

## Apêndice A

### Produto Experimental: Construção dos módulos A e B.

Com estas instruções você será capaz de construir dois módulos de um circuito elétrico para o estudo de Física Quântica, mais especificamente o do efeito fotoelétrico, visando ainda uma melhor compreensão de conceitos de eletricidade, como o manuseio de medidores elétricos, aplicação das leis de ohm e geradores elétricos.

Para a construção dos módulos a seguir foram utilizados os seguintes materiais básicos e necessários que auxiliarão na montagem.

#### Materiais Básicos

- Ferro de solda (25W a 40W) e suporte de solda.
- Solda elétrica (estanho).
- Alicates de bico.
- Alicates de corte
- Estilete (para descascar os fios).
- Chave de fenda.
- Furadeira e brocas de madeira.
- Cola quente.

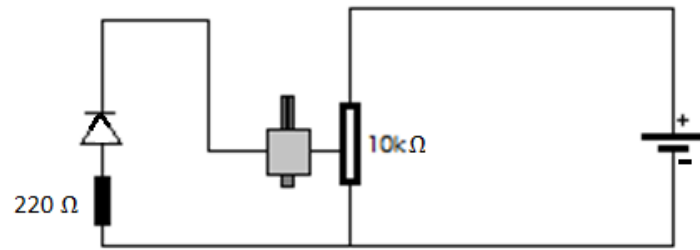
OBS: Caso você encontre dificuldade em manusear o ferro de solda, existem sites que poderão auxiliá-lo, assim como vídeos auto instrutivos indicados a seguir<sup>26</sup>. Antes de começar treine um pouco com pedaços de fio “cru”, soldando fios com alguns resistores ou dois pedaços de fio. Vale lembrar a importância e os cuidados em trabalhar com equipamentos que usam temperatura altíssima e, portanto, deixá-los sempre fora do alcance de crianças e animais domésticos.

---

<sup>26</sup> Vídeo 1: <http://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/como-soldar-videos/> (acesso em 20/03/2016)

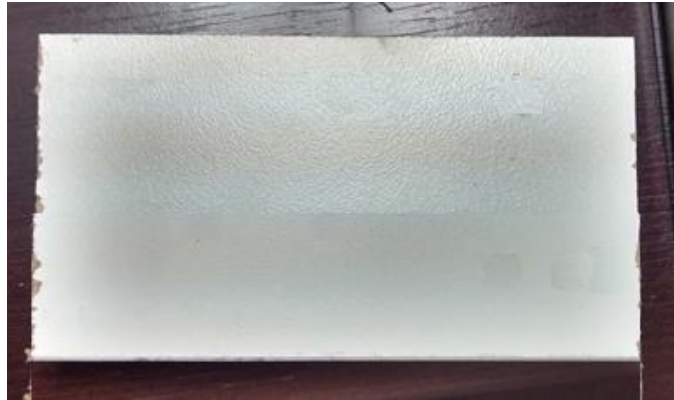
Vídeo 2: <http://www.tecmundo.com.br/area-42/25840-area-42-como-soldar-componentes-eletronicos.htm> (acesso em 20/03 2016)

## MÓDULO A



Materiais utilizados:

1. Base de madeira 10cm x 5cm (o uso de madeira branca servirá para melhor visualização do circuito).



2. Fios de ligação de 1 mm – 15 cm de fio vermelho e 30cm de fio preto.



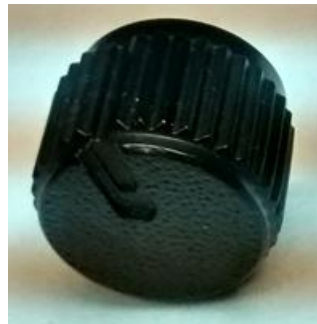
3. 1 resistor de 220  $\Omega$ .



4. 1 potenciômetro de 10 k $\Omega$ .



5. 1 Knob (usado para ajuste de tensão no potenciômetro).



6. Conector molex "fêmea" (usado para suporte do LED)



## 7. Bateria de 9V.



## 8. Chicote para bateria de 9V.



### “Mãos à obra”

#### 1. Montagem da base do circuito

Para montar este circuito na base de madeira será necessário prender inicialmente o potenciômetro. Para isso, com a furadeira e uma broca de madeira faça uma cavilha a aproximadamente 3,0 cm de distância da extremidade da base com um diâmetro tal que possa encaixar o potenciômetro (fig. 1a). Em seguida, com cola quente, prenda o potenciômetro nela (fig. 1b). Com o potenciômetro preso será mais fácil o processo de solda.

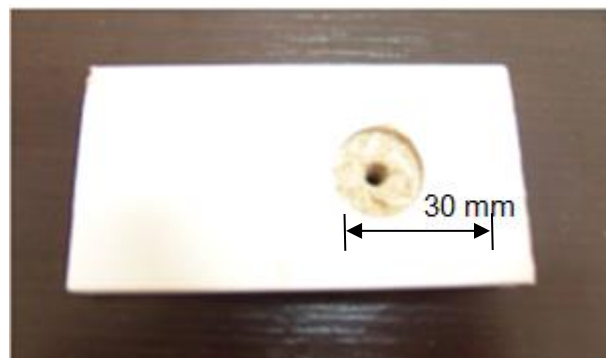


Fig. 1a: tábua de madeira com cavilha para o potenciômetro.



Fig.1b: Base de madeira e potenciômetro fixado.

Preso o potenciômetro, vamos agora fazer as soldas necessárias. Corte 5 cm de fio vermelho e separe. Pegue o resistor de 200  $\Omega$  e solde suas extremidades no contato central do potenciômetro e nos 5 cm do fio vermelho separado. Pegue agora o fio preto, descasque-o a 10 cm de uma das extremidades conforme imagem da figura 2a e dobre; na sequência solde-o no contato superior do potenciômetro (fig. 2b)



Fig 2a: fio preto descascado a ser soldado no potenciômetro



Fig 2b: fio preto e vermelho soldados no potenciômetro

Finalmente pegue o restante do fio vermelho (10 cm) e solde-o no contato inferior do potenciômetro (fig. 3)

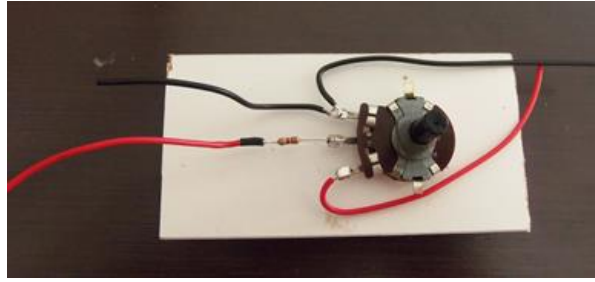


Fig.3: base de madeira com as soldas preliminares no potenciômetro

## 2. Montagem do Conector molex “fêmea”

Atenção: Essa sequência de montagem servirá para os dois módulos do experimento pois servirão como suporte para os LEDs.

Descasque aproximadamente 5 mm do fio vermelho e do fio preto que saem dos contatos superior e central do potenciômetro. Siga corretamente os passos a seguir pois eles serão os contatos com os LEDs.

Coloque o fio preto descascado na “garra” do conector molex e com uma alicate de bico aperte-o até prendê-lo (fig. 3a e 3b).



Fig. 3a: Fio preto sobre a “garra” do molex



Fig. 3b: fio preto preso na “garra”

Com o ferro de solda quente, coloque-o sobre o conjunto e após alguns segundos encoste a solda para que ela penetre bem nos dois elementos (fio e garra). Cuidado para não colocar solda em excesso, o que prejudicará a conexão com o molex (fig.4)



Fig. 4: Soldando o fio preto na “garra” do molex

Repita esse mesmo procedimento com o fio vermelho e separe-os (fig. 5).



Fig. 5: Fio vermelho e preto prontos para o encaixe no Molex

Pegue agora o Molex “fêmea” e encaixe-o neste conjunto conforme as imagens das figuras 6a e 6b.

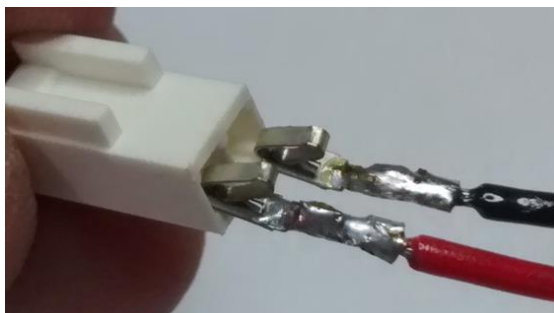


Fig. 6a

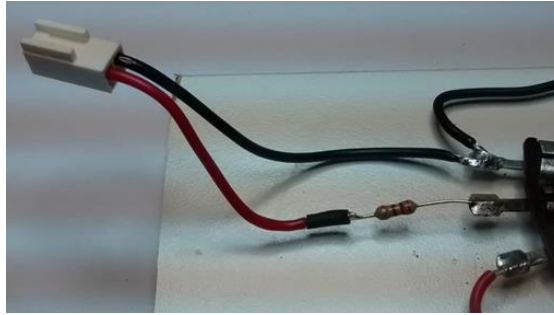


Fig. 6b

Para finalizar a montagem do módulo A, solde os fios vermelho (que sai do contato inferior do potenciômetro) e preto (do contato superior) no chicote da bateria. Prenda o Knob no potenciômetro. Para testar, encaixe um Led no Molex e, com o potenciômetro regule a intensidade de luz emitida (cuidado com a polaridade do LED). Pronto, você montou o **módulo A** do experimento (fig. 7a e 7b).



