

# Estudo das propriedades do Diodo Emissor de Luz (LED) para a determinação da constante de Planck numa maquete automatizada com o auxílio da plataforma Arduino

Study of properties of Light Emission Diode (LED) for the determination of the Planck constant in a automated device with Arduino platform aid

Ivanor N. de Oliveira<sup>1</sup>, Jorge A. P. Ramos\*<sup>1</sup>, Wilton L. Silva<sup>2</sup>, Valteni D. Chaves<sup>3</sup>, Clênia A. O. de Melo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Ciências Exatas e Tecnológicas, Vitória da Conquista, BA, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, BA, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Federal Baiano, Salvador, BA, Brasil

Recebido em 05 de Maio de 2019. Revisado em 17 de Junho de 2019. Aceito em 28 de Julho de 2019.

No presente artigo, apresenta-se o método experimental de determinação da constante de Planck, uma das constantes físicas fundamentais, através do estudo das propriedades quânticas e ondulatórias do diodo emissor de luz (LED) numa maquete experimental automatizada, que contém um circuito eletrônico ligado a um computador utilizando o protocolo USB com o auxílio da plataforma Arduino. Os LEDs têm encontrado diversas aplicações, por exemplo: na iluminação doméstica, pública, nos semáforos, nos monitores de TV, computadores, para ler discos de CD e DVD em unidades de computador e em unidades de console de jogos, ou para transmitir sinais de controles remotos para equipamentos eletrônicos. O LED é uma ligação vital entre eletrônica e fotônica os lasers de semicondutor baseados em LEDs enviam sinais ópticos modulados através de fibras ópticas, atendendo à demanda cada vez maior da telecomunicação de banda larga e Internet. A automatização das medições e da elaboração dos dados dos experimentos de Física permite aos alunos aprofundar o conhecimento de métodos e técnicas do experimento, estudar aparelhos de pesquisa científica, dominar diferentes métodos de pesquisas experimentais, dominar métodos matemáticos e gráficos dos resultados obtidos e também a avaliação das medições realizadas.

**Palavras-chave:** Ensino de Física. Laboratório remoto. Plataforma Arduino.

In the present article, the experimental method of determination of Planck's constant, one of the fundamental physical constants, is presented by studying the quantum and wave properties of the light emitting diode (LED), in an automated experimental model which contains an electronic circuit connected to a computer using the USB protocol with the help of the Arduino platform. LEDs have found a variety of applications, for example: in home, public, in-house lighting, TV monitors, computers, to read CD and DVD discs in computer units and game console units, or to transmit signals from remote controls to electronic equipment. LED is a vital link between electronics and photonics: LED-based semiconductor lasers send modulated optical signals through fiber optics, catering to the ever-increasing demand for broadband and Internet telecommunication. The automation of measurements and data processing of Physics experiments allows students to deepen their knowledge of methods and techniques of the experiment, to study scientific research apparatus, to master different experimental research methods, to master mathematical methods and graphs of the results obtained, and also the evaluation of the measurements made.

**Keywords:** Physics Teaching. Remote laboratory. Arduino Platform.

## 1. Introdução

A descoberta do diodo emissor de luz (LED) está relacionada a dois nomes: Henry Joseph Round no Laboratório de Marconi observou o fenômeno de eletroluminescência como um fenômeno em 1907 usando um cristal de carbono de silício e um detector [1], [2], independentemente, o cientista Russo, Oleg Vladimirovitch Losev, descobriu o LED [3]. Em seus artigos científicos, publicados entre

1924 e 1930, Oleg V. Losev forneceu um estudo abrangente sobre o LED e delineou as suas aplicações. As suas pesquisas foram publicadas em revistas científicas da União Soviética, Alemanha e Inglaterra, entretanto elas não foram postas em prática durante várias décadas [4], [5]. Ele entendeu a natureza “fria”(não térmica) da emissão do LED, mediu seu atual limiar de emissão de luz, reconheceu que sua emissão está relacionada à ação de diodo e mediu, detalhadamente, a dependência

\*Endereço de correspondência: [jorge@uesb.edu.br](mailto:jorge@uesb.edu.br).

tensão-corrente característica desse dispositivo eletrônico, mostrada na Figura 1 [3].

Chama a atenção o fato de que Oleg Losev, um jovem técnico sem titulações científicas, conhecia os desenvolvimentos contemporâneos em Física [5]. Ele usou a teoria quântica de Einstein para explicar a ação do LED e chamou o processo de emissão de “efeito fotoelétrico inverso”. Além disso, ele propôs uma fórmula [6] relativa à queda de tensão no contato do diodo,  $U$ , a carga do elétron  $e$ , e a frequência de emissão da luz,  $\nu$ , através da constante de Planck,  $h$ :

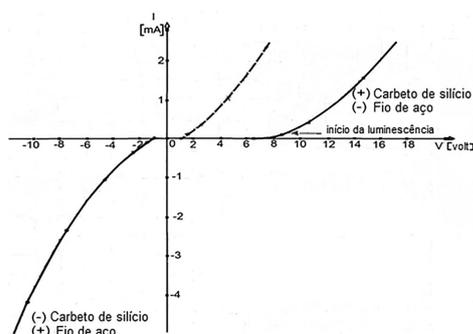
$$\nu = \frac{eU}{h} \quad (1)$$

A fórmula proposta por Oleg Losev, em 1929, resulta da igualdade entre as expressões quantitativas clássica e quântica da energia:

$$eU_o = h\nu \quad (2)$$

onde  $U_o$  é a tensão limiar de emissão do LED.

