

Estudo do efeito fotoelétrico com LEDs

Mariana Silva F. de B. Oliveira

G2, PL6 – lab. 124

27/10/2021

FCUP, Faculdade de Ciências do Porto

Sumário:

Com o objetivo de estudar o efeito fotoelétrico, usou-se diferentes LEDs para calcular os respetivos potenciais de paragem, pelo que obteve-se valores compreendidos entre 0,80V e 1,30V. Utilizando um condensador, calculou-se também um valor experimental para a constante de planck $h = (5,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ com incerteza relativa de 9% e erro de 20% associado e para a função trabalho $W = (1,4 \pm 0,2) \text{ eV}$ com incerteza relativa de 14%, o que é minimamente concordante com o esperado.

1- Introdução Teórica

O efeito fotoelétrico é um fenómeno que sustenta a física quântica, sendo definida como um processo de emissão de eletrões por uma superfície quando nela incide um feixe de luz, caracterizado por um conjunto de N fotões com energia dada por:

$$E = h \cdot f, \text{ onde } f = \frac{c}{\lambda}. \quad [1]$$

É de salientar que este processo só ocorre se a energia de cada fotão for superior à função trabalho, W , definida por:

$$W = h \cdot f_o \quad [2]$$

Este processo é caracterizado pelas seguintes curvas:

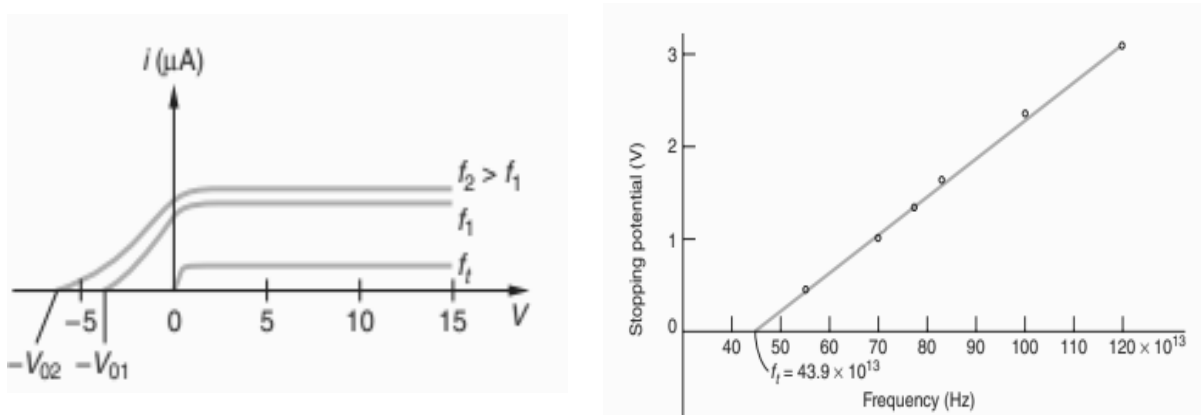


Figura 1. Gráficos do Efeito fotoelétrico. [1]

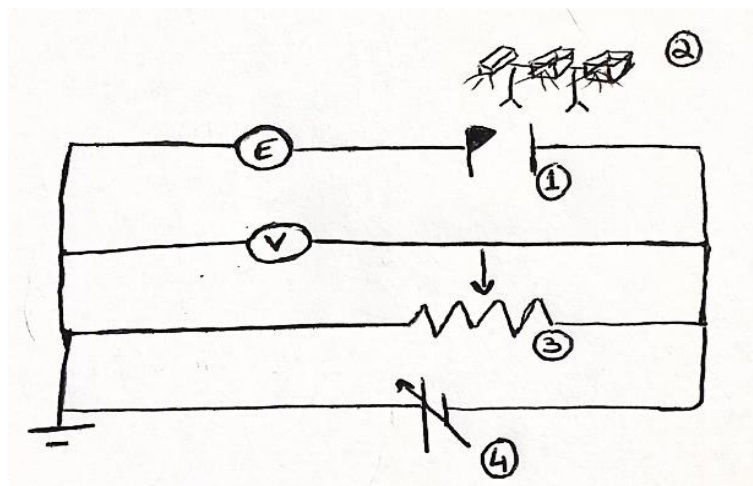
Em relação ao gráfico 1, quando a corrente se anula significa que os eletrões não atingem o ânodo, ou seja, não conseguem ultrapassar a barreira de potencial, sendo o valor de tensão associado denominado Potencial de paragem, V_o . Ao aumentar muito o potencial, a um dado ponto a corrente deixa de variar, atingindo um valor constante. Esta corrente de saturação significa que todos os eletrões emitidos atingem o ânodo.

