

# Emissão LED, quantum de luz e efeito fotoelétrico

Rafael Machado Salgueiro

Departamento de física e Astronomia

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

14 de novembro de 2021

## Resumo

O principal objetivo deste trabalho é comprovar experimentalmente a teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico. Neste trabalho iremos fazer o estudo do efeito fotoelétrico através de duas montagens distintas (parte A e parte B) por forma a comparar os resultados experimentais de ambas as partes. Tanto na parte A como na parte B iremos calcular valores experimentais para a constante de Planck ( $h$ ) e da função trabalho ( $w$ ) que posteriormnete serão comparados com os valores teóricos.

## 1 Introdução

O efeito fotoelétrico foi descoberto por Heinrich Hertz em 1887, mas os resultados experimentais não conseguiam ser explicados pela física clássica nem pela teoria ondulatória da radiação. Só mais tarde (1905) é que Albert Einstein conseguiu explicar o efeito fotoelétrico. [1]

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de eletrões por uma superfície quando sobre ela incide radiação eletromagnética. De acordo com a teoria de Einstein a energia da radiação está distribuída em pequenos "pacotes", posteriormente chamados de fótons ( $\gamma$ ), cada um com energia dada por:

$$E_{\gamma} = hf \tag{1}$$

Nesta equação,  $h$  corresponde à constante de Planck e  $f$  é a frequência da radiação.

O efeito fotoelétrico foi então explicado como sendo o efeito de uma colisão entre um fóton ( $\gamma$ ) e um elétron orbital ( $e^-$ ) tal como indicado na equação a seguir:

$$\gamma + e^-_{\text{ligado}} \longrightarrow e^-_{\text{livre}} \quad (2)$$

De referir que apenas elétrons ligados podem absorver fótons, tal como referido na equação 2. De acordo com a conservação da energia temos que:

$$hf = E_{c,e} + w \quad (3)$$

Na equação 3 o termo  $E_{c,e}$  representa a energia cinética do elétron livre (fotoelétrão) e  $w$  é a função trabalho do material constituinte da superfície onde incide a radiação eletromagnética. A função trabalho é a energia necessária para se extrair um elétron do material.

## 2 Execução experimental

A célula fotoelétrica utilizada nesta experiência (Phywe PhotoCell- 06779-00) utiliza como cátodo uma liga de Césio-Antimónio (Sb-Cs). Esta célula opera com radiação luminosa de comprimentos de onda na gama 185-650 nm e com máxima sensibilidade de 340 nm. [2] Os diferentes LEDs encontram-se numa caixa de LEDs, onde o LED emissor é ativado por rotação do botão seletor. Dos 9 LEDs disponíveis no laboratório, apenas 8 se encontram na gama referida anteriormente e todos esses emitem radiação na gama do visível (ver tabela 5). O LED que não se utiliza emite radiação já na gama do infravermelho.

### 2.1 Parte A

A montagem experimental desta parte da experiência encontra-se ilustrada na figura 1. O LED emissor deve ser colocado próximo do cátodo (K) de onde serão emitidos elétrons (fotoelétrons) que por sua vez irão atingir o ânodo (A). O número de elétrons que atinge o ânodo pode ser aumentado ou diminuído variando a diferença de potencial ( $V$ ) entre o ânodo e o cátodo.

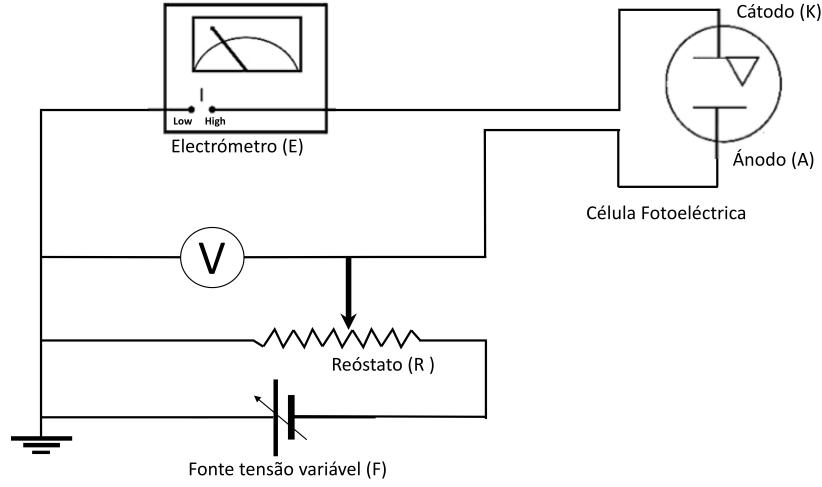


Figura 1: Montagem da parte A [2]

$$V = V_A - V_K \quad (4)$$

Quando  $V > 0$ , temos um potencial acelerador caso contrário temos um potencial retardador. No caso do potencial retardador ( $V < 0$ ) chegam ao ânodo menos eletrões do que aqueles que chegariam se  $V = 0$ . Existe também um valor de  $V$  negativo para o qual nenhum eletrão atinge o ânodo: potencial de paragem ( $V_0$ ). [1]

Voltando agora à equação 3 e substituindo  $E_{c,e}$  por  $eV_0$  ( $e$  - carga elementar) obtemos:

$$eV_0 = hf - w \quad (5)$$

Notar que na equação 5 o termo  $V_0$  representa mais concretamente  $|V_0|$  (a energia cinética é uma quantidade positiva). Usarei esta notação por uma questão de simplicidade.