No presente artigo, apresenta-se o método experimental para determinação da constante de Planck, uma das constantes físicas fundamentais, através do estudo das propriedades quânticas e ondulatórias do diodo emissor de luz (LED), numa maquete experimental automatizada que contém um circuito eletrônico ligado a um computador utilizando o protocolo USB com o auxílio da plataforma Arduino. Esse componente eletrônico desempenha um papel importante na tecnologia atual. As suas aplicações estão presentes em diversas esferas da vida cotidiana, no trabalho, na vida doméstica e em ambientes públicos. Para exemplificar, vamos citar apenas algumas das suas aplicações. Ele é usado na iluminação doméstica, nos semáforos, na iluminação pública, nos monitores de TV, computadores, para ler discos de CD e DVD em unidades de computador e em unidades de console de jogos, ou para transmitir sinais de controles remotos para equipamentos eletrônicos. O mais importante, no entanto, é que o LED é uma ligação vital entre eletrônica e fotônica [5]: os lasers de semicondutor baseados em LEDs enviam sinais ópticos modulados através



**Figura 1:** Gráfico das características  $I \times V$  de um detector de carbeto de silício indicando limiar da emissão de luz [3].

de fibras ópticas, atendendo à demanda cada vez maior da telecomunicação de banda larga e Internet.

A automatização das medições e da elaboração dos dados dos experimentos de Física tem como objetivo, em primeiro lugar, garantir aos estudantes do Curso de Licenciatura em Física da UESB, modalidade a distância, o acesso aos laboratórios remotos de Física Geral via Internet, mas também a sua utilização pelos estudantes do curso presencial de Física, o que permite aos alunos complementar as aulas teóricas, aprofundar o conhecimento de métodos e técnicas do experimento, estudar aparelhos de pesquisa científica e a familiarização com os mesmos, dominar diferentes métodos de pesquisas experimentais, dominar métodos matemáticos e gráficos dos resultados obtidos e também a avaliação das medições realizadas.

## 2. O desenvolvimento dos primeiros LEDs coloridos

O primeiro LED de espectro visível (vermelho) foi desenvolvido em 1962 por Nick Holonyak Jr., enquanto trabalhava na General Electric. Holonyak relatou, pela primeira vez, seu LED na revista Applied Physics Letters em 1 de dezembro de 1962 [7], [8]. M. George Craford [9] um ex-aluno de pós-graduação de Holonyak, inventou o primeiro LED amarelo e melhorou o brilho dos LEDs vermelho e vermelho-alaranjado por um fator de dez em 1972 [10]. Em 1976, T. P. Pearsall criou os primeiros LEDs de alta luminosidade e alta eficiência para telecomunicações de fibra óptica, inventando novos materiais semicondutores especificamente adaptados para comprimentos de onda de transmissão de fibra óptica [11].

### 2.1. O LED azul

Para revolucionar a tecnologia da iluminação ainda faltava desenvolver o LED azul. Como se sabe, somente a tríade formada pelas cores vermelha, verde e azul pode produzir a luz branca. Entretanto, a criação do diodo emissor de luz azul permaneceu um desafio por décadas, tanto para a comunidade científica, como para a indústria eletrônica. Os trabalhos desenvolvidos pelos cientistas japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura culminaram com a invenção do LED azul. Nos anos 1990 os seus trabalhos possibilitaram a produção de LEDs azuis eficientes, com estruturas complexas. Em 2014 eles receberam o Prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento do LED azul [12].

## 3. O princípio de funcionamento do LED

O princípio de funcionamento do LED (Figura 2) consiste da transformação da energia elétrica em radiação, que pode pertencer ao espectro visível ou infravermelho da luz.

A estrutura do LED é uma transição elétron-buraco, por isso, os mecanismos de passagem da corrente através

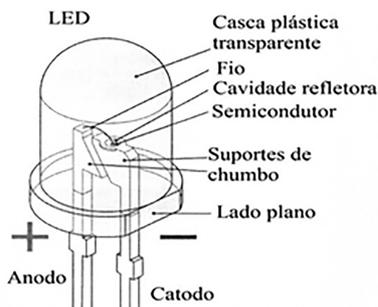


Figura 2: Partes constituintes do LED.

de um diodo de semicondutor e de um LED são iguais. Os materiais da transição elétron-buraco da estrutura do LED são escolhidos de forma que os elétrons livres na região-n (emissor) possuem menor energia que na região-p (base). Na ausência de um campo elétrico externo, a difusão dos principais portadores de carga através da transição p-n (dos elétrons da região-n para a região-p e dos buracos em direção contrária) é impedida pelo campo elétrico interno denominado campo de contato. A intensidade  $E_c$  desse campo, a largura  $d$  da transição p-n e a diferença de potencial de contato  $U_c$  estão ligadas pela relação:  $E_c = \frac{U_c}{d}$ . Devido ao campo elétrico do contato, para a passagem de um elétron da região-n para a região-p e de um buraco em direção oposta, é necessário realizar trabalho igual ao produto da carga do elétron pela diferença de potencial de contato, ou seja, é necessário superar a barreira de potencial  $eU_c$  (Figura 3).

Aplicando-se uma diferença de potencial  $U$ , diretamente polarizada, aos terminais do LED, a intensidade do campo elétrico externo  $E$  tem sentido contrário à intensidade do campo elétrico de contato  $E_c$ . Por isso, a barreira de potencial na transição p-n diminui e torna-se igual a  $e(U_c - U)$  e parte dos portadores principais de carga tem a possibilidade de superar a transição p-n (Figura 4).

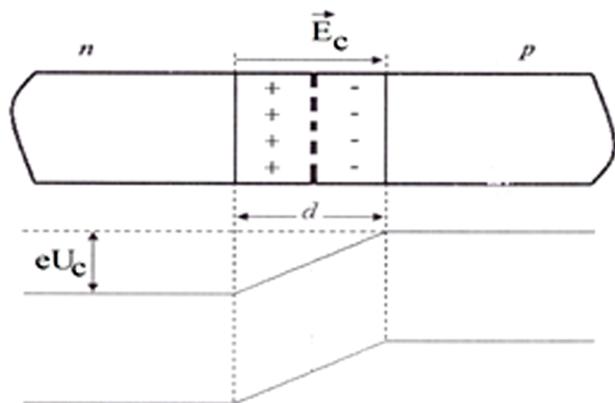


Figura 3: Campo elétrico interno  $E$  e barreira potencial de contato  $eU_c$ .