Fig. 7a: Módulo A conectado a bateria e pronto para receber o Led de Alto Brilho

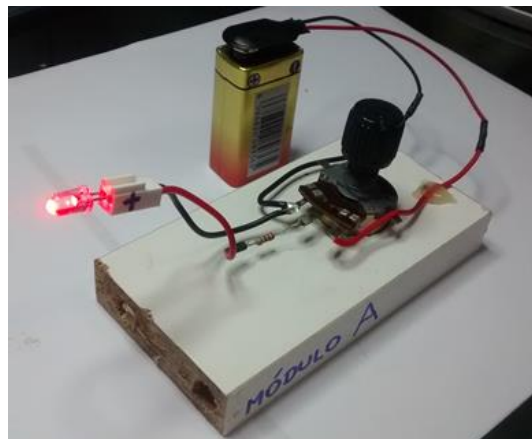
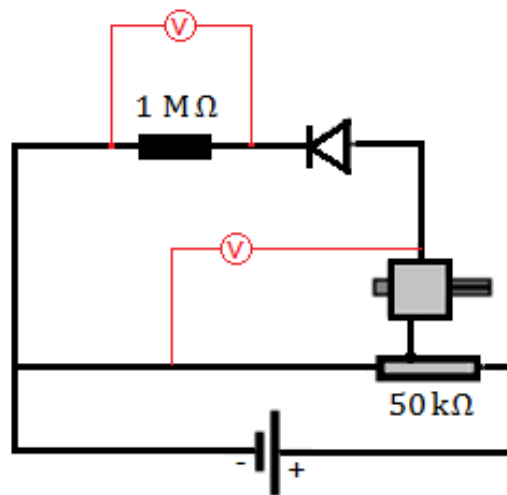


Fig. 7b: Módulo A com LED funcionando (fio vermelho = pólo positivo do LED)



## MÓDULO B



Circuito elétrico do módulo B

Materiais utilizados:

1. Base de madeira 12cm x 8cm



2. Fios de ligação de 1 mm – 40 cm de fio vermelho e 30 cm de fio preto.



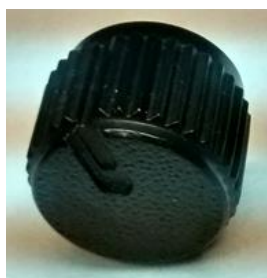
3. 1 resistor de  $1M\Omega$ .



4. 1 potenciômetro multivolta de 50k.



5. 1 Knob (usado para ajuste de tensão no potenciômetro).



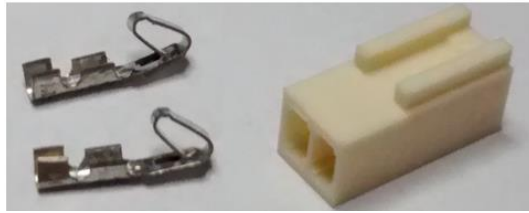
6. 2 conjuntos de borne para multímetro.



7. Braçadeira de plástico de 4 mm (“enforca gato”)



8. 1 Molex fêmea e dois encaixes.



9. Bateria de 9V.



10. Chicote de bateria de 9V.



11. Multímetro.



## “Mãos à obra”

### 1. Montagem da base do circuito

Nesta montagem faremos inicialmente as cavilhas na base de madeira e dois furos que sustentarão o potenciômetro multivolta. Com uma broca de 4 mm faça 4 cavilhas na base (elas servirão para o encaixe dos bornes do multímetro). Com uma broca de 2 mm faça dois furos que servirão para segurar o potenciômetro multivolta. Veja as posições indicadas na figura 8.

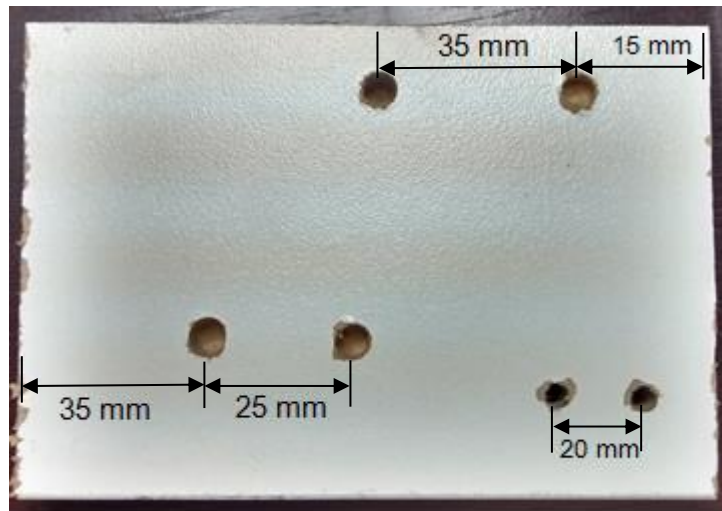


Fig. 8: Base de madeira do módulo B com medidas.

Pelos dois furos separados 20 mm transpasse a braçadeira de plástico (“enforca gato”) e prenda o potenciômetro (fig. 9a e 9b).



Fig. 9a: Braçadeira envolvendo os dois furos.



Fig. 9b: Montagem do potenciômetro multivolta.

Pegue os quatro bornes do multímetro e parafuse-os nas cavilhas respeitando a ordem das cores vermelha e preta de acordo com a figuras 10a e 10b.

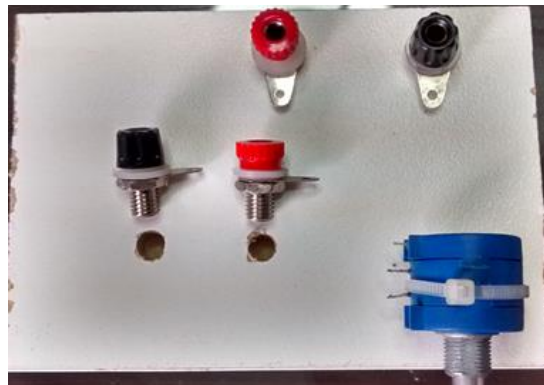


Fig. 10a

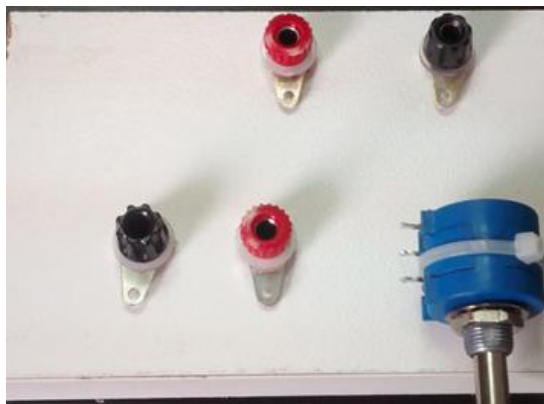


Fig. 10b: Montagem dos bornes para o multímetro

## 2. Montagem do circuito elétrico com solda

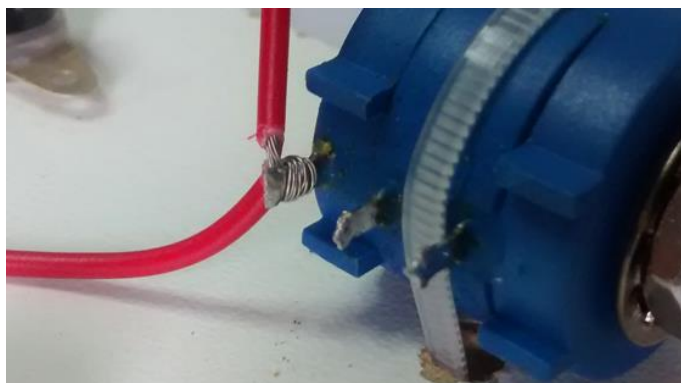
Montado a base do módulo B, vamos agora soldar os fios e preparar o circuito elétrico. Nesse momento é importante fazer uma boa solda para que não haja mau contato entre os elementos.

Pegue o fio vermelho e corte 12 cm. Com o estilete, descasque as pontas e a 2 cm de uma delas, desencape o fio como na figura 11.



Fig. 11: fio vermelho descascado.

Este fio será soldado no potenciômetro e no borne vermelho. Dobre o fio vermelho e encaixe-o como mostrado na sequência das imagens da figura 11, para depois, fazer a solda. Em seguida solde a outra extremidade do fio no borne vermelho inferior.



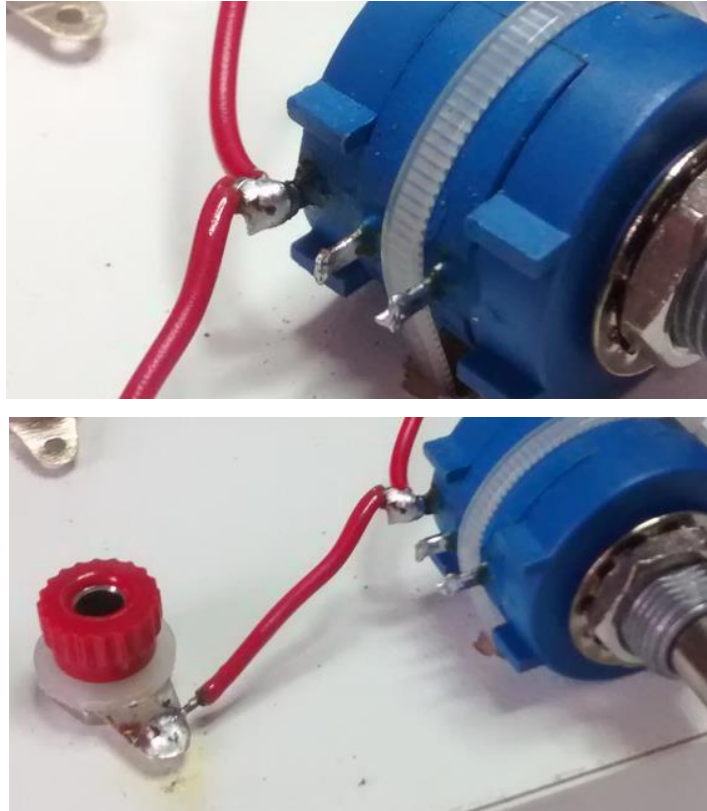


Fig. 11: Sequência de imagens da primeira solda no potenciômetro e no borne vermelho inferior.

Corte 20 cm do fio preto e faça o mesmo que foi feito com o fio vermelho, descascando aproximadamente a 6 cm de uma das extremidades (fig. 12)

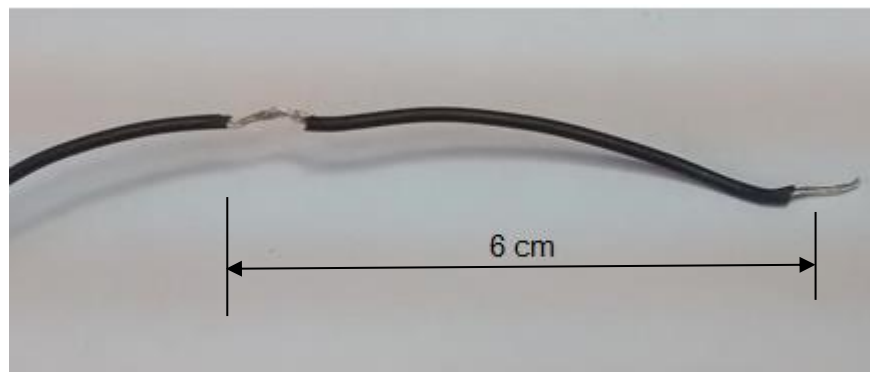


Fig.12: 20 cm de fio preto a ser soldado

Pegue o restante do fio vermelho e solde os dois fios (vermelho e preto) no potenciômetro (Fig. 13a e 13b)





Fig. 13a: Soldas no potenciômetro



Fig. 13b: Soldas nos bornes inferiores.