Depois de montar o circuito devemos garantir o máximo isolamento da célula fotoelétrica relativamente à luz ambiente. Para cada um dos LEDs devemos registar os valores da diferença de potencial ( $V$ ) e da corrente ( $I$ ) até conseguir reduzir a corrente o máximo possível. O potencial correspondente ao mínimo de corrente medida será o potencial de paragem desse LED.

Para obter estes dados experimentais devemos atuar somente no botão do reóstato. De referir também que o potencial medido no voltímetro deverá

ser negativo caso o circuito esteja bem montado (o objetivo é encontrar o potencial de paragem de cada LED).

A corrente é medida no eletrómetro que é um aparelho capaz de medir correntes até à ordem dos  $nA$  (ver figura 2). No eletrómetro devemos escolher primeiro uma escala de sensibilidade (nano, micro ...), ou seja se escolhermos a escala dos  $nA$ , obteremos valores de corrente nessa escala, mas o valor numérico da corrente é dada por:

$$I = \text{percentagem} \times \text{fator}_{\text{multiplicativo}} \quad (6)$$

O valor da percentagem (valor entre 0 e 1) é lido na zona do eletrómetro onde existe um ponteiro e o  $\text{fator}_{\text{multiplicativo}}$  pode ser seleccionado de entre as várias opções existentes (1, 3, 100, 1000, ...) através da rotação de um botão seletor (ver figura 2). Na utilização do eletrómetro, quando se muda a escala de sensibilidade (por exemplo quando se passa de micro para nano), devemos sempre ajustar o "zero" para todos os fatores multiplicativos para evitar erros.



Figura 2: Eletrómetro utilizado na experiência

## 2.2 Parte B

Nesta parte do trabalho o potencial de paragem de cada LED é obtido pelo condensador que carrega até a sua diferença de potencial ser igual ao potencial de paragem. A montagem encontra-se ilustrada na figura a seguir.

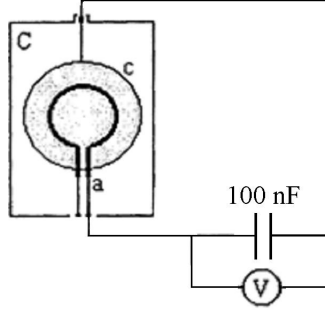


Figura 3: Montagem da parte B [2]

## 3 Análise

Um dos objetivos deste trabalho é a determinação do valor da constante de Planck ( $h$ ) e da função trabalho ( $w$ ) da liga de Césio-Antimónio (Sb-Cs) que é o material constituinte do cátodo. Estes valores podem ser facilmente determinados tendo em conta a equação 5. Sabendo as frequências e os valores de  $eV_0$  para cada LED, é possível, através de um ajuste linear, determinar os valores experimentais para  $h$  (declive) e para  $w$  (ordenada na origem).

### 3.1 Parte A

Os dados do ajuste linear referentes ao gráfico da figura 4 encontram-se na tabela 14. O gráfico de resíduos deste gráfico pode também ser consultado nos Anexos na figura 13.

Consultando os dados do ajuste linear obtém-se os seguintes valores experimentais:  $h = (3,0 \pm 0,2) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  e  $w = (1,1 \pm 0,2) \text{ eV}$ .

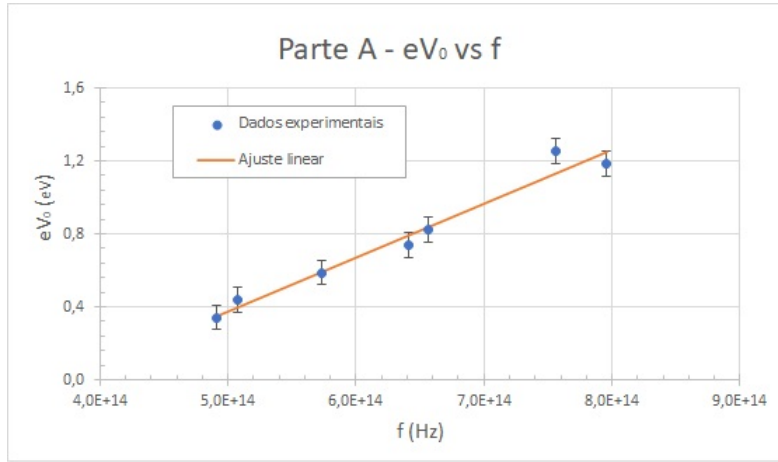


Figura 4: Dados referentes à tabela 13; barras de erro -  $2s_y$

### 3.2 Parte B

Os dados do ajuste linear referentes ao gráfico da figura 5 encontram-se na tabela 16. O gráfico de resíduos deste gráfico pode também ser consultado nos Anexos na figura 14.

