reflexões. Na Fig. 9 a caixa e a cartolina foram retiradas para que ficassem visíveis os detalhes das ligações. Pode-se ver nesta figura a estrutura de madeira que sustentou a lâmpada, o reator da lâmpada,

um multímetro, o amplificador, a bateria e a célula fotoelétrica, tudo interligado por cabos com garras jacaré.

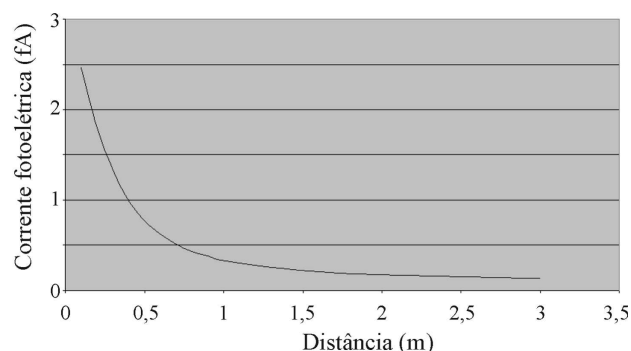
Nesse experimento não há possibilidade de variação da distância lâmpada-célula, mas a montagem serve perfeitamente para demonstrar o efeito fotoelétrico, e o professor pode fazer pelo menos uma medição, descobrindo a corrente produzida pela sua célula.

Determinando os ganhos individuais dos transistores antecipadamente, o ganho total do amplificador pode ser facilmente calculado simplesmente pela multiplicação dos ganhos parciais. O uso do multímetro na escala de medição de resistência evita que o professor precise de outra bateria, bastando que ele possa estimar a corrente gerada pelo multímetro, quando da medição. Multímetros analógicos geralmente trazem essa informação gravada no mostrador, ao redor da chave rotativa. Dividindo essa corrente pelo ganho global do amplificador encontra-se uma boa estimativa da corrente na célula.

Tabela 2 - Valores de resistência medidos para cada afastamento, e os valores calculados de corrente de coletor-emissor (do amplificador) e de base (da célula fotoelétrica).

1	2	3	4	5
0,1	67	38,2	$15,5 \times 10^6$	2,46
0,2	95	28	$15,5 \times 10^6$	1,81
0,3	132	20,6	$15,5 \times 10^6$	1,33
0,4	180	15,4	$15,5 \times 10^6$	0,99
0,5	235	11,9	$15,5 \times 10^6$	0,77
0,6	295	9,6	$15,5 \times 10^6$	0,62
0,7	357	7,9	$15,5 \times 10^6$	0,51
0,8	425	6,7	$15,5 \times 10^6$	0,43
0,9	493	5,85	$15,5 \times 10^6$	0,38
1	560	5,2	$15,5 \times 10^6$	0,33
1,5	870	3,3	$15,5 \times 10^6$	0,22
2	1130	2,55	$15,5 \times 10^6$	0,17
2,5	1320	2,25	$15,5 \times 10^6$	0,15
3	1450	2	$15,5 \times 10^6$	0,13

1: Distância de medição (m). 2: Resistência indicada no multímetro ICEL MD6130 (M $\Omega$ ). 3: Corrente de coletor do amplificador ou do multímetro ICEL MD6130 medida pelo LABELO/PUCRS (nA). 4: Ganho do amplificador. 5: Corrente de base calculada ou corrente fotoelétrica gerada na célula (fA).



