

Efeito fotoelétrico

Inês Pascoal Nogueira
Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

27 de dezembro de 2021*

Resumo

Neste trabalho estuda-se o efeito fotoelétrico, tendo sido calculados os valores da constante de Planck - $h_{exp} = (5.5 \pm 0.7) \times 10^{-34}$ com um erro percentual de 17% e do trabalho de extração do eletrão para a liga de Césio-Antimónio - $W_{exp} = (2.40 \pm 0.04) \times 10^{-19}$ com um erro de 10% através da dependência entre o potencial de paragem e a frequência dos LEDs utilizados, da qual verificámos ainda que o valor do potencial de paragem em módulo aumenta quando se aumenta a frequência da radiação emitida.

1 Introdução

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de eletrões por uma superfície (normalmente, um metal) quando nela incide radiação eletromagnética de frequência f .

Assim, ao fazer incidir radiação eletromagnética, cada fotão (de energia hf) é integralmente absorvido por um eletrão do metal. Caso a energia do fotão seja igual ou superior à energia de ligação do eletrão (W), este é libertado.

Daqui retira-se a condição para a existência de efeito fotoelétrico:

$$hf \geq W \quad (1)$$

onde $h \equiv$ constante de Planck

É possível esquematizar este conceito da seguinte forma:

$$\gamma + e_{ligado}^- \rightarrow e_{livre}^-, \quad se \quad hf \geq W \quad (2)$$

onde $\gamma \equiv$ fotão e $e^- \equiv$ eletrão

*Experiência realizada no dia 29 de novembro com a colega Marta Silva no âmbito da UC de Laboratório de Física III

Quando a energia do fóton é superior à energia de ligação do eletrão, esse excesso de energia aparece sob a forma de energia cinética do eletrão libertado:

$$hf - W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

onde v e m são a velocidade e a massa do eletrão, respetivamente.

Os eletrões que são emitidos pelo cátodo são recolhidos num elétrodo coletor, o que dá origem, num circuito exterior, a uma corrente elétrica, I , que geralmente é muito baixa.

Se colocarmos o coletor a um potencial negativo relativamente ao emissor (potencial retardador), menos eletrões chegarão ao coletor, reduzindo o valor da corrente I .

Daqui é fácil perceber que há um potencial para o qual a corrente será nula, isto é, não há eletrões a chegar ao coletor. A esse potencial chama-se potencial de paragem, V_C , que, através da conservação de energia, podemos relacionar com a expressão anterior da seguinte forma:

$$eV_C = \frac{1}{2}mv^2 = hf - W \quad (4)$$

Assim, podemos determinar a constante de Planck, h , e o trabalho de extração característico do metal, W , através do estudo do potencial de paragem, V_C , em função da frequência da radiação, f .

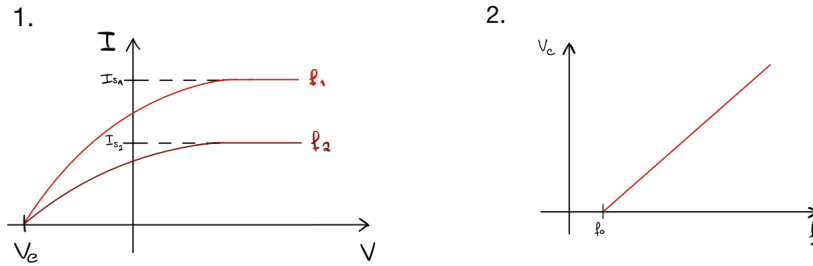


Figura 1: 1 - Gráfico $I(V)$; 2 - Gráfico $V_C(f)$

Na Figura 1, temos a ilustração deste fenómeno.

Por um lado, a corrente anula-se a um potencial V_C o que significa que os eletrões libertados não chegam ao ânodo. Por outro, verifica-se que a corrente vai saturar, ou seja, por mais que se aumente o potencial, todos os eletrões emitidos chegam ao ânodo. E esse valor de corrente saturada, depende da frequência da radiação emitida.

Na Figura 1.2, vemos que quando V_C aumenta, a frequência, f , também aumenta e que há uma frequência mínima para a existência de efeito fotoelétrico, f_0 . Ter em conta que nesta representação assume-se o módulo do potencial de paragem.

2 Experiência

Neste trabalho experimental, o potencial de paragem foi obtido a partir de duas abordagens:

- Parte A - através da determinação do potencial que anula a corrente fotoelétrica no circuito
- Parte B - transferindo a energia da corrente fotoelétrica para um condensador em série com a célula fotoelétrica e determinando o valor de tensão nos terminais do condensador.