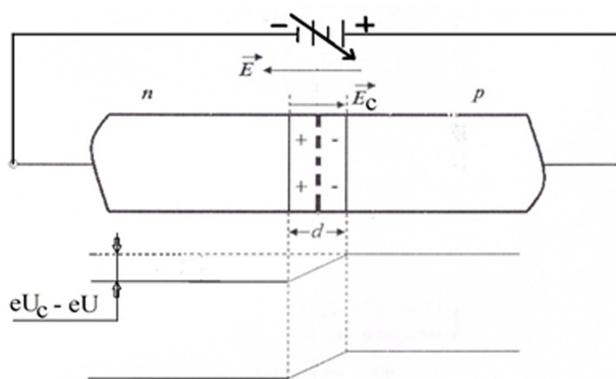


Figura 4: Campos elétricos externo  $E$ , interno  $E_c$  e barreira potencial na transição p-n.

Com isso, ocorre a injeção dos elétrons e buracos nas regiões p e n, correspondentemente. Quando o valor da tensão externa  $U$  torna-se próximo de  $U_c$ , a barreira de potencial  $e(U_c - U)$  e sua espessura  $d$  tendem a zero. Então, os elétrons e buracos vão ao encontro uns dos outros sem impedimento e a corrente elétrica cresce abruptamente. Ela é limitada apenas pela resistência elétrica intrínseca do diodo de semicondutor, o que leva a curva  $I$  vs  $U$  a possuir uma contribuição aproximadamente linear, a partir do momento em que o elétron adquire quantidade de energia necessária para efetuar a transição designada por  $E_g$  [13], [14]. No LED, a energia da fonte de corrente elétrica, gasta para superar a barreira potencial  $eU_c$ , para cada portador, transforma-se em energia luminosa. Por isso, pode-se escrever:

$$eU_c = h\nu \tag{3}$$

onde, a frequência da radiação do LED está ligada com o comprimento de onda,  $\nu = c/\lambda$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. O comprimento de onda  $\lambda$  pode ser medido com o auxílio de uma rede de difração.

#### 4. Variantes de montagem da maquete experimental automatizada para a determinação da constante de Planck

Para a determinação da constante de Planck, são conhecidas duas variantes de montagens da maquete experimental.

##### 4.1. Primeira variante de montagem da maquete experimental

A primeira variante de montagem é dada na Figura 5, constituída por uma base na qual são instalados dois suportes: um contém uma régua graduada com zero central, onde se tem um LED ligado ao circuito eletrônico da plataforma Arduino, que se comunica com o computador via USB; o outro suporte contém uma rede de difração unidimensional de 1000 linhas por mm. A rede de di-

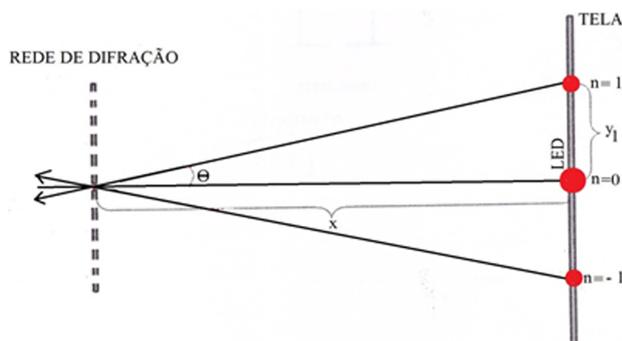


**Figura 5:** Maquete experimental para a determinação da constante de Planck - primeira variante de montagem.

fração unidimensional é composta por transparências paralelas para seções de luz da mesma largura, que estão localizadas no mesmo plano. As áreas transparentes são separadas por lacunas opacas. Com a ajuda dessas redes, são feitas observações na luz transmitida. O padrão de difração na rede é o resultado da interferência mútua de ondas provenientes de todas as fendas. Na Figura 5, mostra-se, com o auxílio da rede de difração, um dos máximos secundários simétricos da luz emitida pelo LED vermelho.

#### 4.2. Observação do espectro de difração com a primeira variante da maquete experimental

Como mostra, esquematicamente, a Figura 6, a observação do espectro de difração da luz, nesse caso, é feita olhando-se diretamente através da rede de difração na direção da tela (ou da régua graduada) da maquete com o ambiente laboratorial escurecido. Assim é observado o espectro de difração sobre a tela ou sobre uma régua graduada com zero central, onde os máximos secundários de cada ordem se encontram em posições simétricas em relação ao máximo principal.



**Figura 6:** Esquema óptico de observação do espectro de difração da emissão do LED - primeira variante de montagem da maquete.

#### 4.3. Segunda variante de montagem da maquete experimental

A segunda variante de montagem da maquete experimental permite a observação do espectro de difração da luz numa tela ou régua graduada (Figura 7) sem a necessidade de escurecer o ambiente. Ela difere da primeira pela posição do LED, agora no início da base da maquete e pela inserção de uma lente convergente antes da rede de difração. A vantagem dessa variante está na forma de observação do espectro de difração, que é visto diretamente na tela sem a necessidade de observação individual do espectro através da rede de difração (Figura 6) e em ambiente escuro.

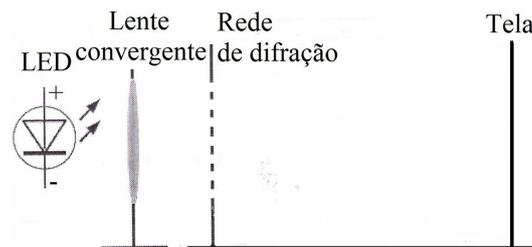
### 5. Maquete experimental construída para a determinação da constante de Planck

A Figura 8 mostra a segunda variante de montagem da maquete experimental.