Estamos terminando. Pegue o resistor de  $1M\Omega$  e dois pedaços de fio preto restante cortados ao meio e faça a solda como mostra a figura 14.



Fig. 14: solda do resistor de  $1M\Omega$  e fios nos bornes superiores.

Faça a junção dos fios pretos e solde-os e em seguida. Com cola quente prenda os fios vermelho e preto como indicado nas figuras 15a e 15b.



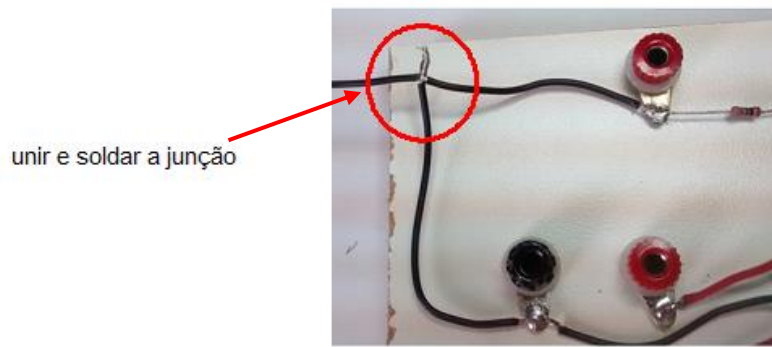


Fig. 15a: união dos fios pretos de saída para a fonte.

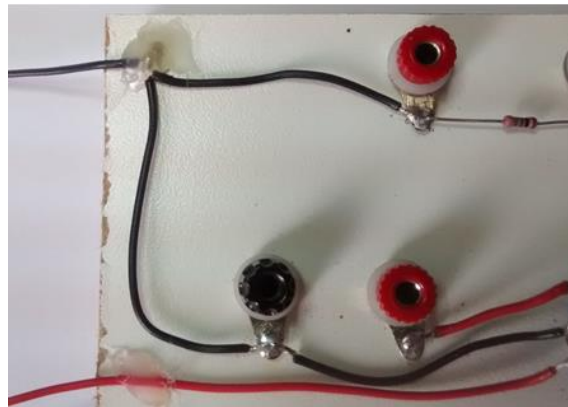


Fig. 15b: fixação com cola quente dos fios de saída da fonte.

Finalizando, repita o procedimento da montagem do molex que está indicado no item 2 do *módulo A*. Solde o chicote nos fios de saída da fonte e encaixe o Knob no eixo do potenciômetro (fig. 16a e 16b)

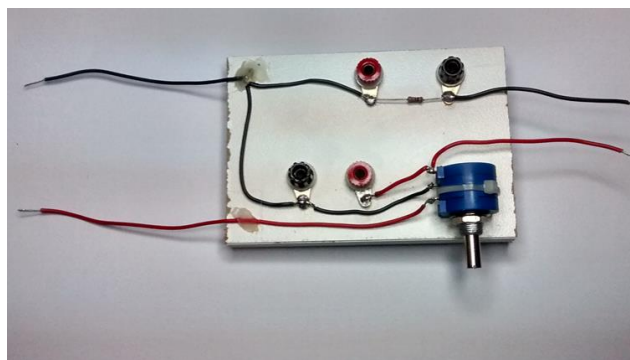


Fig. 16a: módulo B sem os periféricos (Molex e Chicote)

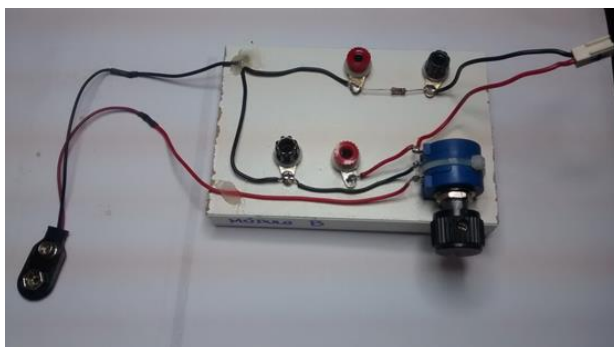


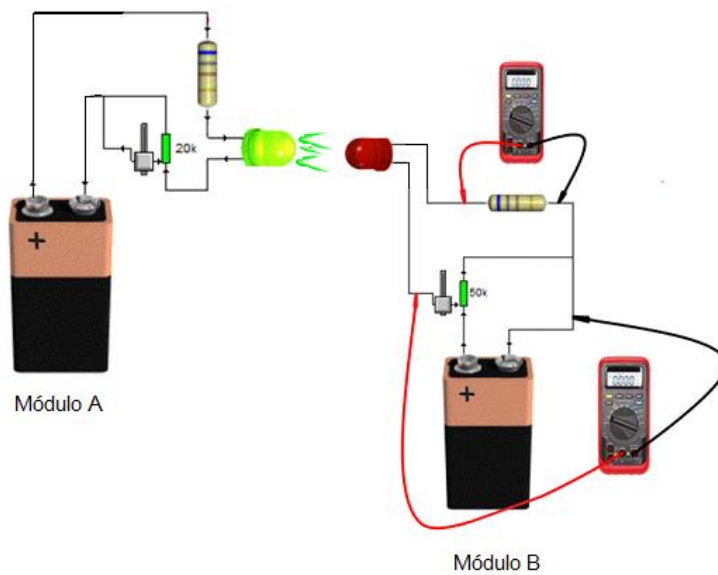
Fig. 16b: Módulo B pronto.

### ***Tabela de preço dos materiais utilizados***

Todos os materiais foram comprados em lojas de eletroeletrônicos no ano de 2015, mas podem ser adquiridos também via internet.

Quantidade	Material	Preço em reais
1	Potenciômetro de 10 k	R\$ 10,00
1	Potenciômetro multivolta	R\$ 40,00
1	Resistor de 220	R\$ 0,40
1	Resistor de 1 M	R\$ 0,40
60 cm de cada	Fios de contato (vermelho e preto)	doação
2	Multímetro	R\$ 46,00
4	Bornes do multímetro	R\$ 10,00
2	Molex "fêmea"	R\$ 4,50
2	Knob preto	R\$ 4,80
1	Braçadeira ("enforca gato")	doação
1	Led de alto brilho 5mm: infravermelho	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: vermelho	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: amarelo	R\$ 1,00
1	Led de alto brilho 5mm: verde	R\$ 1,00
2	Led de alto brilho 5mm: azul	R\$ 1,00
2	Madeira branca	doação
2	Baterias de 9V	R\$ 36,00
2	Chicotes de bateria de 9V	R\$ 5,00
	<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 162,10</b>

## Preparação para o experimento com os módulos A e B



Circuito elétrico do experimento com os módulos A e B

Para dar início ao experimento, alguns ajustes devem ser feitos para que a tomada de dados seja a melhor possível. Coloque, então os dois módulos (A e B) próximos um do outro e conecte os dois multímetros nos bornes correspondentes como na figura 17.

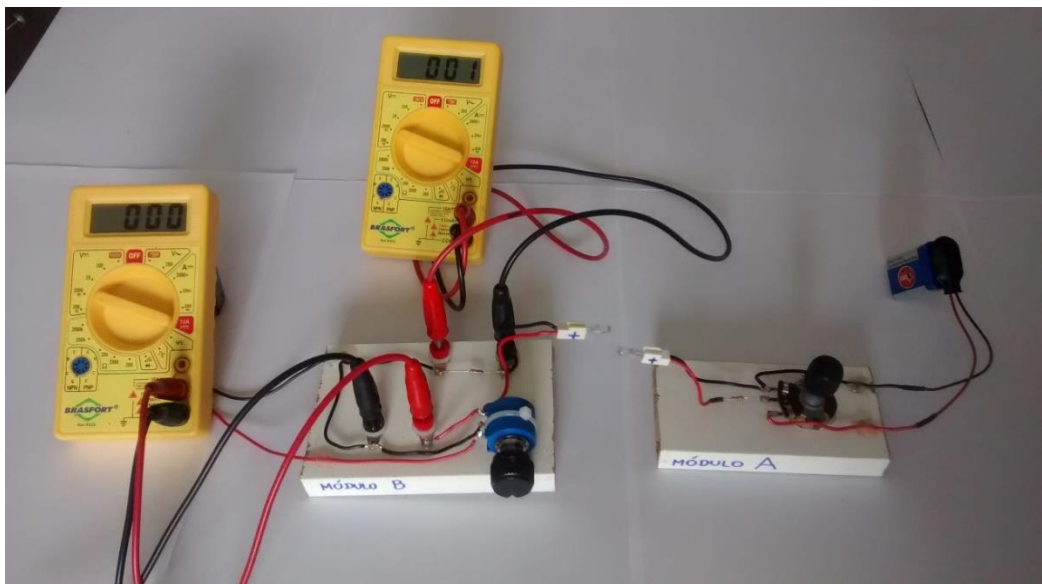


Fig. 17: Preparação da montagem do experimento

Com a finalização da montagem dos módulos A e B, a conexão entre os mesmos é de extrema importância para que haja a menor perda possível de luminosidade para o meio externo.

Para isso serve exatamente 1,5 cm de um pedaço de caneta "BIC" (fig. 18).



Fig. 18: tubinho de caneta "BIC"

Ele servirá como uma espécie de guia entre os dois Leds (um de cada módulo). Como esse pequeno tubo de caneta é transparente, é providencial cortar um pedaço de papel sulfite de 2cm x 1,5 cm e enrolá-lo a fim de se encaixar dentro do tubinho (sequência das fig. 19a , 19b e 19c)

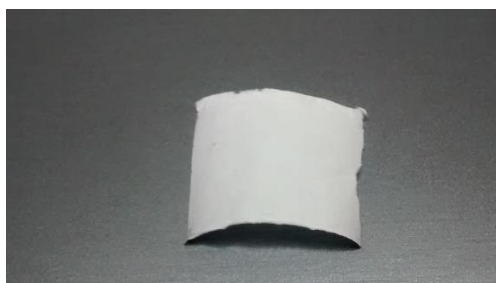


Fig. 19a



Fig. 19b



Fig. 19c

Para finalizar, aproxime os dois módulos e encaixe os LEDs, um em cada extremidade do tubinho e pronto, seu experimento pode começar (fig. 20 e 21).