2.1 Equipamento e Montagem Experimental

Nesta experiência foram utilizados os seguintes materiais:

- Caixa de LEDs
- Célula fotoelétrica (Phywe PhotoCell - 06779-00)
- Eletrômetro (Philips PM2436)
- Voltímetro (Agilent - 34405A)
- Reóstato
- Fonte de tensão variável ($0 - 5V$)
- Condensador ($96 \pm 1nF$)

Neste trabalho, utilizou-se um suporte com 8 LEDs e uma célula fotoelétrica isolados da luz ambiente para que esta não interfira com a célula. Para isso, o conjunto foi colocado dentro de uma caixa isoladora tapado com um pano de tecido preto.

Para medir a corrente I , o cátodo da célula foi ligado ao eletrômetro. Ligou-se o reóstato de acordo com a montagem da Figura 2 - Parte A, de modo a variar a resistência e, por consequência, variar a diferença de potencial no cátodo.

Para a segunda parte do trabalho, utilizou-se um voltímetro ligado a um condensador (para medir a diferença de potencial no mesmo) que estava ligado em série à célula fotoelétrica.

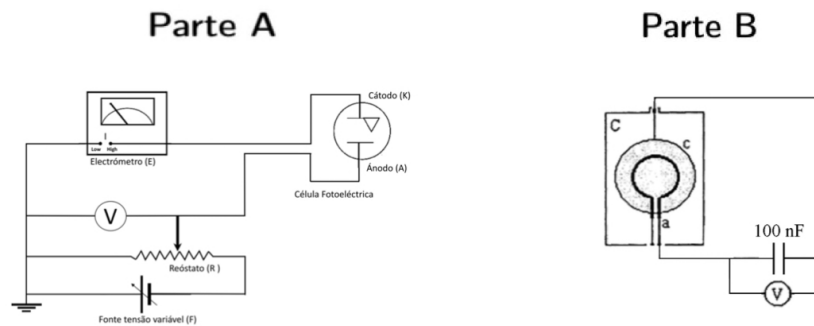


Figura 2: Esquema da montagem experimental para a Parte A e B, respetivamente. Fonte: [1]

2.2 Procedimento Experimental

Primeiramente, foi montado o circuito da Figura 2 - Parte A. Posicionou-se o LED 1 junto à célula fotoelétrica e garantiu-se que o conjunto estava isolado da luz ambiente. Escolheu-se a escala mais precisa do eletrômetro que permitia a recolha dos dados pretendidos (μA) e posteriormente variou-se a resistência do reóstato, para obter os pares de (V, I) até que a corrente se anulasse. Repetiu-se o procedimento para os restantes LEDs. Para isso, foi necessário rodar o botão seletor e reposicionar a estrutura com os LEDs de modo que o LED acesso ficasse centrado e mais próximo possível da célula fotoelétrica para maximizar o número de fótons emitidos que chegam à célula fotoelétrica.

Nota: a numeração dos LEDs (1, 2, 3, ...) é coincidente com o documento facultado no Moodle onde são indicados os comprimentos de onda de cada um e que se encontra em Anexo A.5.

Na parte B, montou-se o circuito da Figura 2 - Parte B e recolheram-se as medidas de potencial nos terminais do condensador para todos os LEDs. Ao trocar de LED, fez-se sempre curto circuito no condensador para garantir que este estava descarregado, para que não houvesse energia acumulada. Como usámos primeiro LEDs com maior frequência e estes vão ter um potencial maior associado, convém fazer este processo de descarga do condensador.

Foi sempre garantido que o conjuntos célula fotoelétrica-LED estava isolada da luz ambiente.

2.3 Análise Experimental

Devido a um problema no computador onde foram guardados os dados obtidos aquando a realização da experiência, perdemos esses mesmos dados. Por isso, pedimos a um colega - Bruno Fernandes, PL4 - para utilizar os dados por ele obtidos. Assim, o procedimento experimental descrito foi o que o meu grupo fez. No entanto, o meu colega, na observação da variação da corrente com o potencial, regulou a fonte de tensão. Porém, durante a realização da nossa experiência, verificámos que por este método não tínhamos tanta sensibilidade para variar a corrente, como tínhamos se variássemos a resistência no reóstato. Assim, teria sido melhor se tivessem utilizado o segundo método.

O meu colega, tirou dados para os LEDs 2, 3, 5 e 6. Apesar da escolha ser boa, penso que podia ter utilizado mais LEDs com comprimentos de onda mais distribuídos, inclusive tendo em conta que a sensibilidade da célula (composta por uma liga de Césio-Antimónio - Sb-Cs) é máxima na gama de $250 - 400nm$ (Figura 11. Por exemplo, podiam ter utilizado a mais os LEDs 1, por estar na gama de comprimentos de onda máximos, e 8, por ser um comprimento de onda maior.

Primeiro, apresenta-se a Tabela 1 com os valores de comprimento de onda dos LEDs disponíveis, retirados do documento que se encontra em Anexo A.5, e respetiva frequência, calculada através da seguinte expressão - $f = \frac{c}{\lambda}$, onde $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$.