Se o professor utilizar a mesma lâmpada de mercúrio de 400 W apresentada neste artigo, a corrente esperada é da ordem de  $10^{-12}$  A/m<sup>2</sup> para células de alumínio polido e tela de aço inoxidável, separados por 1 mm de

tela plástica, posicionada 20 cm da lâmpada. Trata-se de uma corrente muito baixa, comparativamente aos padrões de consumo dos aparelhos eletrônicos comuns, mas envolve a movimentação de um grande número de elétrons, da placa de alumínio para a tela de aço. Essa informação pode ser preciosa para que os alunos compreendam a magnitude do fenômeno que estão estudando. No caso de nossa célula, com área da ordem de um centésimo de metro quadrado, obtivemos um valor máximo de corrente próxima a 3 fA ( $3 \times 10^{-15}$  A), como mostra a coluna 5 da Tabela 2. Essa corrente, embora muito pequena, representa uma movimentação expressiva de elétrons:

$N = 3 \text{ fA} \times (1 / (1,6 \times 10^{-19} \text{ C/elétron})) \approx 18 \text{ mil elétrons por segundo.}$

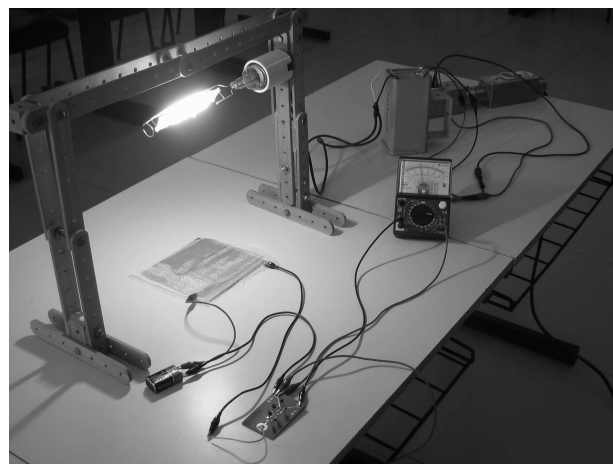


Figura 9 - Sistema experimental, sem a caixa de papelão e sem a cartolina preta, para permitir a visualização das partes.

Estes são fotoelétrons, ou seja, são elétrons que foram retirados da superfície da placa de alumínio por ação dos fótons da radiação ultravioleta, sendo depois capturados pela tela metálica positivamente polarizada. Evidentemente nem todos os fotoelétrons se dirigem à tela. Alguns são recapturados pela placa de alumínio por terem baixa energia excedente, outros se perdem na tela plástica ou até mesmo no ar. O número de fotoelétrons capturados, então, pode ser levemente aumentado pelo acréscimo do potencial de aceleração, ou seja, pelo aumento da diferença de potencial entre o alumínio e a tela de aço inox, ou pela aproximação das mesmas, por meio do uso de telas plásticas mais finas.

Isso é interessante como argumentação didática porque a taxa de geração de fotoelétrons não depende deste potencial, mas sim da intensidade da radiação ultravioleta incidente, supostamente constante. Porém, um potencial de aceleração maior garante que menos elétrons *se percam pelo caminho*, sendo atraídos até a tela positiva, aumentando a corrente medida. Assim, se o professor desejar, pode associar duas ou mais baterias de 9 V em série, e com isso obter correntes um pouco maiores.

Uma fotografia do sistema completo, protegido pela

caixa de papelão e cartolina preta, pode ser vista na Fig. 10.

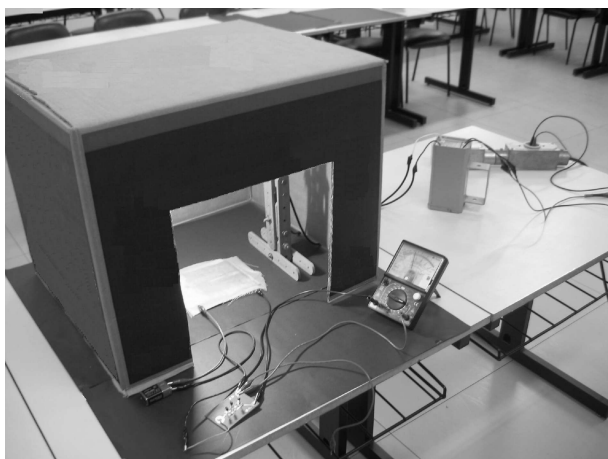


Figura 10 - Montagem final do sistema, onde se pode ver a caixa de papelão e a cartolina preta usadas para restringir a área afetada pelos raios UV, a célula fotoelétrica, o amplificador, a bateria, o multímetro e o reator da lâmpada.