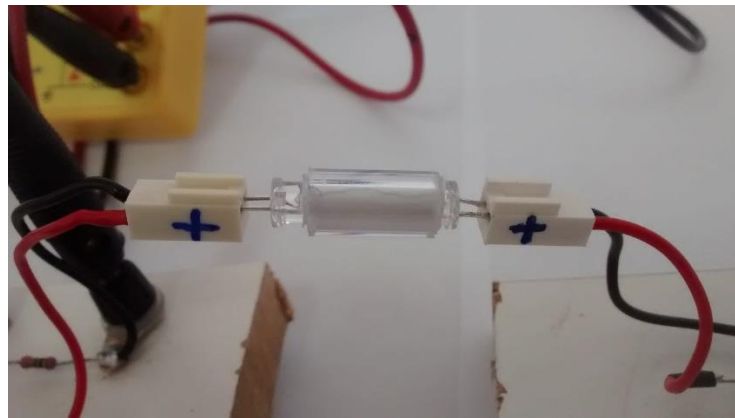


Fig. 20: Tubinho como guia para os Leds



Fig. 21: Experimento iniciado com as indicações do voltmíetros.

## Apêndice B

### Produto de Aplicação: Roteiros de aulas e experimentos.

Os roteiros a seguir apresentam uma breve teoria dos conceitos a serem abordados pelo professor na aplicação do curso proposto deste trabalho.

A Parte I trata de conteúdos relativos a interferência e difração de ondas e, como sugestão de experimento, propõe-se uma sequência experimental (Cavalcante, et al., 2007) para a determinação do comprimento de onda ( $\lambda$ ) dos LEDs, o que auxiliará no experimento proposto neste trabalho. Foram utilizados equipamentos da escola, como rede de difração, lentes convergentes e diafragmas. Caso a escola não possua, pode-se utilizar os dados de  $\lambda$  que se encontram na figura 5.14 (pág. 66) deste trabalho. A rede de difração utilizada neste trabalho também pode ser substituída por CDs.

Na parte II, o professor terá como breve referência os conceitos do fenômeno do efeito fotoelétrico e dos LEDs. E como atividade experimental, é fornecido um roteiro detalhado da aplicação dos aparatos experimentais (descritos no Apêndice A) sobre o efeito fotoelétrico.

### I. Determinação do comprimento de onda do LED

#### Difração e Interferência

A difração e interferência de ondas são fenômenos ondulatórios que servirão para compreender como determinaremos os comprimentos de onda de uma luz monocromática.

As ondas eletromagnéticas são transversais e podem propagar-se em qualquer meio, inclusive no vácuo. Existe um grande conjunto de radiações eletromagnéticas, produzidas de formas diferentes, natural ou artificialmente. Quando organizadas; por exemplo, em ordem crescente de comprimento de onda (ou ordem decrescente de frequência), temos **o espectro das radiações eletromagnéticas**.

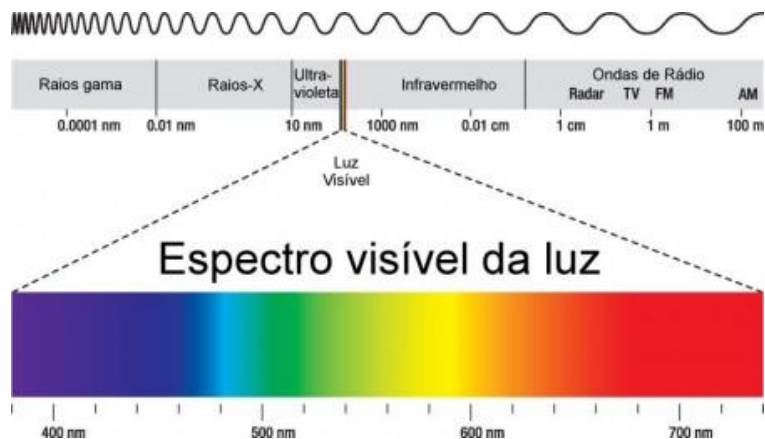
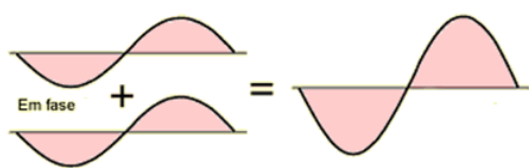


Figura 1: O espectro eletromagnético. Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/> (acesso em 20/11/2015)

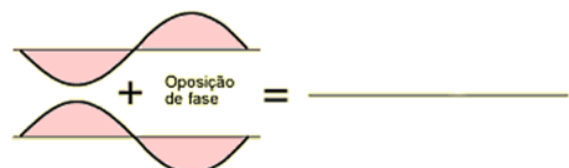
As radiações visíveis pelo ser humano do espectro eletromagnético são aquelas compreendidas entre a violeta e o vermelho, que em ordem de grandeza variam seu comprimento de onda, aproximadamente entre 380nm a 750nm (figura 1).

Dentre os fenômenos ondulatórios existe a **difração**, que consiste em uma onda contornar um objeto (obstáculo) ao incidir sobre o mesmo. Dependendo do comprimento da onda esta pode difratar mais ou menos quando incide no objeto. Se a ordem de grandeza de um objeto, por exemplo uma fenda, for próxima do comprimento de onda então ela se difrata mais.

Outro fenômeno importante que precisamos saber é a **interferência** de onda. Quando duas ondas se propagam em um meio, ao se interagirem, suas amplitudes resultantes se somam ocorrendo uma interferência por superposição de ondas. Se as amplitudes somadas tiverem mesma fase a interferência é dita construtiva, porém se as fases estiverem em oposição a interferência é dita destrutiva.



Interferência CONSTRUTIVA



Interferência DESTRUTIVA

Esses dois fenômenos servirão para entender como vamos determinar o comprimento de onda de um LED monocromático usando o experimento a seguir.

Com os materiais necessários, faremos a luz incidir numa fenda muito pequena, uma rede de difração, e esta ao difratar iluminará um anteparo em franjas claras (interferência construtivas) e escuras (interferência destrutivas).

Veja na figura 2:

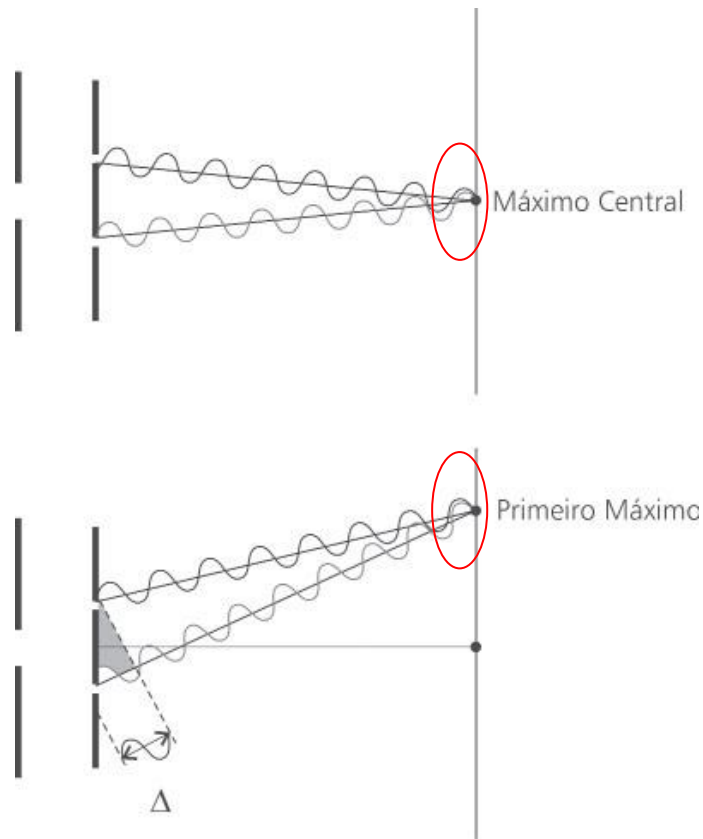


Figura 2

O chamado máximo central refere-se a região iluminada mais intensa, enquanto o primeiro máximo corresponde a próxima região iluminada. Entre essas duas regiões forma-se uma interferência destrutiva (ausência de luz). Para se determinar o comprimento de onda, vamos utilizar uma expressão que nos auxiliará na determinação do comprimento de onda. Essa expressão é conhecida como relação de Young.

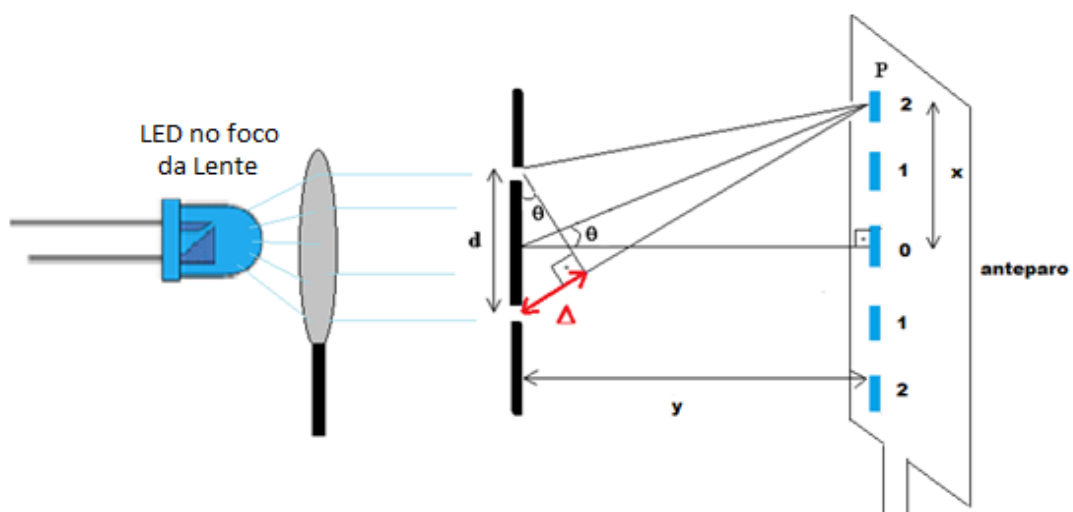


Figura 3



## Demonstração da relação de Young

Na figura 2, pode-se perceber que a medida de  $\Delta$  corresponde a um comprimento de onda  $\lambda$

$$\Delta = 1 \lambda$$

E, segundo a figura 3, o seno do ângulo  $\theta$  é dado por

$$\text{sen } \theta = \frac{\Delta}{d}$$

Teremos então que

$$\text{sen } \theta = \frac{1 \lambda}{d}$$

$$d \cdot \text{sen } \theta = 1 \lambda$$

Como o primeiro máximo é 1 então teremos para os próximos máximos  $m$  os valores 2, 3, 4, 5, 6 e assim por diante. Ficando a expressão de modo geral representada por:

$$m \cdot \lambda = d \cdot \text{sen} \theta$$

onde,

$m$  = ordem dos máximos de interferência

$\lambda$  = comprimento de onda

$d$  = distância de separação entre duas fendas da rede de difração.