Todos os cálculos das incertezas encontram-se no Anexo A.2.

	λ (nm)	$u(\lambda)$ (nm)	$f \times 10^{14}$ (Hz)	$u(f) \times 10^{14}$ (Hz)
LED 1	377	5	8,0	0,1
LED 2	397	7	7,6	0,1
LED 3	4,6E+02	1E+01	6,6	0,1
LED 4	4,7E+02	1E+01	6,4	0,1
LED 5	5,2E+02	1E+01	5,7	0,2
LED 6	590	5	5,08	0,04
LED 7	611	2	4,91	0,02
LED 8	647	9	4,63	0,07

Tabela 1: Comprimentos de onda dos 8 LEDs disponíveis e respetiva frequência

2.3.1 Determinação de V_C

Da parte A da experiência, fez-se um gráfico $I(V)$. De notar que foram tirados dados na zona em que os potenciais são próximos do potencial de paragem. Nesta gama iremos considerar que há uma relação de proporcionalidade direta entre a corrente e potencial. Assim, é possível obter o potencial de paragem, V_C , através de um ajuste linear:

$$I = mV + b \quad (5)$$

Onde V_C se obtém quando a corrente se anula ($I = 0$), logo concluímos o seguinte:

$$V_C = -\frac{b}{m} \quad (6)$$

Todos os gráficos de resíduos e tabelas com os parâmetros de ajuste encontram-se em Anexo A.1. Todos os ajustes foram feitos tendo em conta os gráficos de resíduos, os quais apresentam uma distribuição aleatória em torno de zero e cujo módulo do valor máximo obtido é menor do que $2s(y)$, onde $s(y)$ é conseguido pelos ajustes lineares, tendo assim um intervalo de confiança de 95%.

De referir que durante a experiência foi notória a existência de oscilações no valor do potencial quando a corrente tinha valores baixos, assim, a incerteza que foi considerada para essa medição não foi a menor divisão da escala. Foi escolhida de acordo com a oscilação observada.

Para as barras de erro dos valores de corrente foi utilizado o valor de $2s(y)$.

De seguida são apresentados os vários ajustes feitos ao gráfico $I(V)$ para os 4 LEDs escolhidos, com as respetivas barras de erro (quando estas não são representadas, significa que não eram visíveis).

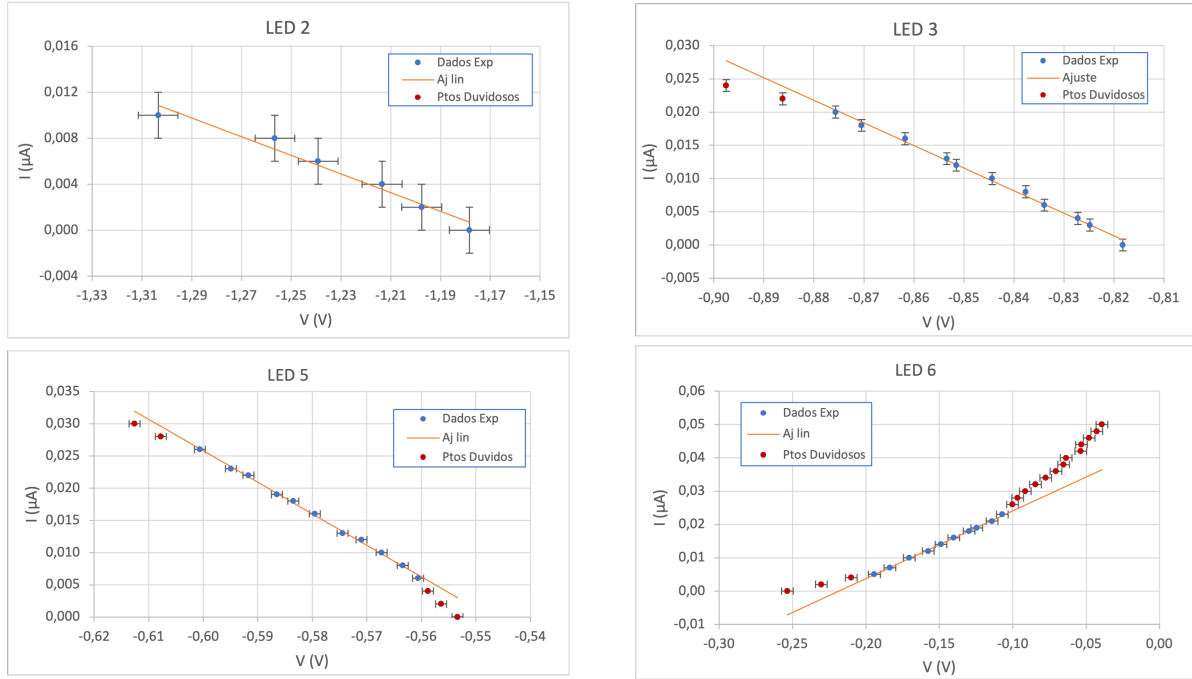


Figura 3: Gráficos $I(V)$ com respetivos ajustes e barras de erro

Não foram incluídos os pontos duvidosos do gráfico $I(V_C)$ do LED 2, porque estes afastam-se muito do ajuste e a zona em estudo não era perceptível.