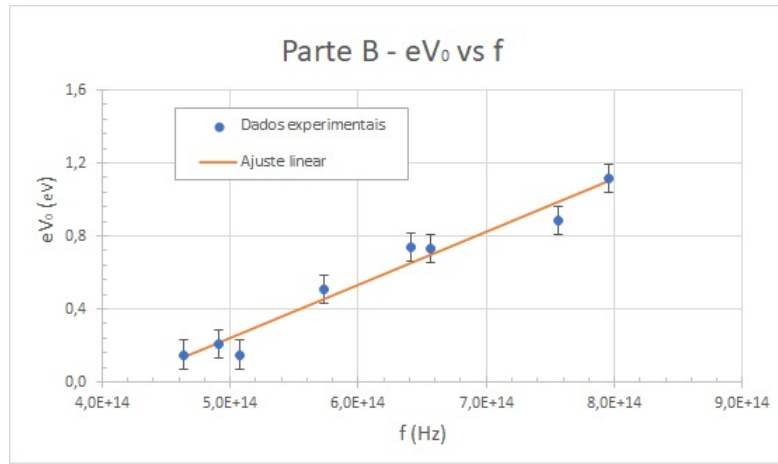


Figura 5: Dados referentes à tabela 15; barras de erro -  $2s_y$

Consultando os dados do ajuste linear obtém-se os seguintes valores experimentais:  $h = (2,9 \pm 0,2) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  e  $w = (1,2 \pm 0,1) \text{ eV}$ .

### 3.3 Comparação de resultados

Os valores do potencial de paragem ( $V_0$ ) de cada LED foram por norma diferentes de acordo com o método usado na sua determinação, tal como se ilustra na seguinte tabela:

LED	$V_{0,A}$ (volts)	$V_{0,B}$ (volts)	$\Delta V_0$ (volts)
1	1,186	1,115	0,071
2	1,255	0,886	0,369
3	0,820	0,730	0,090
4	0,740	0,740	0,000
5	0,588	0,509	0,079
6	0,437	0,150	0,287
7	0,342	0,206	0,136
8	-	0,150	-

Tabela 1: Valores de  $V_0$  obtidos para parte A e B e respetiva diferença

Da análise da tabela 1 conclui-se que o valor de  $V_0$  calculado na parte A foi sempre igual ou superior em relação ao valor da parte B ( $\Delta V_0 = V_{0,A} - V_{0,B}$ ). Apenas com o LED 4 se verificou um mesmo valor de  $V_0$  em ambas as partes e o valor médio de  $\Delta V_0$  foi de aproximadamente 0,147 V. Na discussão abordarei estes resultados em maior detalhe por forma a tentar explicar este fenómeno.

Por forma a finalizar a análise dos resultados experimentais irei agora comparar os valores obtidos com os valores teóricos através do cálculo do erro relativo. Os valores teóricos encontram-se na tabela 2.

Valores teóricos	
h	$4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot s$
w	1,5 eV

Tabela 2: Valores tóricos para h e w [3] [4]

A partir destes valores teóricos obtiveram-se os erros relativos apresentados na tabela 3.

Conclui-se então que na parte A obteve-se o valor de h mais próximo do valor teórico, enquanto que na parte B obteve-se o valor de w mais próximo do valor teórico.

	Parte A	Parte B
erro h	27,4 %	29,9 %
erro w	26,7 %	20,0 %

Tabela 3: Erros relativos calculados utilizando a equação 9.

## 4 Discussão

Na parte A deste trabalho a montagem foi mais complexa e a determinação de  $V_0$  foi mais demorada pois tínhamos de tentar encontrar o valor de potencial para o qual se media o mínimo de corrente possível o que nem sempre era fácil devido à elevada sensibilidade do eletrómetro. Durante a execução experimental verificou-se que o ruído da sala dificultava as medições no eletrómetro.

Por outro lado, na parte B, a montagem era muito mais simples e a determinação de  $V_0$  era também muito mais rápida pois bastava registar o valor da diferença de potencial no voltímetro (temos, no entanto, de esperar que o valor de  $V$  estabilize). Quando a diferença de potencial no condensador estabiliza num dado valor isso significa que a corrente no circuito deverá ser nula tal como indicado pela equação 7.

$$I_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (7)$$

Nesta equação  $C$  representa a capacidade do condensador (nesta experiência o condensador usado tinha 100 nF de capacidade).