No gráfico 2, tem-se a dependência linear do potencial de paragem em função da frequência, dada por:

$$V_o = \frac{h}{e} \cdot f - f_o \frac{h}{e} \quad [3]$$

2- Execução Experimental

Ao chegar ao laboratório, deve-se ligar os aparelhos de medida a utilizar para que estes estabilizem. De seguida, numa primeira parte, realizou-se a seguinte montagem:



Legenda:

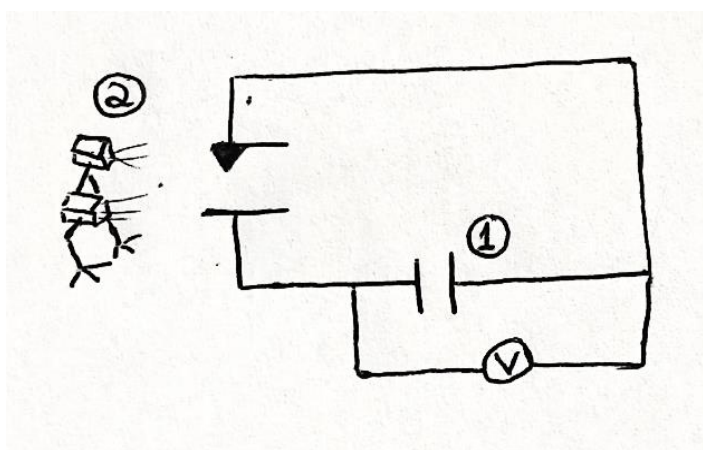
- ① - Célula Fotoelétrica
- ② - Conjunto de LEDs
- ③ - Reóstato
- ④ - Fonte de tensão variável
- E - Eletrômetro
- V - Voltímetro

Figura 2. Esquema da primeira montagem.

É de notar que a célula fotoelétrica e os LEDs devem estar totalmente isolados da luz ambiente (para que não influencie a captação do feixe de luz emitido por cada LED) e a distância dos LEDs à célula deve manter-se a mesma, ao longo de toda a experiência.

De seguida, para cada LED, variou-se a tensão, de forma a percorrer diferentes valores de corrente, até que esta fosse nula. Para ter maior controlo no valor de tensão, utilizou-se o reóstato, o que nos permite obter valores mais precisos em torno de $I = 0$. Assim, quer-se tornar o ânodo negativo em relação ao cátodo, de modo a zerar a corrente fotoelétrica.

De seguida, realizou-se a segunda montagem desta experiência, para obter o valor de h e W :



Legenda:

- ① - Condensador (100nF)
- ② - Conjunto de LEDs e a célula fotoelétrica
- V - Voltímetro

Figura 3. Esquema da segunda montagem.

Nesta parte, mediu-se a tensão nos terminais do condensador para cada LED para os quais têm um determinado comprimento de onda, λ . O objetivo será estudar a relação entre o potencial de paragem e a frequência, dada pela equação [3].

Nota sobre o Eletrómetro: Este é um aparelho capaz de medir correntes muito mais pequenas do que os amperímetros usuais. É importante ter bastante atenção a todas as suas funcionalidades antes de o usar. Na primeira montagem desta atividade experimental, como



Figura 4. O Eletrómetro.

será visto a seguir, em grande parte do tempo, não se teve em atenção a uma das suas funcionalidades- o sinal da corrente, rodeado na figura. Por outro lado, também é preciso ajustar o zero do aparelho, antes de começar a registar as medições.

Este é um aparelho muito sensível, por isso, todo o material de escrita e os respetivos experimentalistas devem estar longe do mesmo, pois pode influenciar a medida.

3. Resultados e Análise

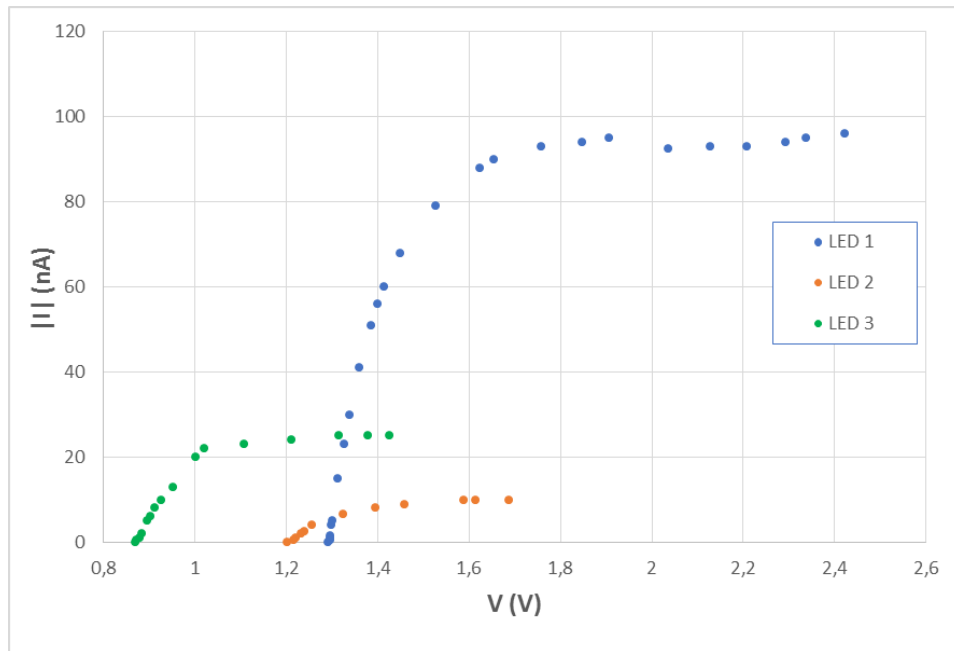
Os leds utilizados para as duas partes da experiência estão na tabela 1, com valores de comprimento de onda compreendidos entre 185nm e 650nm, pois a célula fotoelétrica só opera para essa gama. É de salientar que a largura de banda foi obtida através dos valores disponibilizados e respetiva análise do documento com os espectros dos leds.