O eletrómetro apenas mostrava valores de corrente positivos, no entanto, os declives das retas dos 3 primeiros gráficos apresentados serem negativos indica-nos que a polaridade é oposta ao esperado. Isto significa que os potenciais que estavam a medir já era abaixo do valor do potencial de paragem, ou seja, o potencial retardador era tão elevado (em módulo) que os eletrões não só não conseguiam alcançar o ânodo, como se começavam a mover em sentido oposto, em direção ao cátodo, sendo detetados no circuito perto deste, gerando uma corrente em sentido oposto.

Apesar disto, os valores de V_C obtidos foram similares aos obtidos por outros grupos e, como iremos ver, obtiveram-se resultados razoáveis para os valores de h e W . Por isso, fez-se o estudo com estes dados.

Com recurso à Eq. 6, foram calculados os valores do potencial de paragem para cada LED. Onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 2.

	V_c (V)	$u(V_c)$ (V)
LED 2	-1,2	0,2
LED 3	-0,82	0,03
LED 5	-0,55	0,01
LED 6	-0,22	0,003

Tabela 2: Valores de V_C obtidos através do ajuste ao gráfico $I(V)$

Na Parte B do trabalho experimental, foram obtidos valores de V_C por leitura direta da diferença de potencial de um condensador. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.

	V_c (V) $\pm 0,03$
LED 1	-1,16
LED 2	-0,94
LED 3	-0,73
LED 4	-0,74
LED 5	-0,51
LED 6	-0,14
LED 7	-0,18
LED 8	-0,12

Tabela 3: Valores de V_C com recurso ao condensador (Parte B)

Podemos verificar que V_C diminuiu (em módulo) com a diminuição da frequência da radiação emitida. O que, com base na Equação 4, era esperado.

2.3.2 Determinação de h e W

As constantes pretendidas foram obtidas com dois dados: os valores de V_C obtidos na Parte A da experiência - calculados através do ajuste linear ao gráfico $I(V)$ e os que foram obtidos na Parte B - medidos diretamente com recurso ao condensador.

Em ambos os casos, foi feito um ajuste ao gráfico $V_C(f)$, donde retirámos o valor de h e de W através da Eq. 4. Os gráficos com os ajustes encontram-se na Figura 6.

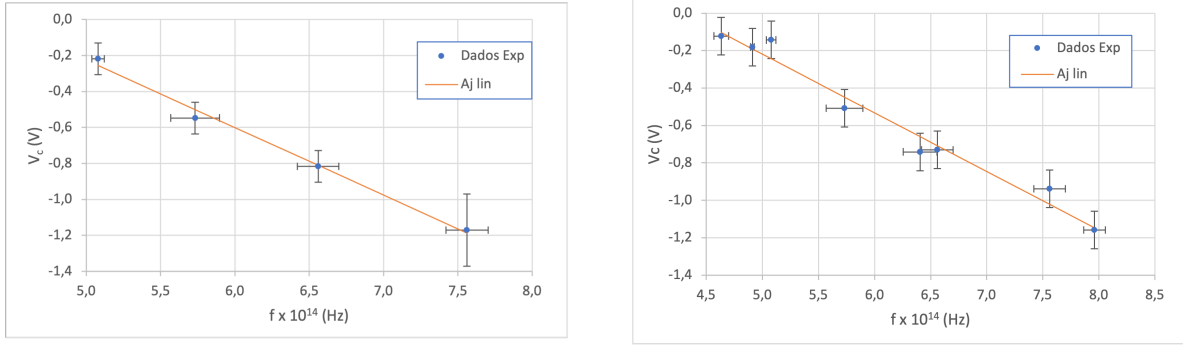


Figura 4: Gráficos $V_C(f)$ com os valores de V_C obtidos na Parte A e na Parte B, respetivamente

Neste caso, as barras de erro para o potencial na Parte A, são o valor absoluto máximo entre a incerteza calculada pela propagação de incertezas e a obtida pelo ajuste linear. Na parte B, são o valor absoluto máximo entre a incerteza de medida e a obtida pelo ajuste linear. Para a frequência foi utilizada a incerteza calculada (Tabela 1).

O ajuste feito com os últimos dados (por leitura direta de V_C) não parece tão adequado, visto que obtivemos um $r^2 = 0,97$ (Anexo A.1).

Durante a experiência observámos que o valor do potencial de paragem dependia significativamente com a distância do LED à célula fotoelétrica. Não sendo algo, em primeira análise, expectável.