Na análise de resultados chegou-se à conclusão que o valor de  $V_0$  determinado na parte A foi sempre igual ou superior em relação ao da parte B. Este resultado faz sentido pois a sensibilidade do eletrómetro é muito superior à sensibilidade do voltímetro. Na parte B, quando o valor de  $V$  estabiliza pode ainda existir uma corrente muito pequena que não é visível na variação da diferença de potencial devido à insuficiente sensibilidade do voltímetro. Na parte A, ao medir-se simultaneamente a corrente e o potencial podemos garantir que  $V_0$  corresponde efetivamente à corrente mínima possível de medir com o eletrómetro.

Os resultados experimentais afastam-se consideravelmente em relação aos valores teóricos tal como se pode ver na tabela 3. Estas diferenças podem ter origem em vários fatores como por exemplo:

- Impossibilidade de medir a corrente "zero" com o eletrómetro o que



afeta os valores obtidos para o potencial de paragem. É de esperar que quanto maior for a sensibilidade do eletrómetro melhores seriam os resultados.

- Não foi possível isolar devidamente a célula fotoelétrica relativamente à luz ambiente com o material disponível no laboratório (caixa com um pano preto à volta). Durante a execução experimental verificou-se ser possível ver as luzes dos LEDs a partir do exterior da "caixa" o que não seria possível caso os LEDs e a célula fotoelétrica estivessem completamente isolados da luz ambiente.
- Os LEDs não emitem uma só frequência como é possível verificar através da consulta dos espectros de emissão dos mesmos, os quais estão disponíveis no laboratório.

## 5 Conclusões

- Os valores de  $V_0$  obtidos na parte A foram sempre iguais ou superiores relativamente aos valores da parte B.
- A execução experimental da parte A permite obter valores de  $V_0$  de forma mais exata pois consegue-se controlar os valores da corrente diretamente no eletrómetro.
- Os valores experimentais obtidos na parte A foram:  $h = (3,0 \pm 0,2) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  e  $w = (1,1 \pm 0,2) \text{ eV}$  com erros relativos de 27,4% e 26,7% respetivamente.
- Os valores experimentais obtidos na parte B foram:  $h = (2,9 \pm 0,2) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  e  $w = (1,2 \pm 0,1) \text{ eV}$  com erros relativos de 29,9% e 20,0% respetivamente.
- Um dos principais fatores que terá contribuído para o afastamento dos valores experimentais relativamente aos valores teóricos foi o facto de não se ter conseguido isolar devidamente os LEDs e a célula fotoelétrica relativamente à luz ambiente.

## 6 Anexos

### 6.1 Constantes , fórmulas e frequências dos LEDs

As constantes físicas utilizadas neste trabalho foram: velocidade da luz ( $c$ ) , carga elementar ( $e$ ) e a unidade de energia elétron-volt (eV).

$c$ (m/s)	299 792 458
$e$ (C)	1,602 176 634E-19
eV (J)	1,602 176 634E-19

Tabela 4: Constantes consultadas no NIST [3]

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (8)$$

$$erro_{relativo} = \frac{valor_{teórico} - valor_{experimental}}{valor_{teórico}} \times 100(\%) \quad (9)$$

LED	$\lambda$ (nm)	f (Hz)
1	376,6	7,961E+14
2	396,5	7,561E+14
3	457,0	6,560E+14
4	468,0	6,406E+14
5	523,0	5,732E+14
6	590,3	5,079E+14
7	610,5	4,911E+14
8	647,2	4,632E+14

Tabela 5: Comprimento de onda e frequência dos diferentes LED

### 6.2 Parte A

De seguida iremos apresentar as tabelas e gráficos obtidos para cada um dos LEDs ( $V_0$  vs  $I$ ). De referir que para cada um dos LEDs registámos um potencial em que a corrente era "zero", o que não corresponde à realidade. Na verdade este "zero" é apenas representativo do valor mínimo de corrente medido no eletrómetro.