Led	λ_{pico} (nm)	largura de banda, $\Delta\lambda$ (nm)
1	376,6	8,67
2	396,5	8,92
3	457,0	19,49
4	468,0	21,79
5	523,0	29,41
6	590,3	14,91

Tabela 1: leds utilizados em toda a experiência.

3.1- Obtenção do potencial de paragem, V_o :

Para a determinação do potencial de paragem dos diferentes LEDS, utilizou-se apenas os leds 1,2 e 3. Nesta atividade experimental, fez-se duas recolhas de dados para cada led, uma vez que na primeira recolha não se teve em atenção a opção “Polaridade” do electrómetro, representado na figura 4, e por isso apenas se registou pontos com corrente negativa. Assim, recorrendo à primeira recolha de dados, encontramos o perfil esperado para o gráfico da tensão em função da corrente:



**Gráfico 1: Perfil da curva $I(V)$ no efeito fotoelétrico.
(a corrente está em módulo)**

Tal como esperado, para valores mais altos de tensão, os LEDs atingem uma corrente de saturação, o que corresponde à passagem de todos os elétrons emitidos para o ânodo, enquanto que, quando a corrente se nula, nenhum elétron ultrapassa a diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo.

O gráfico seria invertido em relação ao esperado na Figura 1, uma vez que, pela montagem usada e respetiva ligação de cabos, o potencial negativo apresentava valor positivo no voltímetro e vice-versa. No entanto, representou-se a corrente em módulo de forma a simplificar análise.

Após a segunda recolha, que possui maioritariamente pontos em torno do potencial de paragem, obteve-se:

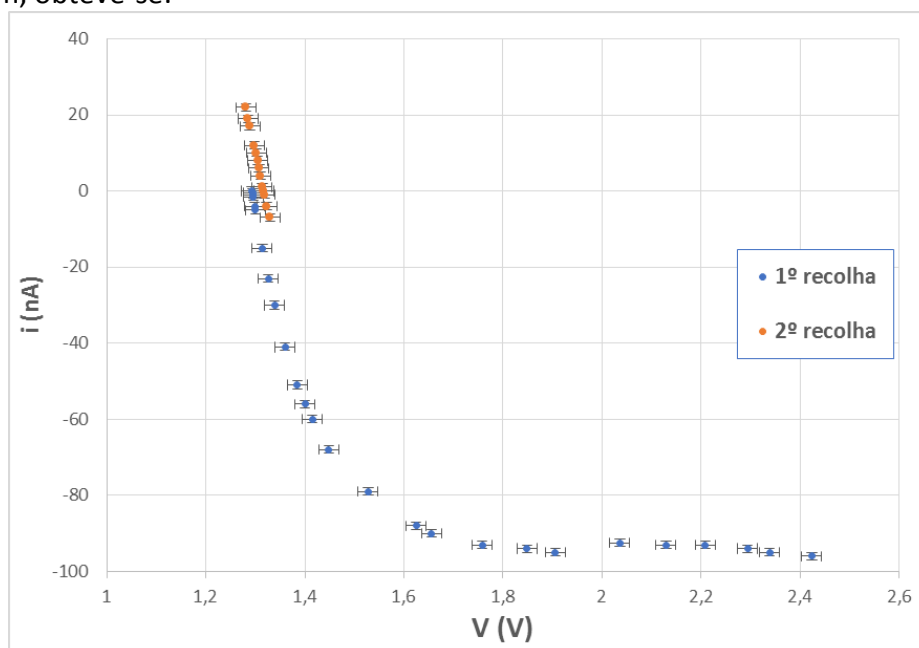


Gráfico 2: Perfil da curva $I(V)$ para LED1.