Segundo a teoria corpuscular da luz, a alteração da distância altera apenas o número de fótons que atingem o cátodo, ou seja, influencia a intensidade da radiação que chega à célula. Como consequência, menos eletrões serão libertados, logo o valor da corrente sofrerá também alterações.

No entanto, pela Equação 4 vemos que o valor do potencial de paragem depende apenas da energia dos fótons ou, mais especificamente, da frequência da radiação emitida. Não sendo, por isso, esperado a tal variação do valor quando se alterava a distância do LED à célula.

Por outro lado, estamos a utilizar um condensador e penso que esta dependência pode estar relacionada com a carga do mesmo. Quando se afasta o LED da célula, já percebemos que o número de eletrões que chega ao circuito é menor, isto vai fazer com que o condensador carregue mais lentamente e enquanto isso, pode ir deixando eletrões passar para o resto do circuito o que faz com que o estado de equilíbrio que ele atinge não seja o real, o que leva a que o valor de diferença de potencial medido seja menor que o valor esperado. E, de facto, verificamos que os valores obtidos por este método são menores (em módulo) do que os obtidos através da definição de potencial de paragem (na parte A).

Apesar do esforço para manter os LEDs sempre à mesma distância da célula fotoelétrica é difícil garantir que isto acontece, logo iremos assumir que o erro vem da carga do condensador.

Através da Equação 4 e do ajuste linear feito, foram calculados h e W :

$$h = m \cdot e \quad \text{e} \quad W = -b \cdot e$$

com $e = -1,602 \times 10^{-19}$

Foram tomados os valores de referência - $h_{ref} = 6.626069 \times 10^{-34}$; e $W_{ref} = 2.17872 \times 10^{-19} \text{ eV}$ aos quais se compararam os valores obtidos, no entanto o valor de referência da função trabalho, depende da proporção entre o Césio e o Antimónio que constituem o cátodo.

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Parte A		Parte B	
$h \text{ (J s)}$	6,0E-34	$h \text{ (J s)}$	5,0E-34
$u(h) \text{ (J s)}$	4E-35	$u(h) \text{ (J s)}$	3E-35
Er(%)	9	Er(%)	24
$W \text{ (eV)}$	2,6E-19	$W \text{ (eV)}$	2,2E-19
$u(W) \text{ (eV)}$	2E-20	$u(W) \text{ (eV)}$	2E-20
Er(%)	21	Er(%)	1

Tabela 4: Valores de h e W obtidos através dos ajustes aos gráficos $V_C(f)$

Nota-se que o valor da constante de Planck obtida na Parte B tem um erro bastante significativo. Iremos assumir que este erro provem da influencia da distância do LED à célula fotoelétrica. Numa experiência futura, seria uma boa prática arranjar um suporte com os LEDs mais robusto/estável para que fosse possível medir a distância do mesmo à célula, de modo a poder mantê-la constante.

Já o valor obtido para a função trabalho, diz-nos que provavelmente o valor tomado como referência não é correto uma vez que como foi explicado até este momento, era esperado obter melhores resultados com os dados obtidos com o 1º método.

Posteriormente, calculou-se a média dos valores obtidos, ou seja, calcularam-se h_{exp} e W_{exp} , onde se obtiveram os seguintes valores: $h_{exp} = (5.5 \pm 0.7) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ com um erro percentual de 17% e $W_{exp} = (2.40 \pm 0.04) \times 10^{-19}$ com um erro de 10%

Podemos ainda calcular a frequência mínima para haver efeito fotoelétrico, f_0 , que percebemos através do gráfico 2 da Figura 1 que a podemos calcular com a Equação 4 fazendo $V_C = 0$, donde temos que $f_0 = \frac{W}{h}$. Assim, determinamos que $f_0 = (4,4 \pm 0,6) \times 10^{14} \text{ Hz}$. Todos os LEDs utilizados tinham frequências superiores, logo este efeito era possível.

É também interessante perceber o porquê da utilização dos LEDs e não de outra lâmpada, como por exemplo lâmpadas de descarga. Como podemos ver na Figura 12 em Anexo A.5, as curvas que descrevem a potência da radiação dos LEDs são relativamente estreitas, isto equivale a dizer que a radiação emitida tem uma gama de comprimentos de onda pequena, ou seja, todos os valores dessa gama são próximos do comprimento de onda do pico. Assim,

a radiação vai ter uma frequência muito bem definida, algo que é necessário visto que os princípios físicos que explicam estes resultados assumem isso mesmo. Já as lâmpadas de descarga têm um espectro de emissão com vários picos e até com uma curva, como vimos no Trabalho 6 - Espectroscopia realizado na UC Laboratório de Física III.