$\text{sen} \theta$  = seno do ângulo de desvio obtido para o segundo máximo.

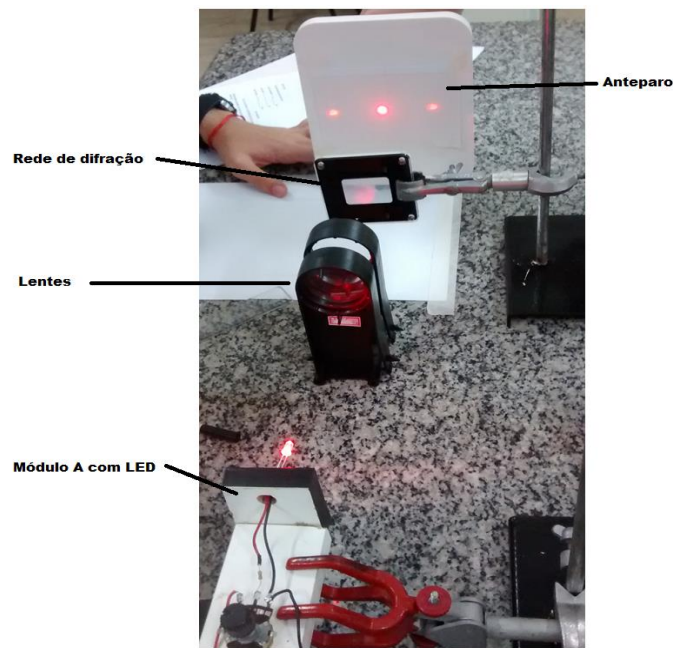
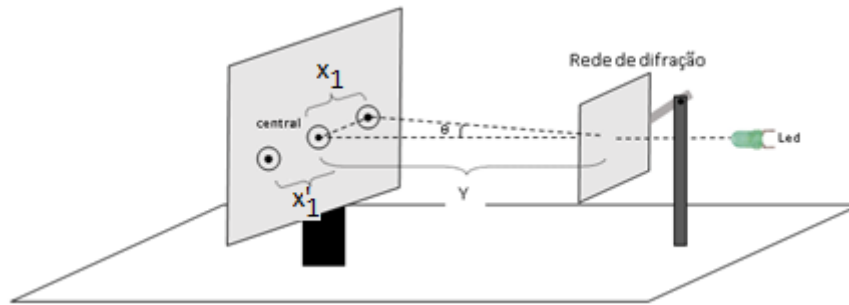
### Roteiro do Experimento 1 (determinação do comprimento de onda)

Vamos utilizar um arranjo experimental composto de:

- Fonte de luz com leds (módulo A);
- Rede de difração de 500 linhas por mm ou CD ( $\approx$  640 linhas por mm);
- Lentes convergentes;
- Anteparo (fita crepe + papel milimetrado);
- Régua.
- Suporte
- Diafragma

A partir desta montagem vamos determinar experimentalmente o comprimento de onda da luz do LED através do seu espectro e da utilizando a relação de Young. Esse valor será necessário para determinar a constante de Planck no experimento do Efeito fotoelétrico.

## Montagem:



## Procedimento.

1. Observando a imagem e figura acima meça com uma régua a distância  $Y$ , da rede de difração ao anteparo.

$Y =$  \_\_\_\_\_

2. Determine a distância  $d$  (a largura de uma linha) para a rede de difração dada.

$d =$  \_\_\_\_\_

3. Siga o que se pede:

- a. Coloque com a fita crepe o papel milimetrado no anteparo.
- b. Observe o espectro no anteparo.
- c. No papel milimetrado, marque as posições dos 2 primeiros máximos (a esquerda e a direita) onde o espectro está projetado e o máximo central. Guarde o papel milimetrado
- d. Meça, com a régua, as distâncias  $x_1$  e  $x'_1$  e em seguida calcule a média

$X_m$ .

$$X_1 =$$

$$X'_1 =$$

$$X_m =$$

e. calcule o valor de **sen $\theta$** .

f. Sendo  $m = 1$  (primeiro máximo), calcule o valor de  $\lambda$ , segundo a relação de Young, onde:

$$m \cdot \lambda = d \cdot \text{sen}\theta$$

Anote os valores dos comprimentos de onda a seguir:

Led vermelho  $\longrightarrow$  \_\_\_\_\_ nm.

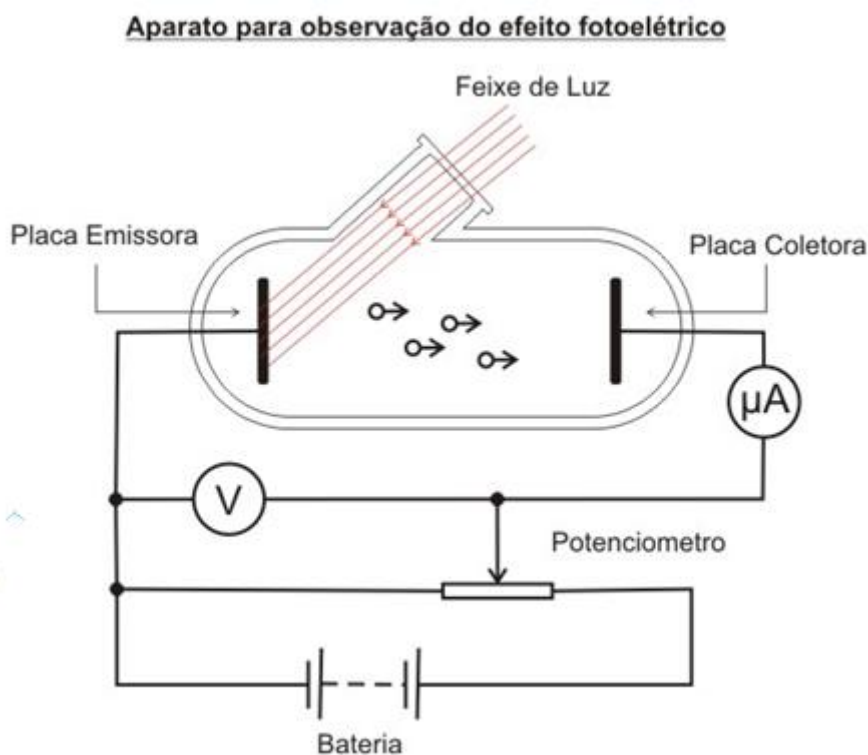
Led Laranja  $\longrightarrow$  \_\_\_\_\_ nm.

Led azul  $\longrightarrow$  \_\_\_\_\_ nm.

Led verde  $\longrightarrow$  \_\_\_\_\_ nm.

## II. O EFEITO FOTOELÉTRICO e A DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK

O efeito fotoelétrico consiste em iluminar uma determinada placa de metal e verificar que esta emite elétrons devido a incidência de uma determinada frequência de Luz. O experimento consiste em um aparato com duas placas (A e B) confinadas em uma ampola à vácuo, onde em uma abertura de vidro incide uma determinada intensidade de Luz na placa A. Elétrons se desprendem desta e incidem na placa oposta B. Nos extremos de cada placa, associa-se uma fonte de tensão variável  $V$  e mede-se a corrente elétrica entre as placas com um amperímetro associado em série na saída da placa B (Figura).

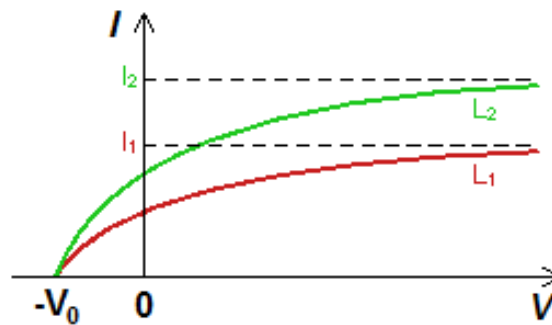


Nesse experimento verifica-se que:

1. nada se detecta no amperímetro na ausência de luz, e ao incidir a luz sobre a placa A (catodo) verifica-se o acréscimo da corrente elétrica (número de elétrons ejetados do catodo) conforme a intensidade de luz incidente aumenta.
2. Verifica-se que a corrente elétrica medida pelo amperímetro acusa valores instantaneamente, mesmo com baixa intensidade luminosa. Aqui percebe-se que a física clássica não tem condições de explicar tal fenômeno pois, com a diminuição da intensidade da luz (amplitude) diminui-se o campo elétrico e

consequentemente o ganho de energia para os elétrons serem ejetados também deveria.

3. Ao variar a tensão elétrica  $V$  positivamente a corrente elétrica aumenta até um certo valor e, a partir daí o gráfico da intensidade de corrente *versus* tensão aplicada permanecia constante (Gráfico 2).



Nesse mesmo caso, ao variar inversamente a tensão  $V$ , ou seja, para potenciais menores que zero, verifica-se que é possível frear os elétrons ejetados pelo catodo e tornar nula a corrente elétrica ( $i = 0$ ) até atingir um valor  $V_0$ , que se chama de tensão de frenagem ou tensão de corte.