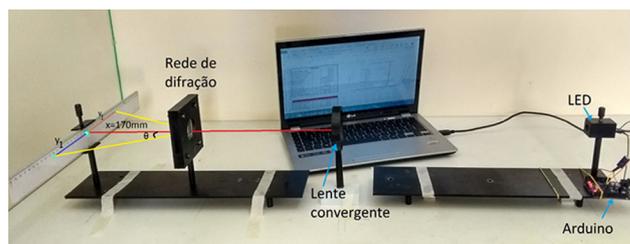
#### 5.1. Esquema óptico da segunda variante da maquete experimental

O esquema óptico da segunda variante da maquete experimental, dado na Figura 9, mostra as posições de dois máximos secundários e do máximo principal do espectro de difração de um LED.

No presente trabalho nós escolhemos a segunda variante de montagem do experimento por permitir a observação do espectro de difração por todos os alunos no anteparo, com ambiente iluminado, ao passo que na primeira variante a observação do espectro é individual.



**Figura 7:** Esquema da segunda variante de montagem da maquete experimental.



**Figura 8:** Segunda variante de montagem da maquete experimental para a determinação da constante de Planck.

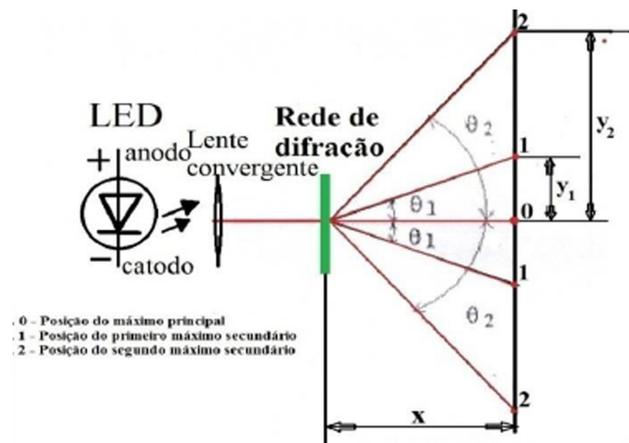


Figura 9: Esquema óptico de observação do espectro de difração da emissão do LED - segunda variante de montagem da maquete.

5.2. Obtenção da fórmula de cálculo da constante de Planck

De acordo com o conceito de energia como medida quantitativa das diferentes formas de movimento da matéria, podemos igualar as expressões quantitativas clássica e quântica da energia, obtidas na equação 2, e determinar o valor da constante de Planck *h*.

$$h = \frac{eU_o}{\nu} \tag{4}$$

A expressão da frequência linear tem a seguinte forma:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \tag{5}$$

onde *c* é a velocidade da luz no vácuo.

Com o auxílio de uma rede de difração com período conhecido, pode-se determinar os comprimentos de onda da luz incidente medindo-se os ângulos de difração, segundo os quais são observados o máximo principal e um dos máximos secundários do espectro do LED. A fórmula de cálculo é a condição de formação dos máximos secundários:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ assim, } \lambda = \frac{d \sin \theta_m}{m} \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \tag{6}$$

Utilizando as equações 5 e 6, obtemos:

$$h = \frac{eU_o d \sin \theta_m}{m c} \tag{7}$$

onde *d* é a constante de rede.

De acordo com o esquema óptico apresentado na Figura 9, a tangente do ângulo *θ* é calculada pela fórmula  $\tan \theta = \frac{y_m}{x}$ . O valor do ângulo *θ* é dado pela fórmula:  $\theta = \arctan \frac{y_m}{x}$ , onde *y<sub>m</sub>* é a distância medida, através da régua, desde a ordem zero de difração (máximo central) até a ordem de difração escolhida (máximo secundário); *x* é a distância entre a rede de difração e o ponto de luz criado na régua pela emissão do LED em ordem zero de difração.

6. Circuito eletrônico para a medição da dependência corrente x tensão de um elemento eletrônico de uma maquete experimental clássica

Inicialmente, vamos analisar o esquema do circuito de medição dado na Figura 10. A tensão de alimentação é dada em Ent.1 e Ent.2 e, como resultado, deve ser construído o gráfico da dependência da corrente através do dispositivo eletrônico (LED) versus tensão nele:

$$I_D \times U_D \tag{8}$$

ou seja,

$$(U_{saida3} - U_{saida2}) \frac{1}{R_1} \times (U_{saida1} - U_{saida3}) \tag{9}$$

7. Estudo da dependência corrente/tensão do LED com o auxílio da plataforma Arduino

O circuito da Figura 10 não pode ser ligado diretamente ao Arduino. Ele não possui um Circuito Conversor Digital - para - Analógico (CDA). Para realizar as medições com o auxílio do Arduino, o circuito de medição foi ampliado para que, no circuito resultante, os sinais de entrada possam ser formados por PWM + LPF (Modulação da largura de pulso + RC Filtro passa-baixa) [15]. A plataforma Arduino oferece uma série de vantagens em relação a outros dispositivos devido ao seu ambiente de programação simples e, claro, preços baixos e uma infinidade de placas de expansão. As placas do Arduino são construídas com base nos microprocessadores Atmel (site oficial do Atmel), bem como elementos de comunicação para programação e integração com outros circuitos. Devido às suas características técnicas e ao fato de que para o estudo da dependência corrente x tensão do dispositivo eletrônico nomeado acima não há exigência de velocidade, vamos utilizar a placa Arduino Uno. Nesse sentido,

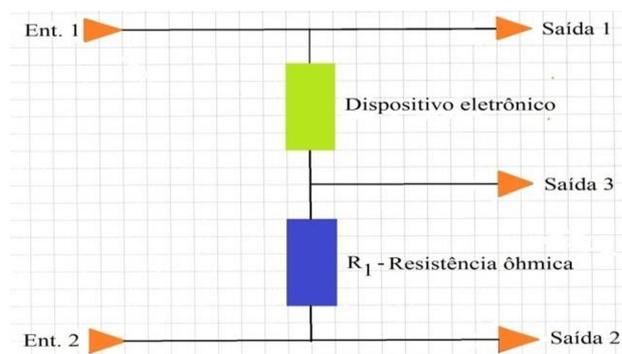


Figura 10: Esquema do circuito de medição da dependência corrente x tensão.

foi utilizado o seguinte esquema de circuito eletrônico mostrado na Figura 11.