3 Conclusão

Neste trabalho, observámos a dependência da intensidade com o potencial, na gama em torno do potencial de paragem através de um gráfico $I(V)$, o que nos permitiu calcular V_C para 4 LEDs diferentes e, a partir de um ajuste ao gráfico $V_C(f)$, calcular a constante de Planck - $h = (6,0 \pm 0,4) \times 10^{-34} J \cdot s$ com um erro de 9% e a função trabalho de extração de um eletrão na liga utilizada - $W = (2,6 \pm 0,2) \times 10^{-19} eV$ com um erro de 21% associado.

Na parte B, retirámos os valores do potencial de paragem através da medida da diferença de potencial num condensador para todos os LEDs disponíveis e calculámos novamente os valores da constante de Planck - $h = (5,0 \pm 0,3) \times 10^{-34} J \cdot s$ com um erro de 24% e da função trabalho de extração de um eletrão na liga utilizada - $W = (2,2 \pm 0,2) \times 10^{-19} eV$ com um erro de 1%.

Assim, podemos concluir que $h_{exp} = (5.5 \pm 0.7) \times 10^{-34} J \cdot s$ com $Er(\%) = 17\%$ e $W_{exp} = (2.40 \pm 0.04) \times 10^{-19}$ com um erro de 10%.

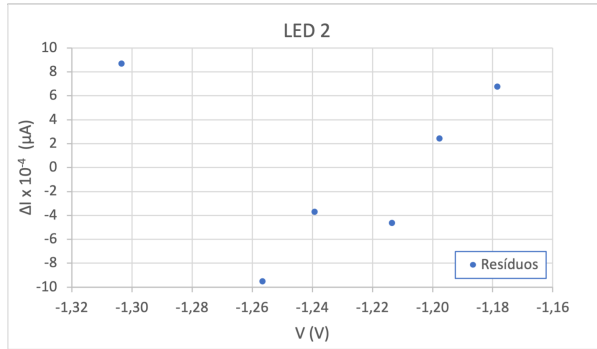
Verificámos que no 2º método, a distância do LED à célula fotoelétrica influencia significativamente o valor do potencial de paragem e pudemos ainda confirmar que o valor de V_C (em módulo) aumenta com o aumento da frequência da radiação.

Referências

- [1] Docentes da unidade curricular Laboratório de Física III. Emissão led, quantum de luz e efeito fotoelétrico, 2021.
- [2] Docentes da unidade curricular Laboratório de Física III. Espectro dos leds utilizados, 2021.

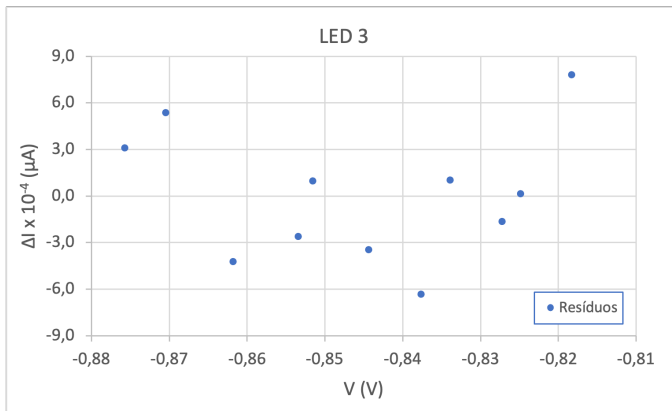
A Anexo

A.1 Gráficos de resíduos e tabelas com parâmetros de ajuste



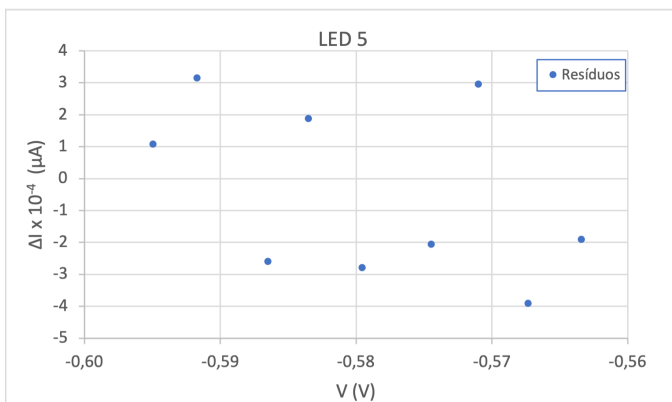
	LED 2		
m	-8,1E-08	-9,5E-08	b
Δm	8E-09	1E-08	Δb
r²	0,96	8E-10	S _y

Figura 5: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos aos gráficos $I(V)$ - LED 2



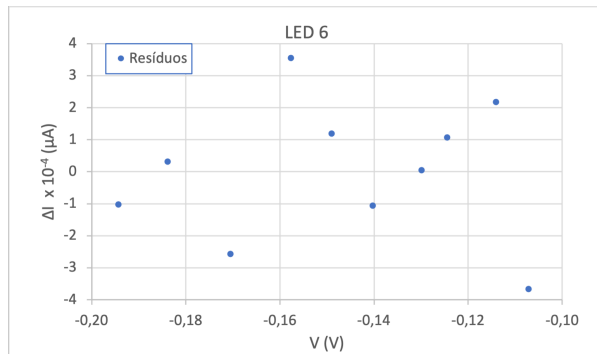
	LED 3		
m	-3,4E-07	-2,78E-07	b
Δm	7E-09	6E-09	Δb
r²	0,996	4E-10	S _y