$V_0$ (volts)	I (nA)
-1,60	7,2
-1,50	6,6
-1,45	6,0
-1,40	5,4
-1,35	4,2
-1,30	3,0
-1,28	1,5
-1,27	0,7
-1,26	0,3
-1,255	0,0

Tabela 6: Dados referentes ao LED 2

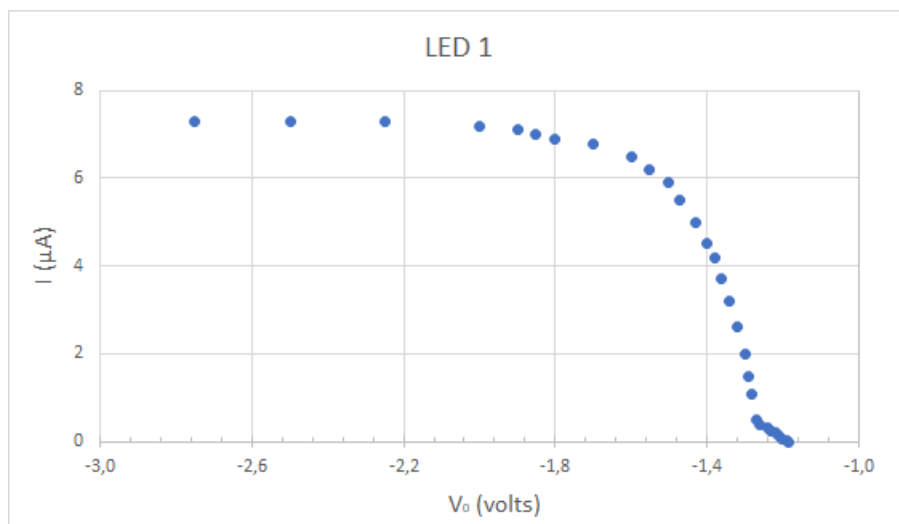


Figura 6: Dados referentes à tabela 7

$V_0$ (volts)	$I$ ( $\mu\text{A}$ )
-3,03	7,40
-2,75	7,30
-2,50	7,30
-2,25	7,30
-2,00	7,20
-1,90	7,10
-1,85	7,00
-1,80	6,90
-1,70	6,80
-1,60	6,50
-1,55	6,20
-1,50	5,90
-1,47	5,50
-1,43	5,00
-1,40	4,50
-1,38	4,20
-1,36	3,70
-1,34	3,20
-1,32	2,60
-1,30	2,00
-1,29	1,50
-1,28	1,10
-1,27	0,50
-1,26	0,39
-1,24	0,30
-1,23	0,25
-1,22	0,20
-1,21	0,12
-1,20	0,05
-1,19	0,02
-1,186	0,00

Tabela 7: Dados referentes ao LED 1

$V_0$ (volts)	I (nA)
-1,25	44
-1,20	43
-1,15	42
-1,10	41
-1,05	39
-1,00	36
-0,95	32
-0,93	29
-0,90	25
-0,88	20
-0,86	14
-0,84	7
-0,83	3
-0,82	0

Tabela 8: Dados referentes ao LED 3

$V_0$ (volts)	I (nA)
-1,00	168
-0,95	162
-0,90	150
-0,85	129
-0,82	105
-0,80	87
-0,78	63
-0,77	51
-0,76	34
-0,75	19
-0,74	0

Tabela 9: Dados referentes ao LED 4

$V_0$ (volts)	I (nA)
-0,85	48
-0,80	47
-0,75	45
-0,70	42
-0,67	39
-0,65	36
-0,63	31
-0,60	24
-0,59	12
-0,588	0

Tabela 10: Dados referentes ao LED 5

$V_0$ (volts)	I (nA)
-0,70	0,195
-0,65	0,183
-0,60	0,174
-0,55	0,156
-0,50	0,108
-0,48	0,069
-0,437	0,000

Tabela 11: Dados referentes ao LED 6

$V_0$ (volts)	I (nA)
-0,55	1,05
-0,50	1,05
-0,45	0,99
-0,42	0,90
-0,40	0,78
-0,38	0,60
-0,37	0,45
-0,35	0,15
-0,342	0,00