### 7.1. Componentes eletrônicos utilizados

- 1 Placa Arduino Uno;
- 1 capacitor eletrolítico de 2200  $\mu\text{F}$ ;
- 1 resistor de 120 Ohm;
- 1 LED.

Na maquete mostrada na Figura 8, o feixe luminoso emitido pelo LED é colimado com o auxílio de uma lente convergente e se difrata ao incidir na rede de difração. Seu espectro pode ser observado, diretamente, num anteparo (tela, régua) ou com o auxílio de uma Web-câmera instalada na maquete sem a necessidade de escurecer o ambiente.

## 8. O Hardware

Na Figura 12 é mostrada a montagem do circuito eletrônico, onde o LED encontra-se ligado em série com o resistor limitador de corrente, cuja resistência é de 120 ohm.

O terminal negativo(-) do capacitor e um dos terminais do resistor encontram-se conectados ao terminal de referência da placa Arduino (gnd). Já o terminal positivo(+) do LED e do capacitor são conectados ao pino D6 da placa Arduino. Deve-se salientar que este pino, D6, foi configurado por software para operar como uma saída PWM (Pulse Width Modulation). Como o sinal PWM fornece uma onda de corrente/tensão pulsada, foi necessário convertê-la numa saída analógica linear. Para tanto, foi utilizado um capacitor, cuja função principal é atuar como filtro. Como se sabe, os filtros são circuitos eletrônicos que deixam passar uma determinada banda de frequência sem atenuação e suprimem todas as outras frequências. A frequência na qual a supressão começa é chamada de frequência de corte. Desta forma, é possível produzir um sinal de corrente/tensão analógico com regulação efetuada via software. Finalmente, o terminal negativo do LED é conectado ao outro terminal do resistor limitador de corrente. Para encontrar a corrente e tensão presentes no LED foi adotada a seguinte metodologia:

- A entrada analógica  $A_1$  do Arduino, é utilizada para medir a tensão sobre o resistor, enquanto a

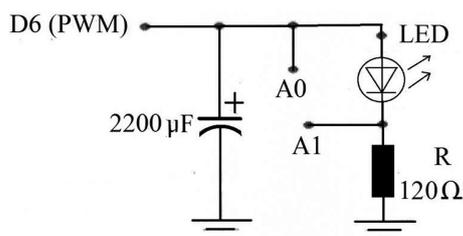


Figura 11: Esquema para medição de  $I \times V$  [17].

entrada analógica  $A_o$  utilizada para medição da tensão total do circuito, ou seja, a tensão fornecida pela saída PWM no pino D6. Assim, é possível determinar a tensão sobre o LED subtraindo da tensão obtida na entrada  $A_o$  aquela encontrada na entrada  $A_1$ . Logo:  $V_{led} = (A_o - A_1)V$ .

- Para obtenção do valor da corrente no LED, foi utilizado a tensão obtida na entrada  $A_1$ , pois com ela é possível calcular a corrente que percorre o resistor utilizando a lei de Ohm. Como este resistor encontra-se ligado em série com LED, a corrente do LED é a mesma do resistor. A expressão utilizada para o cálculo foi:  $I = \frac{V_{A_1}}{120\Omega}$ .
- Finalmente, utilizando uma interface que permite a comunicação do Arduino com o Excel o gráfico da curva corrente X tensão do laser pode ser obtida no Excel.

## 9. A comunicação do Arduino com o computador

Queremos transferir dados das medições do Arduino para o Excel, um editor de planilhas da Microsoft que possui ferramentas de cálculo e construção de gráficos.

### 9.1. Procedimentos necessários para transferir dados das medições do Arduino para o Excel

- Escrever o programa para o Arduino (sketch) para transferir os dados das medições para o Excel;