Figura 6: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos aos gráficos $I(V)$ - LED 3



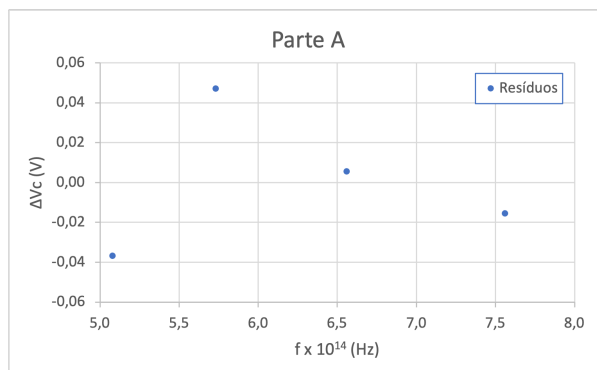
	LED 5		
m	-4,89E-07	-2,68E-07	b
Δm	8E-09	4E-09	Δb
r²	0,998	3E-10	S _y

Figura 7: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos aos gráficos $I(V)$ - LED 5



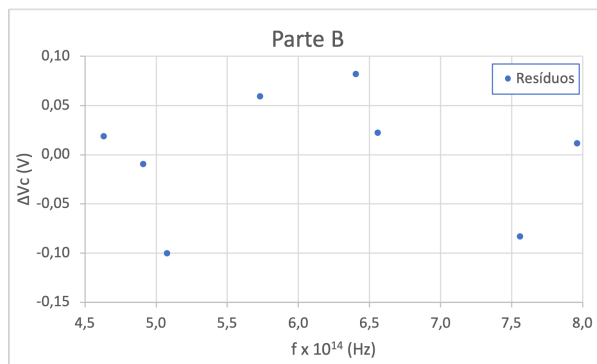
LED 6			
m	2,03E-07	4,44E-08	b
Δm	3E-09	4E-10	Δb
r²	0,9987	2E-10	S _y

Figura 8: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos aos gráficos $I(V)$ - LED 6



Parte A			
m	-0,37	1,6	b
Δm	0,02	0,1	Δb
r²	0,992	0,04	S _y

Figura 9: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos ao gráfico $V_C(f)$ - Parte A



Parte B			
m	-0,31	1,3	b
Δm	0,02	0,1	Δb
r²	0,97	0,07	S _y

Figura 10: Gráfico de resíduos e tabela com parâmetros de ajuste relativos ao gráfico $V_C(f)$ - Parte B

A.2 Cálculo das incertezas

- Comprimento de onda, λ :

$$u(\lambda) = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2}$$

- Frequência da radiação, f :

$$u(f) = \frac{c \cdot u(\lambda)}{\lambda^2}$$

- Corrente, I :

$$u(I) = \frac{escala}{100} \cdot u(valor)$$

onde *escala* é a escala utilizada e $u(valor)$ é a incerteza de medição direta de I .

- Potencial de paragem, V_C :

$$u(V_C) = \sqrt{\left(\frac{b}{m^2}\right)^2 \cdot u^2(m) + \left(-\frac{1}{m}\right)^2 \cdot u^2(b)}$$

- Constante de Planck, h :

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

- Trabalho de extração, W :

$$u(W) = e \cdot u(b)$$

- Frequência mínima, f_0 :

$$u(f_0) = \sqrt{\left(\frac{1}{h}\right)^2 \cdot u^2(W) + \left(-\frac{W}{h^2}\right)^2 \cdot u^2(h)}$$

A.3 Tabelas de Dados Experimentais

LED 2	
$V \pm 0,008$ (V)	$I \pm 0,001(\mu A)$
-3,230	0,019
-1,681	0,017
-1,590	0,015
-1,370	0,013
-1,304	0,010
-1,257	0,008
-1,239	0,006
-1,214	0,004
-1,198	0,002
-1,178	0,000

LED 5	
$V \pm 0,001$ (V)	$I \pm 0,001(\mu A)$
-0,613	0,030
-0,608	0,028
-0,601	0,026
-0,595	0,023
-0,592	0,022
-0,587	0,019
-0,584	0,018
-0,580	0,016
-0,574	0,013
-0,571	0,012
-0,567	0,010
-0,563	0,008
-0,561	0,006
-0,559	0,004
-0,556	0,002
-0,553	0,000