## 7. Conclusões

Respeitadas as recomendações de segurança, a célula fotoelétrica e o sistema de medição apresentados neste artigo são próprios para uso em ensino de Física. Quando o método é comparado à tradicional placa metálica eletrizada ligada a um eletroscópio de folhas, nota-se que ele é mais centrado na corrente fotoelétrica, o que pode facilitar a compreensão por parte dos estudantes. Evidentemente, há um custo a pagar por isso, e a complexidade de uma proposta como a nossa é um pouco maior. Na prática, os estudantes tendem a sentir-se mais motivados à aprendizagem ao se envolverem em atividades experimentais, sejam elas quais forem, de modo que cabe ao professor decidir como utilizar a experimentação em seu trabalho. Sob certo aspecto a utilização de materiais eletro-eletrônicos, como a lâmpada de mercúrio, os transistores e o multímetro, pode contribuir para essa motivação, pois são materiais do cotidiano da sociedade.

O custo do material empregado nessa experimentação é muito baixo, e pode ser anulado se os materiais puderem ser obtidos no âmbito de redes de ensino. Tanto a lâmpada quanto o reator são usados na iluminação pública, existindo no almoxarifado

da escola ou da prefeitura local, e mediante uma simples requisição o professor pode obtê-los. Os transistores custam alguns centavos, mas qualquer técnico em eletrônica pode retirá-los de aparelhos eletrônicos em desuso, sem custos. A placa de alumínio pode ser obtida em depósitos de ferro-velho, e as telas metálica e plástica podem existir na casa do professor ou de algum aluno, pois são usadas em mosquiteiros e peneiras. O multímetro é o mesmo usado por técnicos de telefonia e eletrônica, e talvez o professor ou a escola já o possua, pois é aplicado também para o ensino de eletricidade. Além disso, pode ser obtido por menos de vinte reais, em certas lojas das capitais.

A motivação do professor em proporcionar momentos de experimentação em sua prática é o elemento fundamental nesse processo, oferecendo aos seus alunos oportunidades de aprendizagem, e, principalmente, rompendo com as aulas tradicionais. Muitas vezes a ruptura com a inércia da aula copiada é o maior desafio, mas se o professor jovem experimentar constantemente e o professor experiente mantiver o idealismo dos primeiros anos de profissão, poderemos continuar educando e mudando para melhor as vidas de nossos alunos.

## Referências

- [1] E.C. Valadares e A.M. Moreira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 359 (2004).
- [2] E.C. Valadares, A. Chaves e E.G. Alves, *Aplicações da Física Quântica: do Transistor à Nanotecnologia* (SBF/Livraria da Física, São Paulo, 2005).
- [3] R. Cruz, S. Leite e C. Carvalho, *Experimentos de Física em Microescala* (Scipione, São Paulo, 1997).
- [4] C.R.C. Tavoraro e M.A. Cavalcante, *Física Moderna Experimental* (Manole, Barueri, 2003).
- [5] V.K. Zworykin e E.G. Ramberg, *Photoelectricity and its Application* (Chapman & Hall, London, 1949).
- [6] J.B. Rocha Filho e M.A. Salami, in C. Galli, (org) *Sobre Volta, Batatas e Fótons* (EDIPUCRS, Porto Alegre, 2003), p. 67-94.
- [7] E. Okuno e M.A.C. Vilela, *Radiação Ultravioleta: Características e Efeitos* (SBF/Livraria da Física, São Paulo, 2005).
- [8] J.B. Rocha Filho e M.A. Salami, *Divulgações do Museu de Ciências e Tecnologia* **10**, 35 (2005).