Tabela 12: Dados referentes ao LED 7

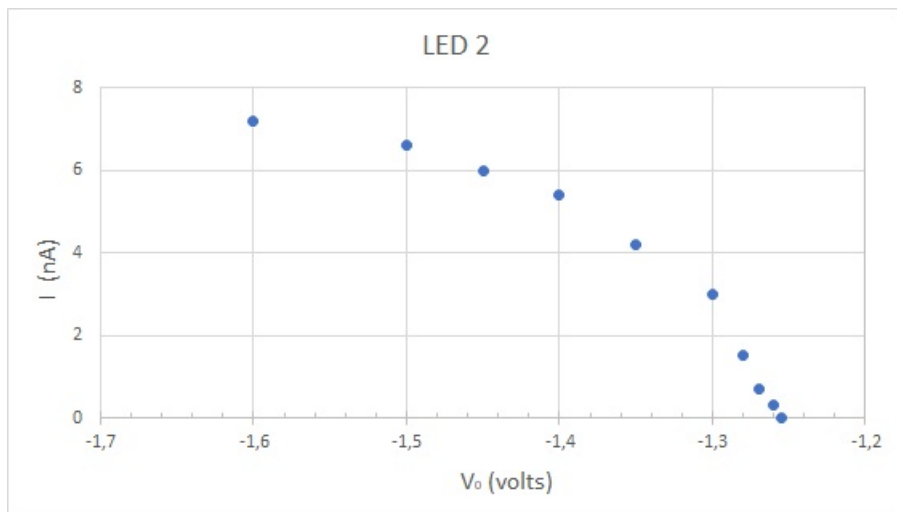


Figura 7: Dados referentes à tabela 6

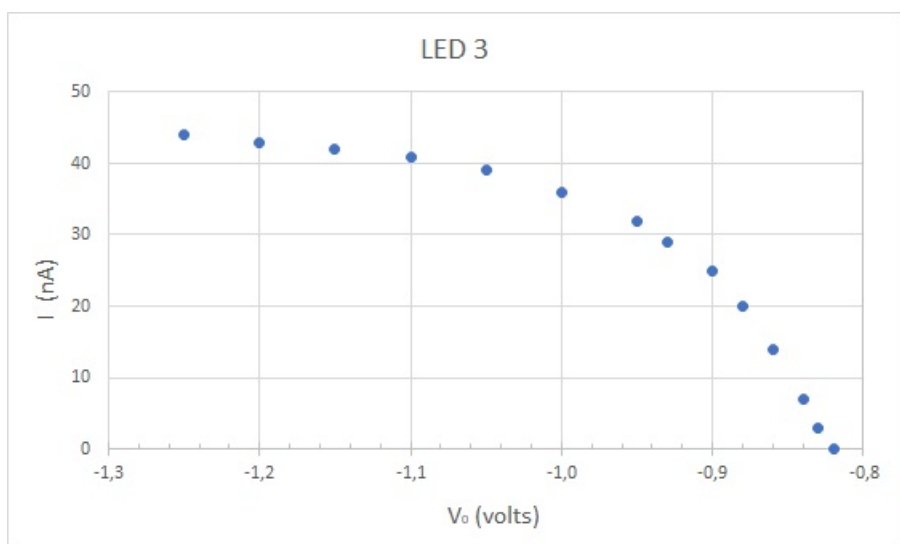


Figura 8: Dados referentes à tabela 8

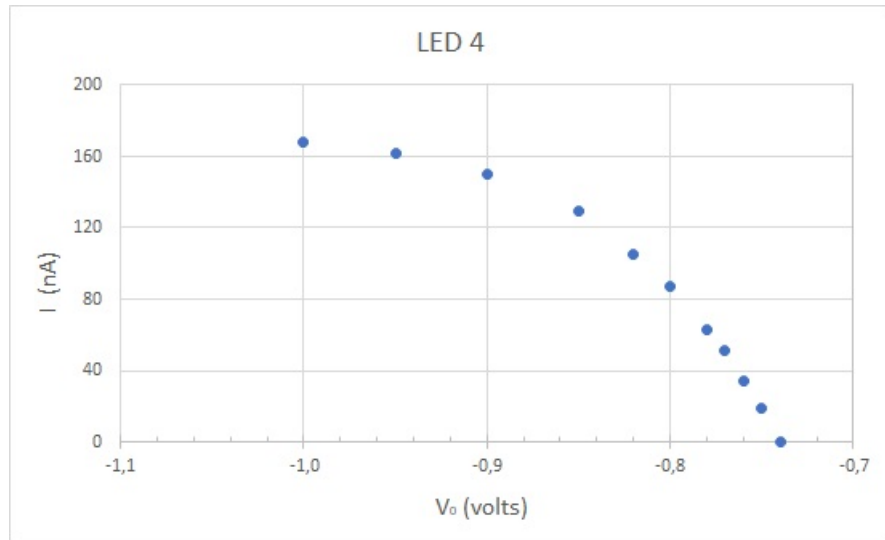


Figura 9: Dados referentes à tabela 9

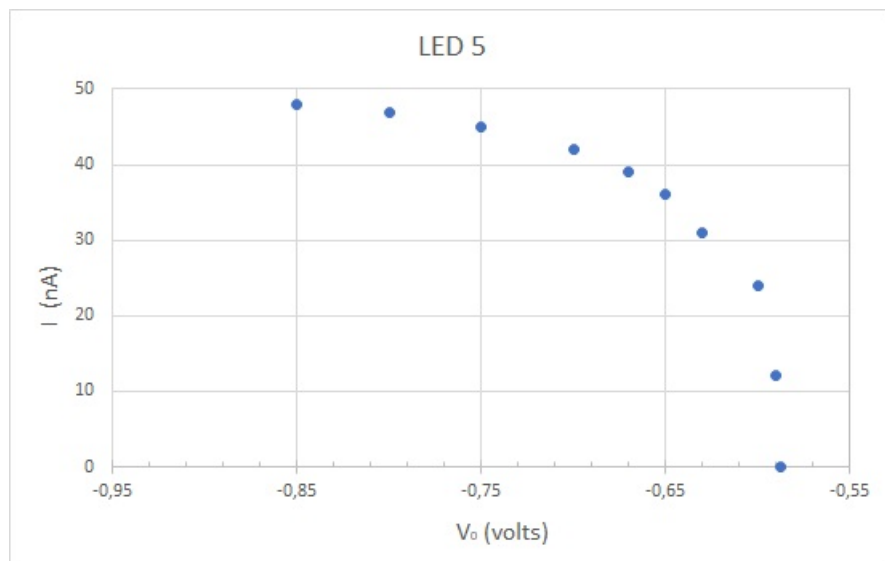


Figura 10: Dados referentes à tabela 10



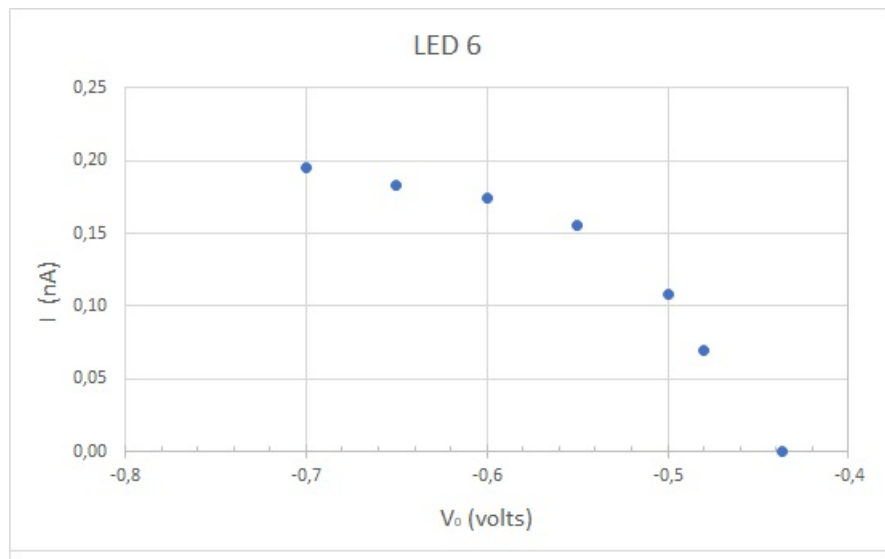