LED 3	
$V \pm 0,001$ (V)	$I \pm 0,001(\mu A)$
-0,898	0,024
-0,886	0,022
-0,876	0,020
-0,870	0,018
-0,862	0,016
-0,853	0,013
-0,852	0,012
-0,844	0,010
-0,838	0,008
-0,834	0,006
-0,827	0,004
-0,825	0,003
-0,818	0,000

LED 6	
$V \pm 0,002$ (V)	$I \pm 0,001(\mu A)$
-0,039	0,050
-0,043	0,048
-0,048	0,046
-0,053	0,044
-0,054	0,042
-0,064	0,040
-0,065	0,038
-0,071	0,036
-0,078	0,034
-0,084	0,032
-0,091	0,030
-0,097	0,028
-0,100	0,026
-0,107	0,023
-0,114	0,021
-0,124	0,019
-0,130	0,018
-0,140	0,016
-0,149	0,014
-0,158	0,012
-0,170	0,010
-0,184	0,007
-0,194	0,005
-0,210	0,004
-0,230	0,002
-0,254	0,000

Tabela 5: Tabelas de dados experimentais para os LEDs 2, 3, 5 e 6, respetivamente.

	Parte A					Parte B					
	$f \times 10^{14}$ (Hz)	$u(f) \times 10^{14}$ (Hz)	V_c (V)	$u(V_c)$ (V)	$V_{c,q}$ (V)	$f \times 10^{14}$ (Hz)	$u(f) \times 10^{14}$ (Hz)	$V_c(V) \pm 0,03$	$V_{c,q}$ (V)	ΔV_c (V)	
LED 2	7,6	0,1	-1,2	0,2	-1,19	LED 1	8,0	0,1	-1,16	-1,15	0,01
LED 3	6,6	0,1	-0,82	0,03	-0,81	LED 2	7,6	0,1	-0,94	-1,02	-0,08
LED 5	5,7	0,2	-0,55	0,01	-0,50	LED 3	6,6	0,1	-0,73	-0,71	0,02
LED 6	5,08	0,04	-0,218	0,003	-0,26	LED 4	6,4	0,1	-0,74	-0,66	0,08
						LED 5	5,7	0,2	-0,51	-0,45	0,06
						LED 6	5,08	0,04	-0,14	-0,24	-0,10
						LED 7	4,91	0,02	-0,18	-0,19	-0,01
						LED 8	4,63	0,07	-0,12	-0,10	0,02

Tabela 6: Tabelas de dados experimentais para obter h e W na Parte A e na Parte B, respetivamente.

A.4 Sensibilidade de diferentes materiais à radiação luminosa

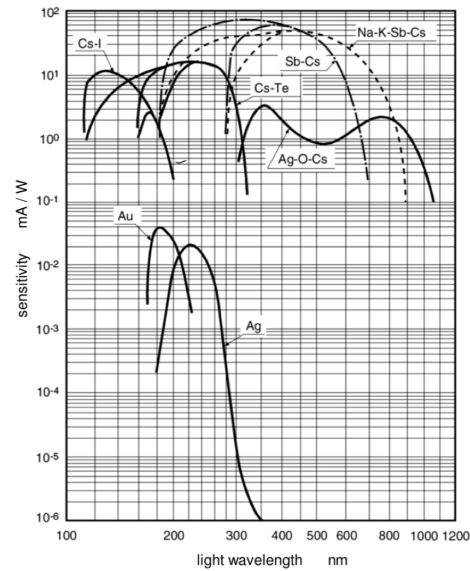


Figura 11: Sensibilidade de diferentes materiais à radiação luminosa. Fonte: [1]

A.5 Espectros dos LEDs disponíveis

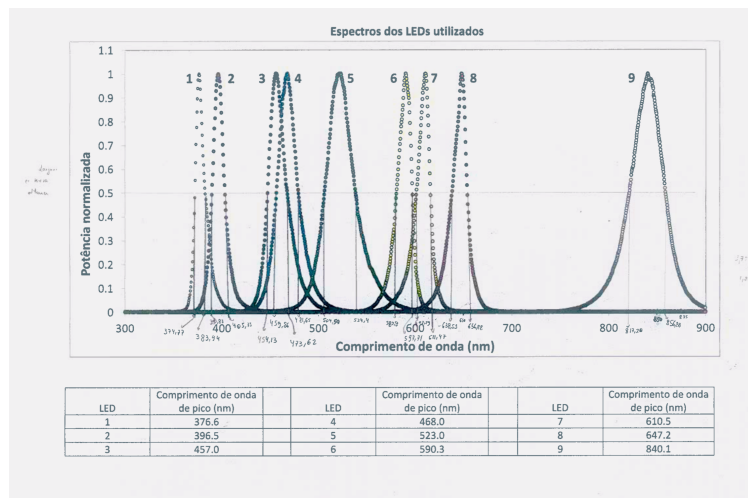


Figura 12: Espectros dos LEDs disponíveis. Fonte:[2]