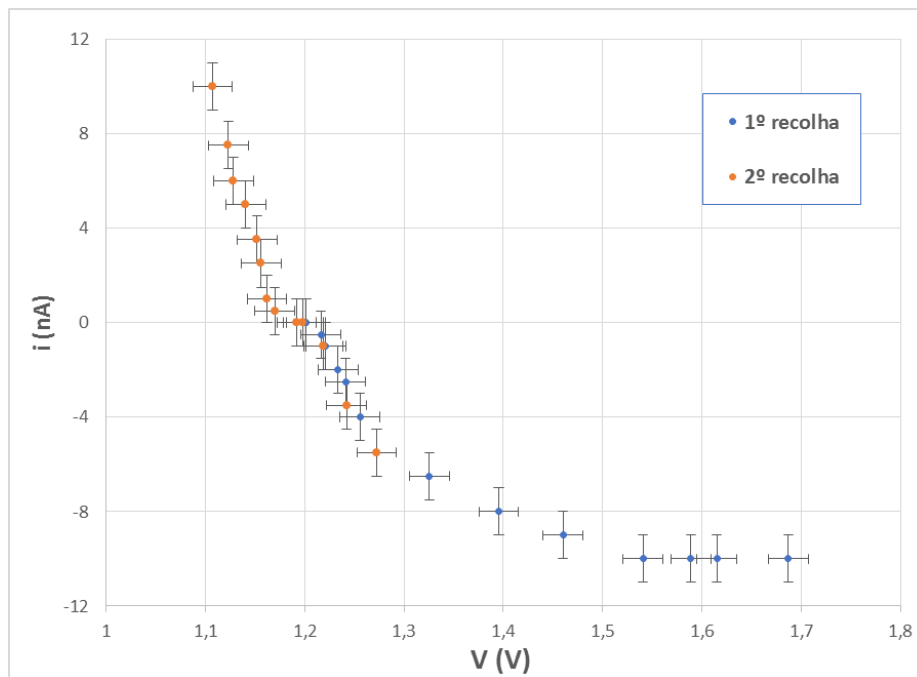


Gráfico 3: Perfil da curva I(V) para LED2.

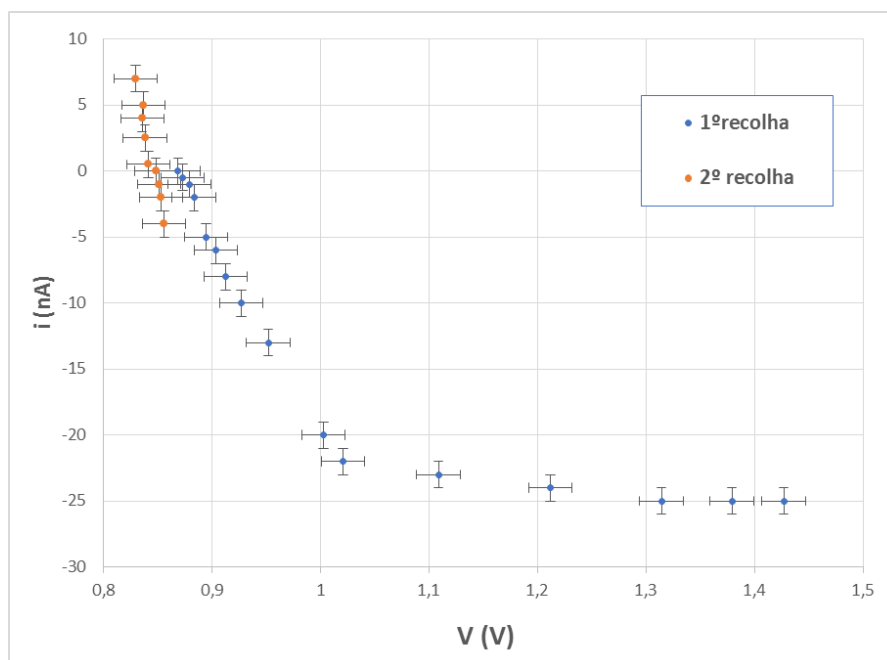


Gráfico 4: Perfil da curva I(V) para LED3.

Nota: o cálculo das barras de erro para estes gráficos está em anexo.

Comparando estes três gráficos, infere-se que o LED 2 apresenta a melhor concordância entre os valores retirados nas duas experiências. No entanto, para os outros dois leds, é bastante notório que os dados entre recolhas não se sobrepõem. Isto pode estar relacionado com alterações entre as duas experiências, tais como, a mudança da opção de obtenção de dados no electrómetro – figura 4 – do modo “Slow” para o “Fast”, ou a possível alteração do zero desse aparelho.

Por outro lado, também a distância de cada LED à célula fotoelétrica pode ter variado entre as recolhas, o que altera a corrente medida pelo electrómetro para um mesmo valor de potencial.

Assim, para calcular o potencial de paragem de cada LED será feita uma média dos potenciais a que corresponde um valor de corrente nula. É de salientar que serão usados os valores de ambas as recolhas.

Em relação ao LED 1, obteve-se:

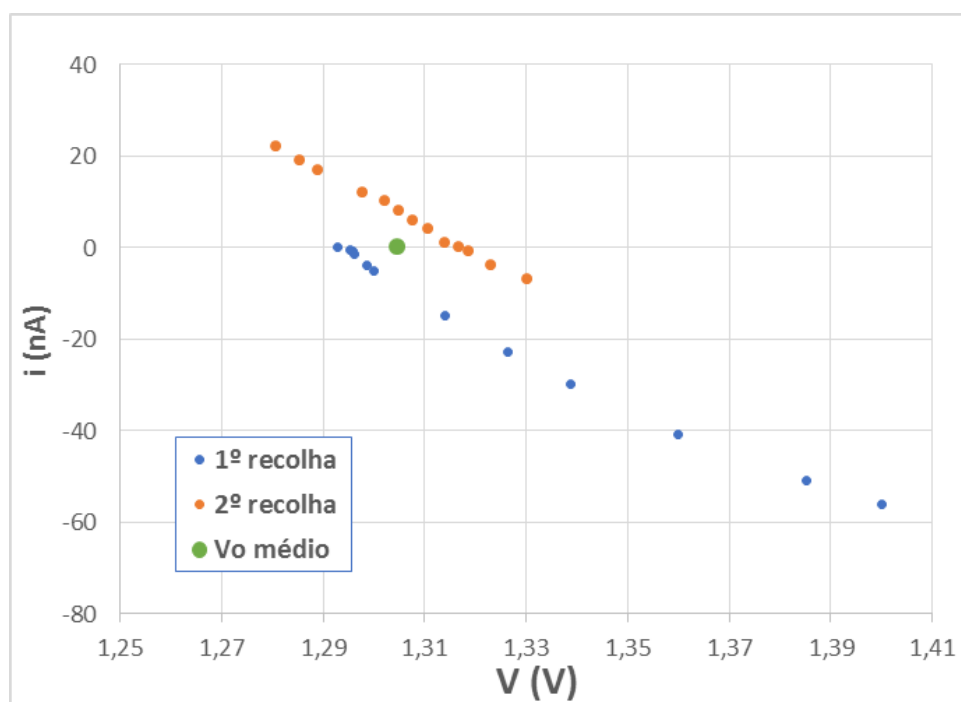


Gráfico 5: Perfil da curva I(V) ampliado para LED1.

É evidente que os dados entre a primeira e segunda recolha distam de aproximadamente 0,02V, o que evidencia que o problema mais provável terá sido ou a alteração do zero, ou a alteração da distância do LED à célula fotoelétrica.

Neste caso, obteve-se um valor médio para o potencial de paragem do LED 1 de:

$$V_o = (1,30 \pm 0,01) \text{ V}$$

Por outro lado, observando o gráfico 5, infere-se que os dados experimentais seguem um perfil linear para ambas as experiências. Por isso, se a metodologia tivesse sido realizada corretamente logo no primeiro ensaio, o valor de V_o iria ser calculado recorrendo a um ajuste linear. No entanto, neste caso, não faz sentido pois os pontos entre recolhas cruzam o eixo das abcissas em potenciais notavelmente diferentes, daí a escolha em realizar a média.

Para o LED 2:

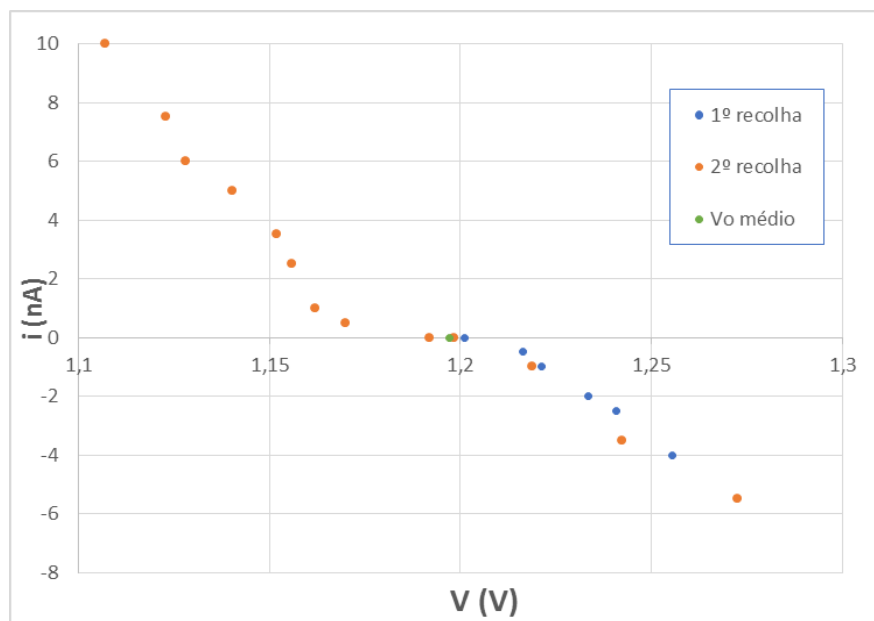


Gráfico 6: Perfil da curva I(V) ampliado para LED2.

Os valores entre recolhas estão sobrepostos, sendo apenas possível perceber que distam de, aproximadamente, 0,0009 V pelas tabelas de dados que estão nos anexos.

O valor experimental para potencial de paragem associado ao LED 2 foi de:

$$V_o = (1,197 \pm 0,003) \text{ V}$$

Por fim, para o LED 3:

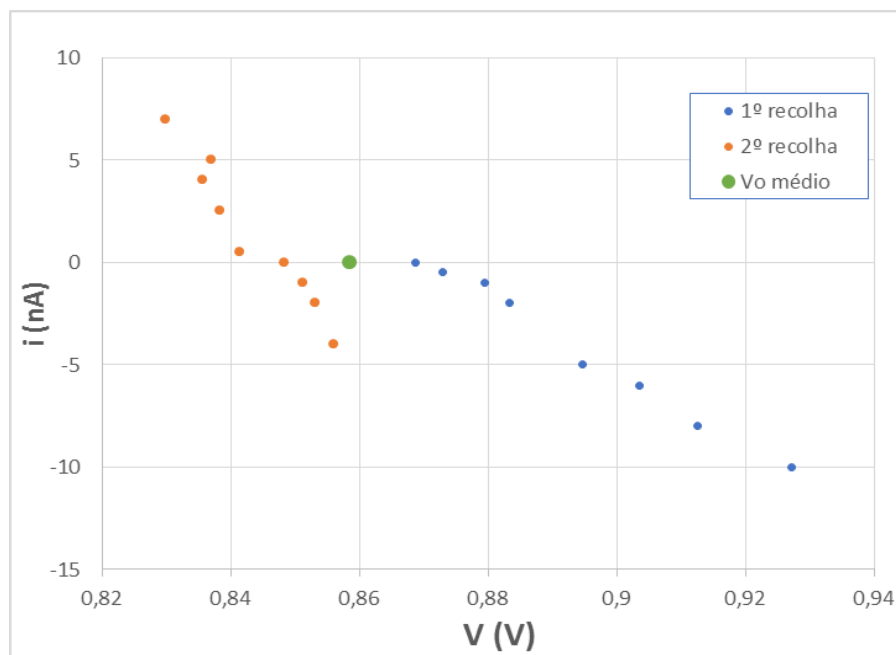


Gráfico 7: Perfil da curva I(V) ampliado para LED3.

Apesar de haver poucos valores entre recolhas para os mesmos valores de corrente, percebe-se que a segunda recolha tem um perfil idêntico à primeira, seguida de uma translação de aproximadamente 0,02V, tal como no LED 1. Obteve-se:

$$V_o = (0,86 \pm 0,01) \text{ V}$$

3.2- Determinação da constante de planck, h, e da função trabalho, W:

Seguindo o procedimento indicado, registou-se o potencial no condensador para cada LED da tabela 1, correspondendo ao potencial de paragem de cada um deles. Obteve-se:

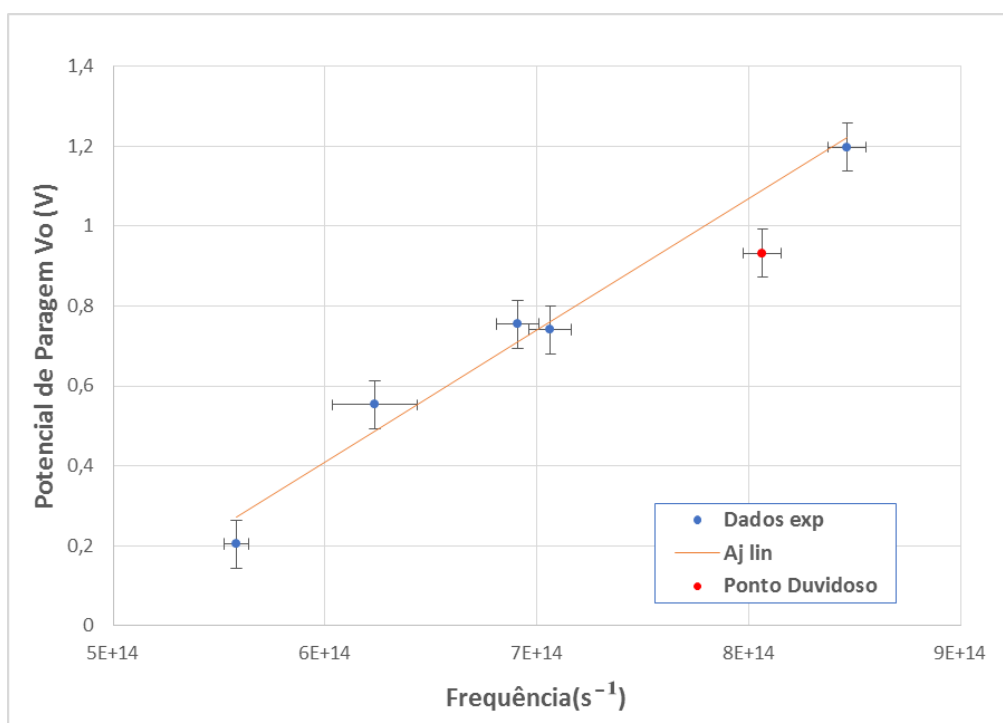


Gráfico 8: Potencial no condensador em função da frequência de cada LED.

Matriz de ajuste			
m	3,3E-15	-1,4	b
sm	3E-16	0,2	sb
r ²	0,98	0,06	sy

Tabela 2. Matriz de ajuste do gráfico 8.

O potencial nos terminais do condensador corresponde ao potencial de paragem de cada LED, já que, para cada um desses valores de V, o condensador deixa de ser capaz de fornecer aos eletrões a energia necessária para que ultrapassem a barreira de potencial, ou seja, a corrente é nula, tal como observado na primeira parte deste trabalho.

Para um LED, apesar de lhe estar associado um único comprimento de onda na tabela 1, sabe-se que este varia o seu comprimento de onda numa gama de valores – o que dá origem ao espectro do LED. No entanto, como a largura de banda, $\Delta\lambda$, dos LEDs utilizados é relativamente estreita, para calcular a frequência do gráfico acima, usou-se o comprimento de onda de pico, uma vez que é o valor mais provável.