4. Ainda em relação ao gráfico 2, nota-se que iluminando o catodo com uma intensidade maior ( $I_2$ ), e diminuindo a tensão com a finalidade de zerar a corrente, verifica-se que o potencial de corte é o mesmo. Fato este também inexplicável pela física clássica.
5. A corrente elétrica estabelecida no amperímetro só acusa valor diferente de zero para determinada frequência, dependendo do metal do catodo, ou seja, há uma frequência mínima responsável para “retirar” elétrons do catodo, chamada de frequência de corte ( $\nu_0$ ).

Por fim, os elétrons são ejetados com uma determinada velocidade, e portanto com uma energia cinética máxima ( $E_{c_{máx}}$ ) dada por:

$$E_{c_{máx}} = E - \phi$$

Onde  $E$  é a quantidade de energia da luz incidente ( $E_{fóton}$ ) e  $\phi$  é chamada de *função Trabalho*, correspondente a energia mínima para se retirar o elétron do metal. Portanto, se esta energia cinética máxima for zero, ou seja, o elétron ganha energia mínima para deixar o metal com velocidade nula, teremos:

$$E_{fóton} = E_{c_{máx}} + \phi$$

$$E_{fóton} = 0 + \phi$$

Utilizando-se da ideia de Planck, Einstein propôs a energia da luz do fóton quantizada, incidindo em pacotes, daí

$$E_{fóton} = h \cdot \nu$$

$$h \cdot \nu = 0 + \phi$$

$$h \cdot \nu_0 = \phi \quad [1]$$

Ou seja, a função trabalho é dependência apenas da frequência da luz que incide sobre o metal e terá um valor mínimo, de corte para que o elétron saia do metal. É importante mencionar aqui que para frear um elétron com energia cinética  $E_{c_{máx}}$  é preciso usar um potencial de corte  $V_0$ , tal que, multiplicado por  $e$  (carga elementar do elétron), nos fornece a energia do elétron mais rápido emitido, ou seja

$$E_{c_{máx}} = e V_0$$

$$E_{c_{máx}} = E_{fóton} - \phi$$

$$E_{c_{máx}} = h\nu - \phi$$

Da expressão [1], teremos

$$eV_0 = h\nu - h\nu_{corte}$$

$$V_0 = \frac{h\nu - h\nu_{corte}}{e}$$

Einstein afirmou que, se a “fórmula estiver correta”, ao plotar um gráfico do potencial necessário a arrancar os elétrons do metal pela frequência da luz incidente nele, deve-se chegar a uma reta, cuja inclinação é independente da natureza do metal, como observado por Philipp Lenard (Gráfico 3). (Einstein, 1965)

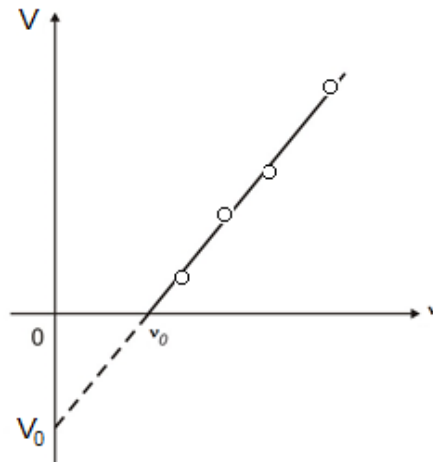


Gráfico 3: por este gráfico de  $V$  versus  $\nu$  é possível perceber que para determinado metal existe uma frequência mínima de corte  $\nu_0$  capaz de arrancar elétrons do metal.

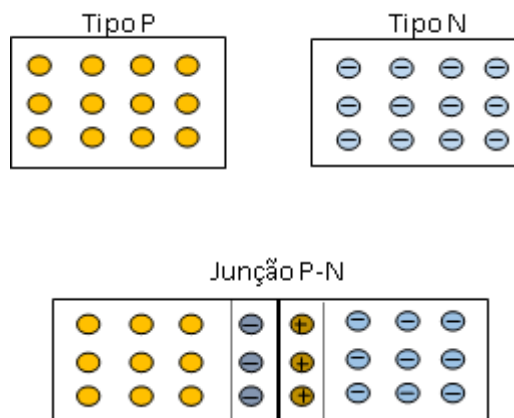
Portanto, a mínima energia capaz de arrancar elétrons de um metal é independente da intensidade de luz, ou seja, não depende da quantidade de fótons emitidos pela luz, basta um fóton para um elétron.

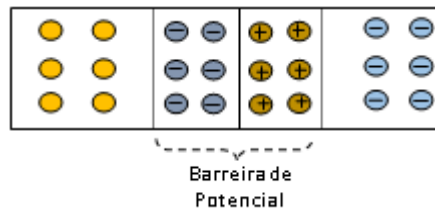
Albert Einstein seguiu as ideias de Planck e associou a frequência de oscilação dos átomos do ressonador do corpo negro com a frequência da luz emitida e incidente no metal em forma de pacotes. Posteriormente chamou estes pacotes de fótons (partículas de Luz).

### Funcionamento de um LED

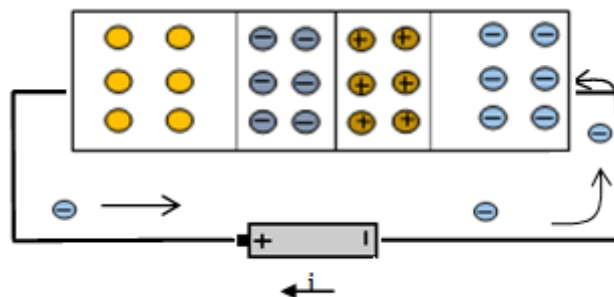
Os LEDs são diodos dopados com impurezas do tipo **n** e **p** e é na junção desses dois materiais onde haverá a emissão de luz, por isso são chamados de diodos fotoemissores ou diodos emissores de luz.

A seguir uma representação da junção pn de um LED onde os elétrons e “buracos” se movem ocupando a barreira de potencial no equilíbrio. Reparem que aí aparece um campo elétrico e conseqüentemente uma diferença de potencial na barreira de potencial.





Quando o LED é ligado numa bateria como na figura a seguir, ou seja, numa polarização direta, elétrons fornecidos a região **n** pela bateria “saltam” para a região **p** para os “buracos” (lacunas) ali existentes.



Esses elétrons extras na região **n** possuem um nível de energia maior que os da região **p** onde há “lacunas” e, nesses saltos, eles rompem a barreira de potencial e liberam energia em forma de luz (fótons).

Vale lembrar que a emissão da luz só ocorre a partir de uma tensão acima da tensão limitada pela impureza do LED. Esse fenômeno é chamado de eletroluminescência, daí o nome de *diodo emissor de luz* ou *diodo fotoemissor*

Mas, e se o LED receber uma certa intensidade de luz, ele pode funcionar como um detector de onda eletromagnética? Ele pode gerar corrente elétrica como se fosse um efeito fotoelétrico?

### LEDs como fotorreceptores (fotodiodos)

Nos semicondutores a simples aplicação de energia externa, como calor, pode fazer com que elétrons se desloquem de uma banda de energia (valência) menos energética para uma banda mais energética (condução). Isso fará que o semicondutor gere uma corrente elétrica.

Em LEDs (semicondutores dopados e emissores de luz) é possível aplicar essa energia externa sob forma de luz (onda eletromagnética) e esta registrar uma corrente elétrica como nos painéis fotovoltaicos e “baterias solares”.

Como os LEDs comerciais são fabricados com cristais semitransparentes e capas transparentes que permitem a passagem de luz, se uma luz de energia  $h\nu$  incidir em sua face haverá, dependendo da energia, “saltos” de elétrons para camadas de energia superior. E, portanto, com uma incidência direta de luz (fótons) neste LED, agora chamado de fotodiodo, é possível verificar por meio de um amperímetro o estabelecimento de uma corrente elétrica num circuito associado a ele.



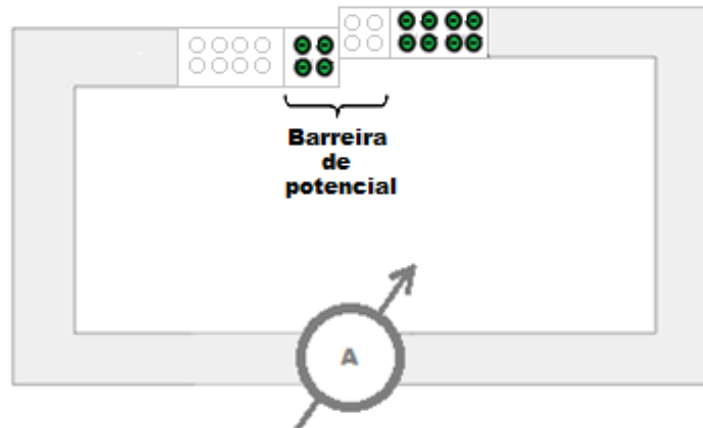


Figura 1: Representação de um LED com a junção **pn** em equilíbrio. A recombinação entre elétrons e “buracos” forma uma barreira de potencial de energia de gap específica para cada material que é feito o LED.

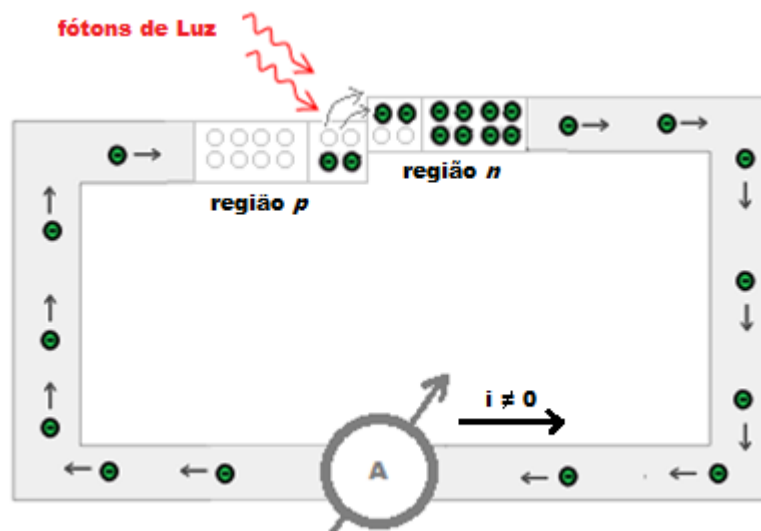


Figura 2: Representação da incidência de **fótons de luz** sobre um LED. Se unirmos os extremos do Led (suas polaridades) por fios e um amperímetro, este acusará uma corrente elétrica.