Figura 11: Dados referentes à tabela 11

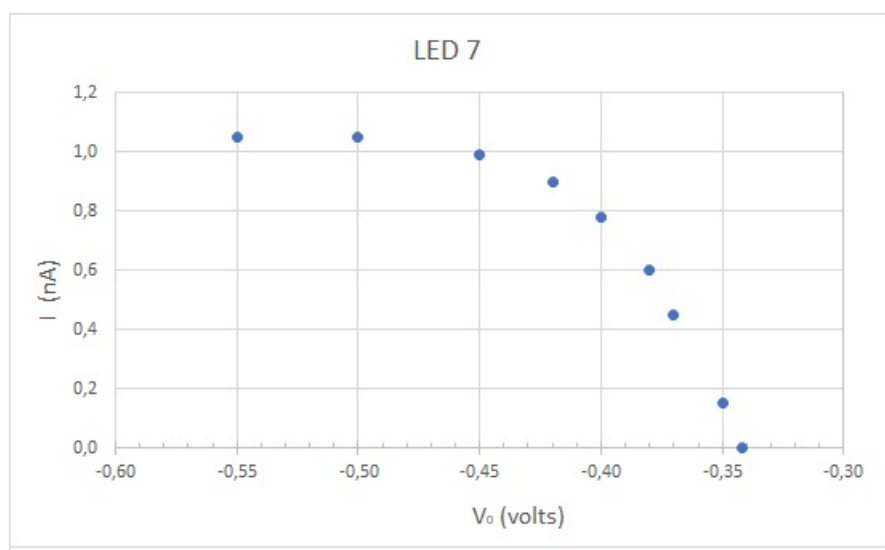


Figura 12: Dados referentes à tabela 12

LED	$V_0$ (volts)	$f$ (Hz)	$eV_0$ (eV)	ajuste	resíduos
1	1,186	7,96E+14	1,186	1,254	-0,068
2	1,255	7,56E+14	1,255	1,135	0,120
3	0,820	6,56E+14	0,820	0,839	-0,019
4	0,740	6,41E+14	0,740	0,794	-0,054
5	0,588	5,73E+14	0,588	0,594	-0,006
6	0,437	5,08E+14	0,437	0,401	0,036
7	0,342	4,91E+14	0,342	0,351	-0,009