(ver incerteza associada a esta suposição em anexos)

Recorrendo à equação [3], conclui-se que o declive da reta de ajuste do gráfico 8 é dado por $m = \frac{h}{e}$. Seja a carga do eletrão dada por $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$, obtém-se:

$$h = (5,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

Por outro lado, pela equação [2], para obter um valor experimental da função trabalho, vamos calcular a frequência limiar, f_0 , correspondente ao ponto do gráfico para o qual o potencial se anula. Logo, obteve-se:

$$f_0 = -\frac{b}{m} \rightarrow f_0 = (43,0 \pm 0,7) \cdot 10^{13} s^{-1}$$

Por fim, o valor experimental da função trabalho é:

$$W = (2,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-19} J$$

Como $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} J$,

$$W = (1,4 \pm 0,2) \text{ eV}$$

Como a constante de planck foi obtida através do declive da reta de ajuste, o valor experimental está diretamente relacionado com a qualidade do ajuste e da experiência, ou seja, o valor h depende dos erros experimentais.

Por outro lado, o valor da frequência limiar depende da ordenada na origem, valor que num ajuste linear contém todos os erros sistemáticos possíveis. Logo, f_0 e, consequentemente, a função trabalho dependem também deste tipo de erros. Assim, seria interessante ter um valor de referência para a função trabalho para comparar se este teria um valor menos exato que o da constante de planck.

4- Resultados Finais e Conclusões

Led	V_0 (V)	λ_{pico} (nm)	$u(V_0)$ (%)
1	$1,30 \pm 0,01$	376,6	0,7
2	$1,197 \pm 0,003$	396,5	0,3
3	$0,86 \pm 0,01$	457,0	1

Tabela 3. Resultados para os potenciais de paragem.

Pelo gráfico teórico da figura 1 a), a uma frequência mais elevada corresponde um potencial de paragem maior, em módulo. Assim, os resultados obtidos estão de acordo com o esperado já que, para um maior comprimento de onda (inversamente proporcional a f) obtém-se um menor potencial de paragem, em módulo.

Grandeza	Valor	u(valor) (%)	Valor tabelado	Erro (%)
Constante Planck, h (J·s)	$(5,3 \pm 0,5) \text{ E-34}$	9	6,6E-34	20
Função Trabalho, W (eV)	$(1,4 \pm 0,2)$	14	-----	-----

Tabela 4. Resultados para constante de planck e função trabalho.

Apesar de não haver um valor tabelado para o potencial de paragem de cada LED, como os valores obtidos para o potencial no condensador são muito semelhantes à média realizada em cada LED na seção 3.1, infere-se que os resultados são coerentes e próximos do esperado, pois os resultados obtidos na seção 3.2 parecem ser fiáveis, uma vez que a constante de planck tem associado um erro consideravelmente aceitável – 20% pela tabela acima.

Em conclusão, como os erros associados às três grandezas experimentais (indicadas nas tabelas acima) possuem erros relativos (e incertezas relativas) razoavelmente baixos, concluímos que os objetivos foram cumpridos com sucesso.

5-Referências

- [1]. Paul Tipler and Ralph Llewellyn, Modern Physics, Cap 3.3
[2]. Protocolo de Laboratório de Física III: Quantum de luz e efeito fotoelétrico.

6-Anexos

A- Barras de erro dos gráficos 2,3 e 4:

- 1) A incerteza associada ao eletrômetro é $u = 0,5 \text{ nA}$. No entanto, durante a experiência notamos que, como o eletrômetro era muito sensível, por vezes, ao colocar o braço pousado próximo do circuito, o eletrômetro media essa interação com a montagem. Como essa variação era de aproximadamente 1 nA , considerou-se $u(I) = 1 \text{ nA}$, apesar de tentar impedir este erro experimental. No entanto, nesta incerteza está também incluída a possível captação de luz exterior e respetivo ruído elétrico. Em conclusão, $u(I) = 1 \text{ nA}$.
- 2) Associado ao valor de tensão, verificou-se a tal discrepância entre os valores das duas recolhas. Seja a incerteza associada ao voltímetro utilizado de $0,0001 \text{ V}$, se a diferença de dados for maior que este valor, então prevalece à incerteza do aparelho. Logo:
 - i) Led 1: $u(V) = 0,02 \text{ V}$
 - ii) Led 2: $u(V) = 0,00009 \text{ V}$
 - iii) Led 3: $u(V) = 0,02 \text{ V}$

Logo, nos gráficos 2,3 e 4 as barras de erro verticais têm valor constante de 1 nA , enquanto que as barras de erro horizontais variam consoante o Led e respetiva $u(V)$.