Os elétrons da barreira de potencial da região **p** que receberam energia  $h\nu$  dos fótons de Luz, se deslocam para a região **n** e, por um fio condutor passam para regiões de energia mais baixa (região **p**), que por sua vez recebem novamente energia da luz incidente, gerando assim uma corrente elétrica contínua  $i \neq 0$ . Essa corrente elétrica é chamada de corrente reversa ou fotocorrente e é muito baixa (da ordem de microamperes –  $\mu\text{A}$ ). Dependendo da natureza de que é feito o LED essa corrente elétrica pode variar de acordo com a luz monocromática incidente. Para LEDs monocromáticos que vão do infravermelho ao violeta a energia de gap cresce a medida que a frequência de luz emitida aumenta, ou seja, são proporcionais.

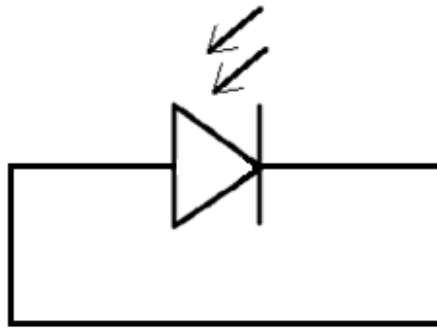


Figura 4.16: Representação de um Led como detector de luz (Fotodiodo ou fotorreceptor).

## Roteiro do Experimento 2 (Estudo do Efeito fotoelétrico)

Você recebeu dois módulos A e B de equipamentos para a realização do experimento do “efeito fotoelétrico”.

O módulo A (já usado na determinação do  $\lambda$  da Luz monocromática do LED) será usado como fonte de luz para iluminar o LED do módulo B e, assim, controlar a intensidade de luz por meio de seu potenciômetro.

O módulo B é o sensor (receptor) de luz e o LED colocado nele receberá luz do Led do módulo A. Repare que na entrada do Led, mais precisamente no terminal negativo (módulo B ) há um resistor de  $1M\Omega$  ( $1 \cdot 10^6\Omega$ ) em paralelo com o voltímetro. Este voltímetro indicará a existência de tensão no LED iluminado.

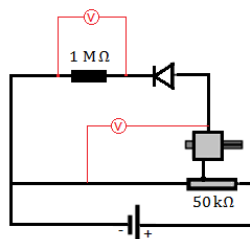


Diagrama do circuito B

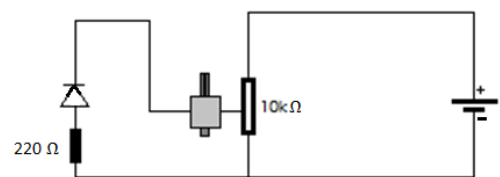
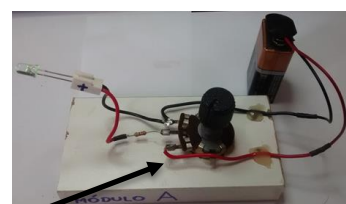


Diagrama do circuito A



**potenciômetros**

Na sua bancada há 5 potinhos (kinder ovo) com LEDs monocromáticos.

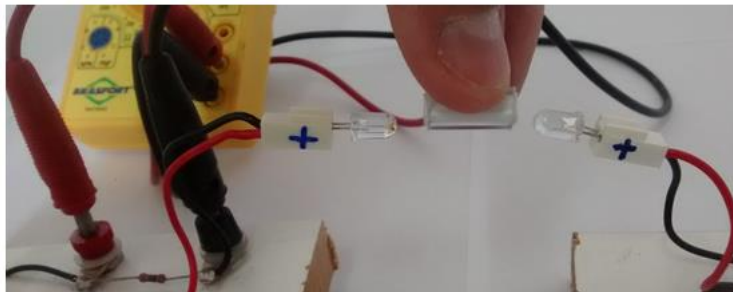
### 1ºPasso:

Conecte LEDs de cores diferentes no módulo A e com ele ilumine outros LEDs do módulo B. Verifique a existência ou não de tensão elétrica gerada no LED iluminado, montando uma tabela.

*Cuidados: 1. Não esqueça de conectar o voltímetro para medir a tensão.*

*2. Como os LEDs tem polaridade, conecte corretamente os terminais no conector “molex”. Lembre-se que terminal maior é positivo.*

*3. Os LEDs podem ser colocados face a face por meio de um tubinho de caneta que se encontra ao lado dos potinhos. Vide figura.*



Depois de montado sua tabela, responda as questões:

1ª. Questão.

Por que alguns LEDs não geram fotocorrente (tensão elétrica)?

Qual a condição para que o LED iluminado funcione como um sensor de Luz, ou seja, ele acuse no voltímetro uma determinada tensão? Relacione com a energia e a frequência do espectro de cada LED.

2ª. Questão.

Ao aumentar a intensidade da luz sobre o LED iluminado, o que acontece com a indicação do voltímetro? A intensidade da luz é proporcional a essa corrente elétrica, também chamada de fotocorrente?

### 2ºPasso:

Agora vamos usar como fonte de luz no módulo A um LED de cor **Azul** e iluminar outro LED de cor **verde** do módulo B.

Procedimento:

1. Conecte os voltímetros nos seus respectivos bornes e as baterias de 9V.



2. Certifique-se de que o potenciômetro multivolta (do módulo B) esteja no seu curso mínimo, girando-o totalmente no sentido anti-horário.
3. Ilumine com máxima intensidade o LED do módulo B e anote a fotocorrente elétrica gerada por ele usando a indicação do Voltímetro e a Lei de Ohm  $V = R \cdot i$  (lembre-se de que  $R = 1M\Omega$ ).

### Cálculo de $i$

*Neste caso, o LED (módulo B) estará fazendo o papel da placa metálica emissora de fotoelétrons, como no Efeito fotoelétrico.*

4. Abra um programa do excell que está em seu computador e anote na tabela dada, o valor da fotocorrente.

	<b>MAIS INTENSO</b>		
	U(V)	i(μA)	
	0		

5. No módulo B há um potenciômetro multivolta ligado a uma bateria externa de 9V. Esta tem a função de estabelecer no circuito uma corrente elétrica “inversa”, capaz de desacelerar os elétrons ejetados do LED iluminado. (Como ocorre no experimento do Efeito Fotoelétrico)  
Com o potenciômetro pode-se variar a tensão da bateria até “zerar” a corrente elétrica dos fotoelétrons (representado pelo voltímetro A). O Potencial de frenagem é dado pelo voltímetro (B) quando a corrente é zerada.  
Faça várias medidas e anote-as na tabela dada do Excell. Sugestão: varie a corrente, diminuindo de 0,50 em 0,50 μA.

6. Terminada a tabela, plote o gráfico  $U(V) \times i(\mu A)$ .
7. Zere novamente a tensão “reversa” e, com o LED do módulo A iluminando com a **metade** de sua intensidade, construa novamente **uma tabela**  $U(V) \times i(\mu A)$  e um **gráfico**.
8. No final plote os dois gráficos juntos no mesmo eixo.
9. Repita todo o procedimento (de 1 a 9), trocando o LED iluminado verde pelo laranja, vermelho e infravermelho, respectivamente.

Com os gráficos em mãos responda:

1ª. Questão:

Quanto maior a frequência da luz incidente, maior o potencial de corte?

2ª. Questão:

Quanto maior a intensidade de luz incidente, maior a frequência de corte?

3ª. Questão:

Quanto maior a frequência da luz incidente, maior a energia cinética dos elétrons ejetados?





4ª. Questão:

Todos os gráficos tem um mesmo aspecto, começam espaçados e convergem para um mesmo potencial de parada aproximadamente. O Potencial de parada depende da Intensidade da luz incidente sobre o mesmo LED iluminado? Responda de acordo com o que você aprendeu sobre o funcionamento de LED's.

### **CÁLCULO da constante de planck $h$**

Para se determinar a constante de Planck siga o procedimento a seguir:

1. Monte uma tabela com: os comprimentos de onda calculados por você no experimento 1, calculando a sua frequência  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  onde  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Anote também os potenciais de corte para cada LED

LED	$\lambda$ (nm)	$\nu(10^{14}$ Hz)	$V_{corte}$ (V)
 infravermelho			
 vermelho			
 laranja			
 verde			

- Com o programa de Excell, plote um gráfico do Potencial de parada *versus* frequência de luz do LED.
- Trace uma reta e determine a constante de Planck conforme a seguir: Considerando que a Energia necessária para frear os elétrons seja dada por

$$E = e.V = h\nu$$

Isolando  $h$ , teremos

$$h = e \cdot \frac{V_{corte}}{\nu}$$

onde

$\frac{V_{corte}}{\nu}$  é o coeficiente angular da reta.

## Apêndice C

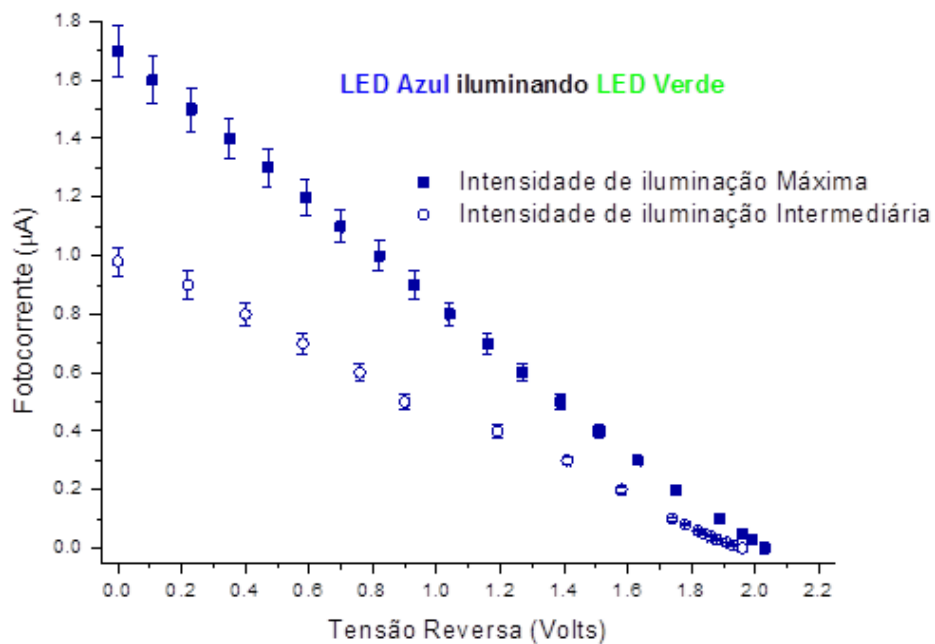
### Tabelas e gráficos dos resultados experimentais