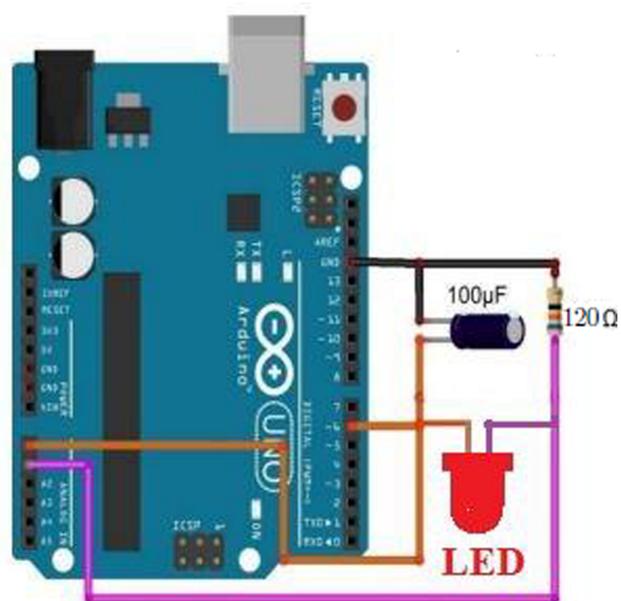


Figura 12: Montagem do circuito eletrônico ligado ao Arduino Uno.

```

/*
Levantamento da curva de tensão x
Corrente de um LED
Experimento utilizado para determinação
da constante de Planck.
*/
*****VARIABLES*
*****
char Letra [] = {'A', 'B', 'C', 'D', 'E'};
intopcao, i, j, linhas, colunas=0, Npontos =
50;
float PA0, PA1, VOLT, CORR, DV;
floatResSerieLED = 120; // Valor da
resistência em série com o LED
*****DEFINIÇÕES
*****
#define LED 13
#define PWMpin 6

void setup()
{
Serial.println("LABEL,Corrente(mA),Tensao
(V)");
Serial.begin(9600);
pinMode(LED, OUTPUT);
pinMode(PWMpin, OUTPUT);
analogReference(DEFAULT);
analogWrite(PWMpin, 0); //Seta tensão
inicial em 0 Volts
}

voidloop()
{
//O usuário escolhe a opção no Excel
if(Serial.available() > 0)
{
opcao = Serial.read(); //Leitura da opção do
usuário
}
switch (opcao)
{
case 'A':
linhas = 1;
Serial.println("RESETROW");
digitalWrite(LED, HIGH); //Liga o Led
indicativo do Arduino
for (int i = 5; i <= 245; i = i + 3)
{
analogWrite(PWMpin, i); //Definição da taxa
do PWM
delay(100); //Tempo de estabilização do sinal
// Faz uma média de Npontos do sinal
capturado
PA0 = 0;
for (j = 0; j < Npontos; j++)
{
delay(2);
PA0 = PA0 + analogRead(0); //Leitura
da porta A0 do arduino
}
PA0 = PA0 / Npontos; // Valor médio de
Npontos medidos (FILTRO)
// Faz uma média de Npontos do sinal
capturado (Filtro)
PA1 = 0;
for (j = 0; j < Npontos; j++)
{
delay(2);
PA1 = PA1 + analogRead(1); //Leitura
da porta A1 do arduino
}
PA1 = PA1 / Npontos; // Valor médio de
Npontos medidos (FILTRO)
DV = (PA0 - PA1); // Tensão sobre o
LED em bits
CORR = (5000 * PA1 / 1023) /
ResSerieLED; //Corrente LED em
Ampere
VOLT = (5.0 * DV / 1023); //Tensão no
LED em Volts
linhas = linhas + 1; //Incrementa o contador
de colunas do Excel
// Transfere a informação de tensão do
Arduino para o Excel
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print(Letra [colunas]);
Serial.print(linhas);
Serial.print(",");
Serial.println(VOLT, 4); //4 casas decimais
// Transfere a informação de corrente do
Arduino para o Excel
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print(Letra [colunas + 1]);
Serial.print(linhas);
Serial.print(",");
Serial.println(CORR, 5); //5 casas decimais
delay(50);
}
digitalWrite(LED, LOW); //Apaga o Led
indicativo do Arduino
opcao = 100; // Cria um valor de opção
inválido
break;
case 'B':
Serial.println("RESETROW");
digitalWrite(LED, HIGH);
for (int i = 0; i < 55; i++)
{
Serial.print("DATA,");
Serial.print(0);
Serial.print(",");
Serial.println(0);
delay(50);
}
linhas = 1; //Contador de linhas
colunas = 0; //Contador de colunas
Serial.println("RESETROW");
digitalWrite(LED, LOW); //Apaga o Led
indicativo do Arduino
opcao = 100; // Cria um valor de opção
inválido
break;
default:
delay(1);
}
}

```

b) Instalar um programa, uma Macro PLX-DAQ, no computador, que vai permitir que o Excel receba os dados do Arduino.

## 9.2. O programa para o Arduino

Abaixo é dado o programa (Sketch) para o Arduino em conformidade com o esquema eletrônico escolhido.

## 10. Apresentação dos resultados das medições

### 10.1. A regressão linear

Para a obtenção da tensão limiar  $U_o$  da emissão de radiação LED, torna-se necessário aplicar o método dos mínimos quadrados para ajustar a contribuição da parte quase retilínea das medições no gráfico através da regressão linear. O ajuste da curva obtida é dado pela função  $y=ax+b$ , equação da reta (variação linear). Omitindo-se os cálculos matemáticos, as expressões para o parâmetro

$a$  (coeficiente angular) e para o parâmetro  $b$  (coeficiente linear) procurados, têm as seguintes formas:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (10a)$$

$$b = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (10b)$$

O valor do erro médio quadrático da aproximação examinada também pode ser obtido com o auxílio da teoria dos erros de medição das grandezas físicas [16]. Entretanto, utilizamos as ferramentas de cálculo e construção de gráficos do Excel na elaboração dos resultados. Foram realizadas medições da dependência I(mA) vs V(volt) dos dispositivos eletrônicos LEDs e, com o auxílio do software Excel foram obtida as curvas características dos mesmos.

### 10.2. Gráficos da curva característica obtida com o Excel

A solução utilizada para comunicação da plataforma Arduino com o software Excel foi a ferramenta Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ).

Esta ferramenta de software é uma add-in gratuita que pode ser agregada ao Microsoft Excel. Com ela, é possível estabelecer uma comunicação serial bidirecional do Computador com um Microcontrolador. O PLX-DAQ recebe e organiza os dados enviados pelo microcontrolador em linhas e colunas dentro de uma planilha Excel, tudo isto em tempo real. Depois de instalado, o PLX-DAQ pode receber várias customizações. Na Figura 13 é apresentada a customização efetuada e utilizada neste trabalho.

Para ativar o PLX-DAQ basta pressionar as teclas Ctrl + Q na planilha Excel. Como pode ser observado no código do programa instalado no Arduino, somente dois botões foram necessários para este experimento. O botão denominado “Coletar Curva”, o qual é responsável por enviar o caractere “A” para o Arduino.