Tabela 13: Potenciais de paragem, ajuste e resíduos

m	3,0E-15	-1,1	b
u(m)	0,2E-15	0,2	u(b)
$R^2$	0,9681	0,0686	$s_y$

Tabela 14: Parâmetros do ajuste linear

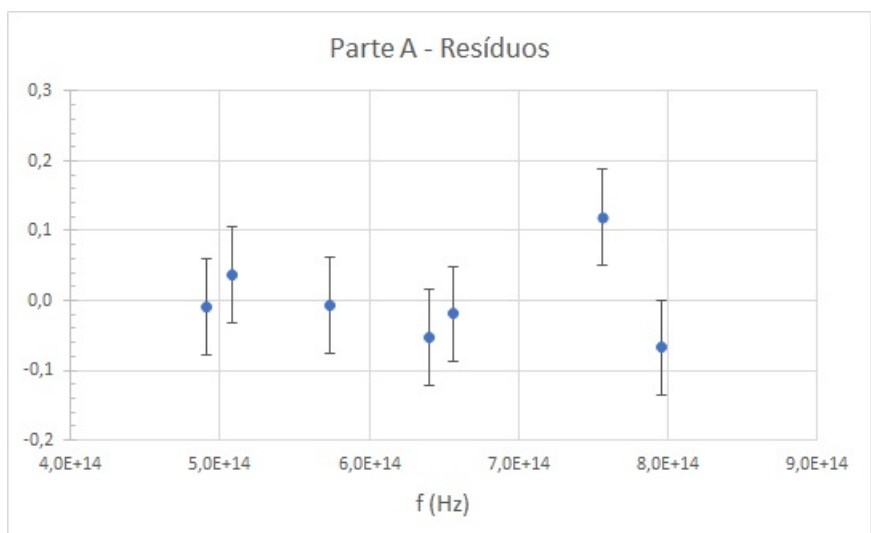


Figura 13: Gráfico de resíduos referente ao gráfico da figura 4

### 6.3 Parte B

LED	$V_0$ (volts)	$f$ (Hz)	$eV_0$ (eV)	ajuste	resíduos
1	1,115	7,96E+14	1,115	1,101	0,014
2	0,886	7,56E+14	0,886	0,985	-0,099
3	0,730	6,56E+14	0,730	0,693	0,037
4	0,740	6,41E+14	0,740	0,648	0,092
5	0,509	5,73E+14	0,509	0,452	0,057
6	0,150	5,08E+14	0,150	0,262	-0,112
7	0,206	4,91E+14	0,206	0,213	-0,007
8	0,150	4,63E+14	0,150	0,132	0,018

Tabela 15: Potenciais de paragem, ajuste e resíduos

m	2,9E-15	-1,2	b
u(m)	0,2E-15	0,1	u(b)
$R^2$	0,9619	0,0773	$s_y$

Tabela 16: Parâmetros do ajuste linear

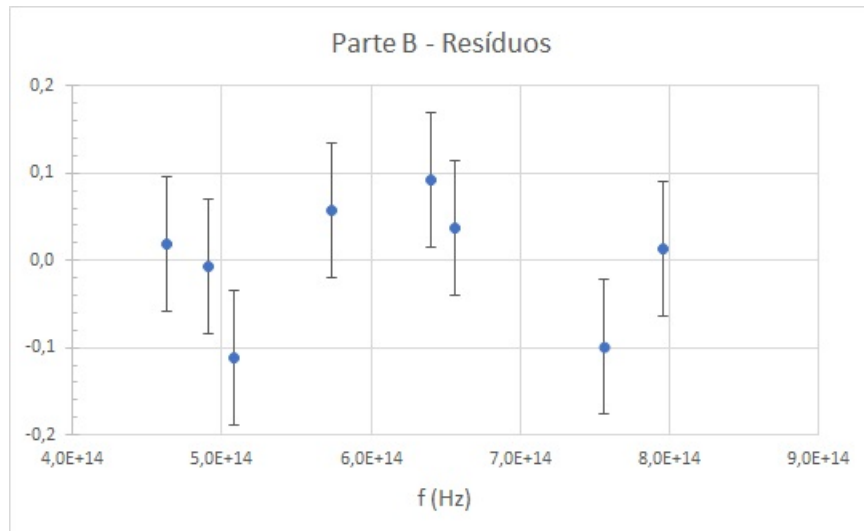


Figura 14: Gráfico de resíduos referente ao gráfico da figura 5

## Referências

- [1] Robert Eisberg and Robert Resnick. *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles - second edition*, volume 1. John Wiley and Sons INC, 1985.
- [2] DFA-FCUP. "protocolos de física iii, 2021/2022". *Física*, 2021.
- [3] NIST. Constants, units and uncertainty. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>, novembro 2021.
- [4] R. A. Caulfield, H. J. ; Chapman. Cesium—antimony films in equilibrium with cesium vapor. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JAP...37.4927C/abstract>, novembro 2021.