#### LED Azul iluminando verde

Mais intenso

Menos intenso

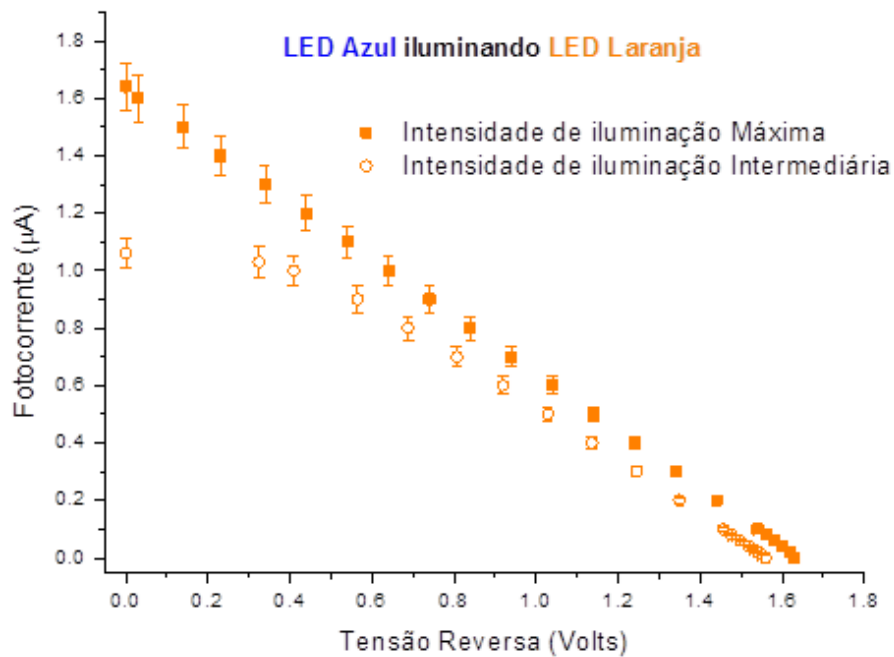
U(V)	i(μA)	U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	1,700 ± 0,086	0,000 ± 0,002	0,980 ± 0,049
0,110 ± 0,003	1,600 ± 0,081	0,220 ± 0,003	0,900 ± 0,045
0,230 ± 0,003	1,500 ± 0,076	0,400 ± 0,004	0,800 ± 0,040
0,350 ± 0,004	1,400 ± 0,071	0,580 ± 0,005	0,700 ± 0,035
0,470 ± 0,004	1,300 ± 0,066	0,760 ± 0,002	0,600 ± 0,030
0,590 ± 0,005	1,200 ± 0,061	0,900 ± 0,007	0,500 ± 0,025
0,700 ± 0,006	1,100 ± 0,056	1,190 ± 0,008	0,400 ± 0,020
0,820 ± 0,006	1,000 ± 0,050	1,410 ± 0,009	0,300 ± 0,015
0,930 ± 0,007	0,900 ± 0,045	1,580 ± 0,010	0,200 ± 0,010
1,040 ± 0,007	0,800 ± 0,040	1,740 ± 0,011	0,100 ± 0,006
1,160 ± 0,008	0,700 ± 0,035	1,780 ± 0,011	0,080 ± 0,005
1,270 ± 0,008	0,600 ± 0,030	1,820 ± 0,011	0,060 ± 0,004
1,390 ± 0,009	0,500 ± 0,025	1,840 ± 0,011	0,050 ± 0,003
1,510 ± 0,010	0,400 ± 0,020	1,860 ± 0,011	0,040 ± 0,003
1,630 ± 0,010	0,300 ± 0,015	1,880 ± 0,011	0,030 ± 0,003
1,750 ± 0,011	0,200 ± 0,010	1,910 ± 0,012	0,020 ± 0,002
1,890 ± 0,011	0,100 ± 0,006	1,930 ± 0,012	0,010 ± 0,002
1,960 ± 0,012	0,050 ± 0,003	1,960 ± 0,012	0,000
1,990 ± 0,012	0,030 ± 0,003		
<b>2,03 ± 0,01</b>	0,000		



Potencial médio de parada:  $V_{corte} = (2,00 \pm 0,04) V$

- LED Azul iluminando Laranja

Mais intenso		Menos intenso	
U(V)	i(μA)	U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	1,640 ± 0,083	0,000 ± 0,002	1,06 ± 0,054
0,030 ± 0,002	1,600 ± 0,081	0,325 ± 0,004	1,03 ± 0,052
0,140 ± 0,003	1,500 ± 0,076	0,409 ± 0,004	1,00 ± 0,050
0,230 ± 0,003	1,400 ± 0,071	0,565 ± 0,005	0,90 ± 0,045
0,340 ± 0,004	1,300 ± 0,066	0,688 ± 0,005	0,80 ± 0,040
0,440 ± 0,004	1,200 ± 0,061	0,807 ± 0,006	0,70 ± 0,035
0,540 ± 0,005	1,100 ± 0,056	0,919 ± 0,007	0,60 ± 0,030
0,640 ± 0,005	1,000 ± 0,050	1,029 ± 0,007	0,50 ± 0,025
0,740 ± 0,006	0,900 ± 0,045	1,136 ± 0,008	0,40 ± 0,020
0,840 ± 0,006	0,800 ± 0,040	1,245 ± 0,008	0,30 ± 0,015
0,940 ± 0,007	0,700 ± 0,035	1,350 ± 0,009	0,20 ± 0,010
1,040 ± 0,007	0,600 ± 0,030	1,456 ± 0,009	0,10 ± 0,006
1,140 ± 0,008	0,500 ± 0,025	1,477 ± 0,009	0,08 ± 0,005
1,240 ± 0,008	0,400 ± 0,020	1,498 ± 0,009	0,06 ± 0,004
1,340 ± 0,009	0,300 ± 0,015	1,519 ± 0,010	0,04 ± 0,003
1,440 ± 0,009	0,200 ± 0,010	1,530 ± 0,010	0,03 ± 0,003
1,540 ± 0,010	0,100 ± 0,006	1,540 ± 0,010	0,02 ± 0,002
1,560 ± 0,010	0,080 ± 0,005	1,551 ± 0,010	0,01 ± 0,002
1,580 ± 0,010	0,060 ± 0,004	1,560 ± 0,010	0
1,600 ± 0,010	0,040 ± 0,003		
1,620 ± 0,002	0,02 ± 0,002		
1,630 ± 0,002	0		



Potencial médio de parada  $V_{corte} = (1,60 \pm 0,04) V$



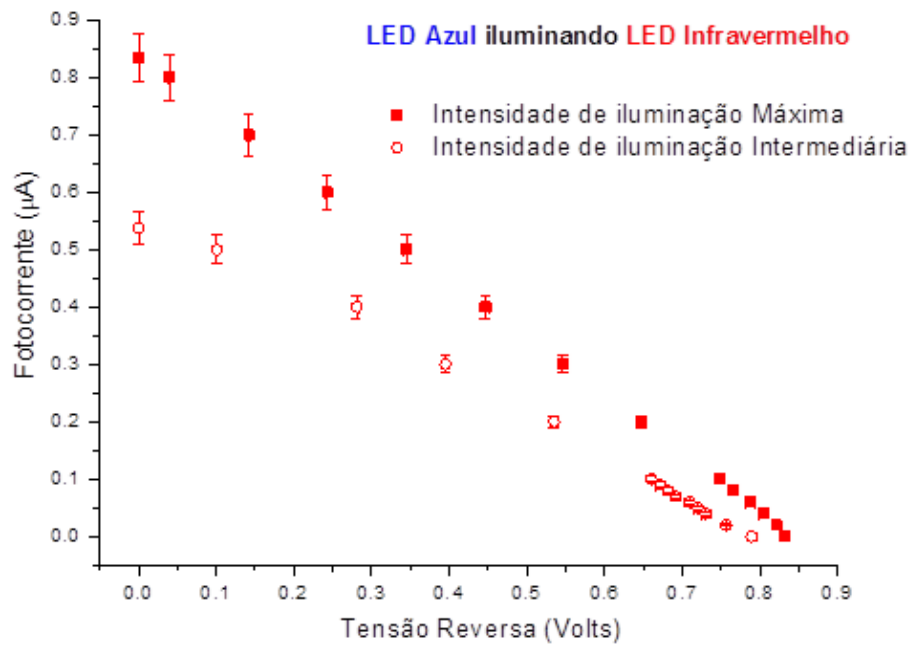
- LED Azul iluminando Infravermelho

**Mais intenso**

U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	0,834 ± 0,042
0,040 ± 0,002	0,800 ± 0,040
0,142 ± 0,003	0,700 ± 0,035
0,243 ± 0,003	0,600 ± 0,030
0,345 ± 0,004	0,500 ± 0,025
0,447 ± 0,004	0,400 ± 0,020
0,546 ± 0,005	0,300 ± 0,015
0,648 ± 0,005	0,200 ± 0,010
0,748 ± 0,006	0,100 ± 0,006
0,765 ± 0,006	0,080 ± 0,005
0,787 ± 0,006	0,060 ± 0,004
0,804 ± 0,006	0,040 ± 0,003
0,821 ± 0,006	0,020 ± 0,002
<b>0,831 ± 0,006</b>	0

**Menos intenso**

U(V)	i(μA)
0,000 ± 0,002	0,538 ± 0,027
0,101 ± 0,003	0,500 ± 0,025
0,281 ± 0,003	0,400 ± 0,020
0,395 ± 0,004	0,300 ± 0,015
0,535 ± 0,005	0,200 ± 0,010
0,660 ± 0,005	0,100 ± 0,006
0,671 ± 0,005	0,090 ± 0,005
0,681 ± 0,005	0,080 ± 0,005
0,691 ± 0,005	0,070 ± 0,004
0,709 ± 0,006	0,060 ± 0,004
0,720 ± 0,006	0,050 ± 0,003
0,730 ± 0,006	0,040 ± 0,003
0,756 ± 0,006	0,020 ± 0,00
<b>0,789 ± 0,006</b>	0



Potencial médio de parada  $V_{corte} = (0,81 \pm 0,01) V$