No Arduino, uma vez que este caractere é recebido, ele é armazenado na variável intitulada opção. Desta forma, o fluxo de código toma a decisão de coletar os dados de corrente e tensão do LED, enviando-os para a planilha Excel. Esta rotina é parcialmente apresentada na Figura 14. Caso o botão denominado “Zerar Planilha” seja selecionado no PLX-DAQ, o caractere “B” será enviado

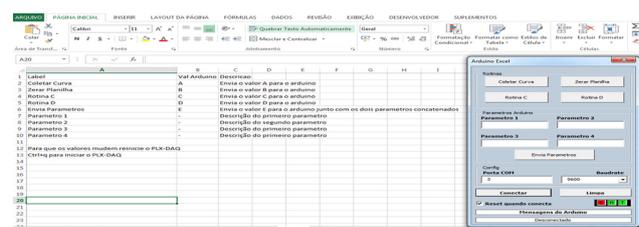


Figura 13: Configuração utilizada no PLX-DAQ.

```
//O usuário escolhe a opção no Excel
if (Serial.available() > 0)
{
  opcao = Serial.read(); //Leitura da opção do usuário
}
switch (opcao)
{
  case 'A':
    linhas = 1;
    Serial.println("RESETROW");
    digitalWrite(LED, HIGH); //Liga o Led indicativo do Arduino
    for (int i = 5; i <= 245; i = i + 3)
    {
      analogWrite(PWMPin, i); //Definição da taxa do PWM
    }
  }
}
```

Figura 14: Código para a escolha da captura de dados e envio para a planilha Excel.

para o Arduino. E, assim, todos os dados da planilha serão apagados.

Um trecho da rotina de código do programa instalado no microcontrolador da plataforma Arduino que executa esta operação é apresentado na Figura 15.

De forma simplificada, o processo de obtenção da curva Corrente x Tensão no LED se dá da seguinte maneira: uma vez que a opção “Coletar Curva”for escolhida, o Arduino iniciará o processo de aumentar passo a passo o comprimento do pulso PWM, e conseqüentemente a tensão de alimentação do circuito no qual o LED encontra-se interligado. Os valores analógicos de tensão sobre o LED e resistor são obtidos. Para minimizar ruídos característicos da conversão analógico digital, foi implementado um filtro digital passa baixa utilizando a operação de média. Os dados de corrente e tensão do LED, depois de tratados, são enviados para a planilha Excel (Figura 16).

Os gráficos das curvas características Corrente x Tensão dos LEDs coloridos estudados são então plotados em tempo real. A Figura 17 mostra as curvas características dos LEDs coloridos com as respectivas regressões lineares.

### 11. Determinação da constante de Planck

As determinações da constante de Planck foram obtidas de acordo com as características dos LEDs coloridos estu-

```
case 'B':
  Serial.println("RESETROW");
  digitalWrite(LED, HIGH);
  for (int i = 0; i < 55; i++)
  {
    Serial.print("DATA, ");
    Serial.print(0);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(0);
    delay(50);
  }
  linhas = 1; //Contador de linhas
  colunas = 0; //Contador de colunas
```

Figura 15: Código para escolha da remoção dos dados da planilha Excel.

dados, aplicando-se a fórmula (7), seção V. Nesse sentido, foram aplicadas as ferramentas de cálculo e construção de gráficos do Excel, com os dados da Tabela 1.

Abaixo, nas Tabelas 2, 3 e 4, são dados os valores determinados da constante de Planck para os LEDs vermelho, verde e azul estudados experimentalmente.

### 12. Considerações finais

Para determinação da constante de Planck foram construídos dois modelos de maquete experimental automatizada (Figura 5 e Figura 8), cuja diferença entre eles consiste no método de observação do espectro de difração da radiação emitida pelo LED numa régua graduada.

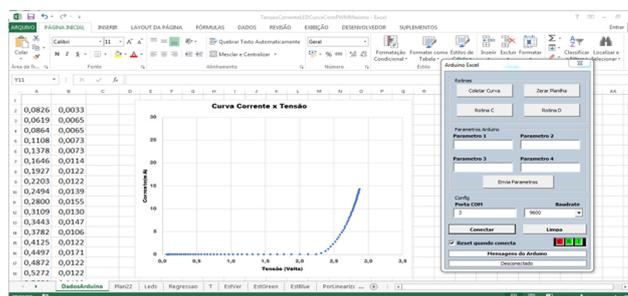


Figura 16: Curva Corrente x Tensão (Planilha do Excel).

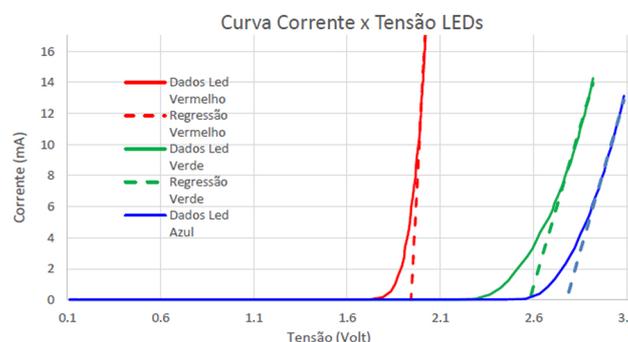


Figura 17: Curvas características de LEDs coloridos com regressões lineares obtidas com o auxílio do Excel.

Tabela 1: Parâmetros para o cálculo da constante de Planck.