B- Incertezas associadas aos valores experimentais

→ Para calcular os valores médios dos potenciais de paragem:

$$u(V_0) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_0 - V_{\text{medio}})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

→ Incerteza associada à frequência:

Como se assumiu que os LEDs possuíam apenas um comprimento de onda (o λ_{pico}), associa-se um erro a esta suposição. Pelo gráfico dos espectros disponível no protocolo, os LEDs têm vários valores prováveis de comprimento de onda, tanto que alguns espectros até se sobrepõem. Desta forma, ao comprimento de onda associou-se uma incerteza na gama da sua largura de banda, uma vez que são os valores mais prováveis.

$$u(\lambda) = \frac{\Delta L}{2}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow u(f) = \sqrt{\left[\frac{df}{d\lambda}\right]^2} \approx 10^{12} s^{-1}$$

Logo, no gráfico 8, a barra de erro horizontal corresponde a este valor, $u(f)$. A barra de erro vertical é dada por $u_{ajuste} = 2 \cdot s_y$.

→ Para o cálculo da constante de Planck, h :

$$h = m \cdot e \rightarrow u(h) = u(m) \cdot e$$

Como $u(m) = s_m$, então $u(h) = s_m \cdot e$

$$\frac{u(h)}{h} \cdot 100 = 9\% \quad \varepsilon = \frac{(6,6-5,3)}{6,6} \cdot 100 = 20\%$$

→ Para o cálculo da frequência limiar f_o :

$$f_o = -\frac{b}{m} \rightarrow u(f) = \sqrt{\left[\frac{df_o}{dm}\right]^2 \cdot u(m)^2 + \left[\frac{df_o}{db}\right]^2 \cdot u(b)^2}$$

$$\frac{u(f_o)}{f_o} \cdot 100 = 16\%$$

→ Para o cálculo da função trabalho, W :

$$W = h \cdot f_o \rightarrow u(f) = \sqrt{\left[\frac{dW}{df_o}\right]^2 \cdot u(f_o)^2 + \left[\frac{dW}{dh}\right]^2 \cdot u(h)^2}$$

$$\frac{u(W)}{W} \cdot 100 = 18\%$$

C- Medições diretas

LED 1			
1.ª recolha		2.ª recolha	
I ± 0,5 (nA)	V ± 0,0001 (V)	I ± 0,5 (nA)	V ± 0,0001 (V)
-96,0	2,4232	1,0	1,3139
-95,0	2,3385	4,0	1,3107
-94,0	2,2936	6,0	1,3077
-93,0	2,2087	8,0	1,3049
-93,0	2,1291	10,0	1,3022
-92,5	2,0359	12,0	1,2978
-79,0	1,5277	17,0	1,2890
-68,0	1,4486	19,0	1,2855
-60,0	1,4152	22,0	1,2808
-56,0	1,4001	0,0	1,3168
-51,0	1,3851	-1,0	1,3188
-41,0	1,3599	-4,0	1,3230
-30,0	1,3388	-7,0	1,3301
-23,0	1,3263		
-15,0	1,3139		
-5,0	1,3001		
-1,0	1,2958		
0,0	1,2928		
-0,5	1,2953		
-1,5	1,2961		
-4,0	1,2986		
-88,0	1,6249		
-90,0	1,6556		
-93,0	1,7579		
-94,0	1,8485		
-95,0	1,9059		

LED 2			
1.ª recolha		2.ª recolha	
I ± 0,5 (nA)	V ± 0,0001 (V)	I ± 0,5 (nA)	V ± 0,0001 (V)
-10,0	1,6872	10,0	1,1070
-9,0	1,4600	7,5	1,1230
-8,0	1,3955	6,0	1,1281
-6,5	1,3254	5,0	1,1404
-4,0	1,2554	3,5	1,1520
-2,5	1,2409	2,5	1,1559
-2,0	1,2336	1,0	1,1620
-1,0	1,2212	0,0	1,1919
-0,5	1,2164	0,0	1,1983
0,0	1,2010	0,5	1,1699
-10,0	1,6151	-1,0	1,2187
-10,0	1,5891	-3,5	1,2422
-10,0	1,5408	-5,5	1,2725

LED 3			
1.ª recolha		2.ª recolha	
I ± 0,5 (nA)	V ± 0,00001 (V)	I ± 0,5 (nA)	V ± 0,0001 (V)
-13,0	0,95189	5	0,83698
-10,0	0,92705	7	0,82982
-8,0	0,91260	4	0,83573
-6,0	0,90353	2,5	0,83839
-5,0	0,89463	0,5	0,84133
-2,0	0,88330	0	0,84841
-1,0	0,87938	-1	0,85127
-0,5	0,87303	-2	0,85322
0,0	0,86877	-4	0,85601
-23,0	1,10864		
-24,0	1,21200		
-25,0	1,31430		
-25,0	1,37910		
-25,0	1,42690		
-22,0	1,02070		
-20,0	1,00258		

Tabelas das medições da 1ª parte da experiência.

LED	Comp. Onda (m)	Frequência (s*(-1))	Pot. Paragem (V)
1	3,766E-07	796601168348380	1,197
2	3,965E-07	756620428751576	0,932
3	0,00000046	656455142231947	0,741
4	0,00000047	641025641025641	0,755
5	0,00000052	573613766730401	0,553
6	0,00000059	508216161273928	0,205

Tabela das medições da 2ª parte da experiencia.