Dist. da rede de difração para régua graduada	$x$	171	mm
Dist. máx.sec. vermelho	$y_{1vermelho}$	140	mm
Dist. máx.sec. verde	$y_{1verde}$	98	mm
Dist. máx.sec. azul	$y_{1azul}$	87	mm
Angulo teta vermelho	$\theta_{mvermelho}$	0,6889	rad
Angulo teta verde	$\theta_{mverde}$	0,5229	rad
Angulo teta azul	$\theta_{mazul}$	0,4730	rad
Carga do elétron	$e$	$1,602 \times 10^{-19}$	C
Período da Rede	$d$	$1,0 \times 10^{-6}$	m
Ordem da difração	$m$	1	
Velocidade da Luz	$c$	$3,0 \times 10^8$	m/s
Const.Planck-valor tabela	$h$	$6,626 \times 10^{-34}$	J.s

Um dos modelos (Figura 8) possui uma lente convergente entre o LED e a rede de difração, para colimar a radiação dispersa do LED. A vantagem da utilização do modelo de maquete mostrado na Figura 8 está em que não é necessário escurecer o ambiente para a visão do espectro da luz difratada projetado na régua graduada. O experimento realizado segue a crescente tendência de uso da plataforma Arduino na automatização dos experimentos de Física Geral por oferecer uma série de vantagens em relação a outros dispositivos devido ao seu ambiente de programação simples e claro, preços baixos e uma infinidade de placas de expansão. Assim, na maquete experimental automatizada, construída para a determinação da constante de Planck, temos sistemas eletrônicos e de software que a controlam atualizados.

A principal atualização no sistema de controle é a interface de comunicação com o computador através do protocolo USB. Ele é baseado no microcontrolador AT-MEL328 por meio da plataforma Arduino. É importante observar que essa plataforma é um projeto de circuito de código aberto, baseado em microcontrolador da indústria Atmel. Uma placa física em código aberto baseada em um circuito de entradas e saídas simples. A mesma já possui conversor analógico/digital. Assim, é possível gerenciar o controle da maquete automatizada usando a interface USB do computador, por meio de um dispositivo de baixo custo. A escolha do LED no experimento para a determinação da constante de Planck é interessante por-

que suas aplicações estão presentes em diversas esferas importantes da vida cotidiana. O mais importante, no entanto, é que o LED é uma ligação vital entre eletrônica e fotônica.

A automatização das medições e da elaboração dos dados dos experimentos de Física tem como objetivo, em primeiro lugar, garantir aos estudantes do Curso de Licenciatura em Física da UESB, modalidade a distância, o acesso aos laboratórios remotos de Física Geral via Internet, mas também a sua utilização pelos estudantes do curso presencial de Física, o que permite aos alunos complementar as aulas teóricas, aprofundar o conhecimento de métodos e técnicas do experimento, estudar aparelhos de pesquisa científica e a familiarização com os mesmos, dominar diferentes métodos de pesquisas experimentais, dominar métodos matemáticos e gráficos dos resultados obtidos e também a avaliação das medições realizadas.

## Referências

- [1] H.J. Round, *The Electrical World* **49**, 19 (1907).
- [2] *The Road to the Transistor*, disponível em: <https://www.jmargolin.com/history/trans.htm>, acessado em 04/05/2017.
- [3] O.V. Losev, *Philosophical Magazine* **5**, 39 (1928).
- [4] T.H. Lee, *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- [5] N. Zheludev, *Nature Photonics* **1**, 4 (2007).
- [6] O.V. Losev, *Physik. Zeitschr* **30**, (1929).
- [7] H. Júnior e N. Bevacqua, *Appl. Phys. Lett.* **1**, 4 (1962).
- [8] H. Wolinsky, *U. I.'s Holonyak out to take some of Ediso's luster*, (Chicago Sun-Times, Chicago, 2005).
- [9] T.P. Perry, *IEEE Spectrum* **32**, 2 (1995).
- [10] *Brief Biography Holonyak, Craford, Dupuis*, disponível em <https://www.simplyled.co.uk/blog/a-brief-history-of-the-led/>, acessado em 18/04/2019.
- [11] T.S.M. Pearsall, *Appl. Phys. Lett.* **28**, 9 (1976).
- [12] *The Nobel Prize in Physics 2014*, disponível em <https://kva.se/nobelphysics2014>.
- [13] D. Halliday, R. Resnick e K.S. Krane, *Física* (Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2004), v. 4.
- [14] S.L. de Moura, F.I da Silva, F.C.M. da Silva e J.A.V. dos Santos, *Química Nova na Escola* **33**, 4 (2011).
- [15] *Measuring the IV Curve of Semiconductors With an Aduino* disponível em <https://www.instructables.com/id/Measuring-the-IV-Curve-of-Semiconductors-With-an-A/>, acessado em 21/09/2018.
- [16] I.N. Oliveira, *Erros de medição das grandezas físicas e elaboração dos resultados do experimento* (Ed. UESB, Vitória da Conquista, 2018)
- [17] <https://www.youtube.com/watch?v=nJaQxY6y19Y>, acessado em 15/04/2018.

**Tabela 2:** Determinação da constante de Planck para o LED VERMELHO.

Valor da tensão limiar	$U_o$	1,893	Volt
Coeficiente angular da reta	$a$	225,47	
Coeficiente linear da reta	$b$	-426,77	
Const. de Planck determinada	$h'$	$6,425 \times 10^{-34}$	J.s
Erro Percentual	Erro %	2,939	%

**Tabela 3:** Determinação da constante de Planck para o LED VERDE.

Valor da tensão limiar	$U_o$	2,529	Volt
Coeficiente angular da reta	$a$	40,98	
Coeficiente linear da reta	$b$	-103,63	
Const. de Planck determinada	$h'$	$6,744 \times 10^{-34}$	J.s
Erro Percentual	Erro %	1,879	%

**Tabela 4:** Determinação da constante de Planck para o LED AZUL.

Valor da tensão limiar	$U_o$	2,724	Volt
Coeficiente angular da reta	$a$	41,66	
Coeficiente linear da reta	$b$	-113,57	
Const. de Planck determinada	$h'$	$6,633 \times 10^{-34}$	J.s
Erro Percentual	Erro %	0,192	%