

# Emissão de LED, quantum de luz e efeito fotoelétrico

Adrian Moraes Cabral, grupo 1, turma PL5

9 de Novembro de 2021

## Resumo

Neste trabalho experimental pretendeu-se estudar o efeito fotoelétrico e a dependência do potencial de paragem com o comprimento de onda da luz incidente, para além disso determinou-se o valor da função trabalho dum cátodo de cézio e a constante de Planck através de dois métodos diferentes: determinação do potencial que anula a corrente fotoelétrica do circuito (parte A) e transferindo a energia da corrente criada para um condensador em série com a célula fotoelétrica e medindo o valor da tensão nos terminais do condensador (parte B).

Após se ter feito as várias medições necessárias foi possível concluir que a montagem experimental e o método associados à parte A obtém valores mais exatos de  $h$  e  $W$  do que aqueles obtidos na parte B.

## 1 Introdução

Esta experiência baseia-se no efeito fotoelétrico, que consiste na absorção de *quatum* de luz, ou seja, energia luminosa que se encontra discretizada em partículas denominadas fotões para depois ionizar eletrões de um material. Aqui assume-se que todos os fotões são integralmente absorvidos pelos eletrões do cátodo que forem bombardeados pelas partículas luminosas. A energia de cada fotão é dada por  $E = h\nu$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência de oscilação do fotão (pois este comporta-se como onda e como partícula).

Devido às ligações atómicas existentes entre os eletrões e os protões do cézio, é necessário fornecer uma energia mínima para ionizar os eletrões, que é dada pela função trabalho,  $W$  (que no caso do cézio é  $1,95eV$ ). Assim para haver efeito fotoelétrico é necessário que  $h\nu \geq W$  em que a energia em excesso é transformada em energia cinética dos eletrões

$$h\nu - W = \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (1)$$

Os eletrões libertados são depois coletados, originando uma corrente elétrica,  $I$ , num circuito exterior. Esta corrente pode ser contrariada aplicando um potencial negativo,  $V$ , relativamente ao emissor. O valor para a qual se anula o

fluio de elétrões é dado pelo potencial de paragem,  $V_c$ . Através da conservação da energia, a equação 1 pode ser reescrita de forma a relacionar o potencial de paragem com a frequência da radiação

$$eV_c = h\nu - W = \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (2)$$

Em que  $e$  é o valor da carga de um eletrão e  $m_e$  é a massa dum eletrão.

Devido às características corpusculares da luz, um aumento da intensidade de uma fonte luminosa traduz-se num acréscimo na quantidade de fótons que são libertados, sendo que cada um deles tem uma mesma frequência (e logo a mesma energia)

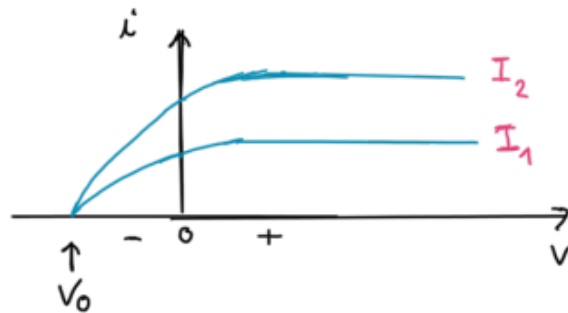


Figura 1: Gráfico da corrente no circuito em função do potencial aplicado para diferentes intensidades de luz ( $I_2 > I_1$ )[2]; é possível ver uma corrente de saturação em que todos os elétrões libertados são coletados

## 2 Material a usar

- Célula fotoelétrica *Phywe PhotoCell* – 06779 – 00
- Mili voltímetro
- Multímetro digital
- Fonte de Tensão regulável
- Circuito dedicado com potenciómetro
- Caixa de LEDs, de emissão do ultravioleta (UV) ao infravermelho próximo (NIR)
- Condensador de 100 nF
- Reóstato
- Eletrómetro
- Caixa preta com manta preta de forma a evitar a influência de luz ambiente na experiência

### 3 Circuitos a montar

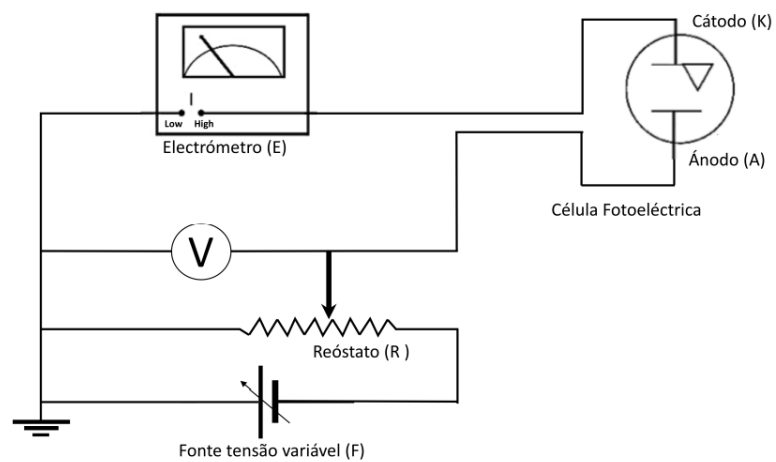


Figura 2: Circuito utilizado na parte A desta experiência

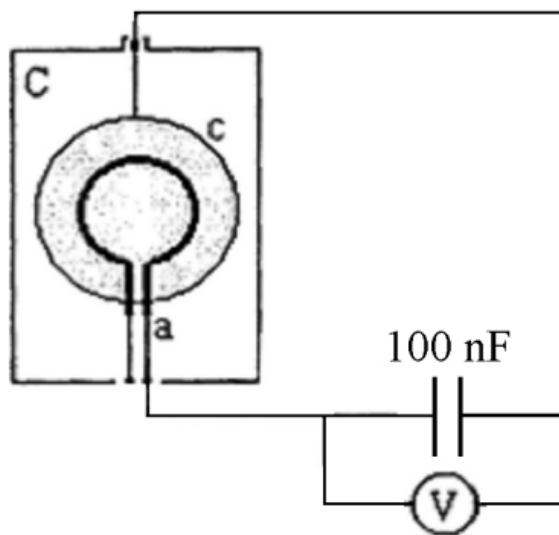


Figura 3: Circuito utilizado na parte B desta experiência

## 4 Modo de procedimento

### 4.1 Parte A

1. Montar o circuito esquematizado na figura 3
2. Posicionar os LEDs de forma a que estejam junto à célula fotoelétrica, em que o botão comutador permite trocar entre estes
3. Garantir o isolamento da célula fotoelétrica relativamente à luz ambiente
4. Procurar um valor aproximado da tensão de paragem: começando nas escalas menos sensíveis ir reduzindo a corrente medida no eletrómetro (atuando ou na fonte de tensão variável ou no reóstato), à medida que se aproxima da corrente nula aumentar a sensibilidade e repetir
5. Escolher a escala de sensibilidade maior que lhe permitir determinar a corrente nula, mantendo a escala constante ao longo das medidas de forma a evitar erros associados a mudança de escala.
6. Repetir para os vários LEDs disponíveis
7. A partir dos diversos gráficos

### 4.2 Parte B

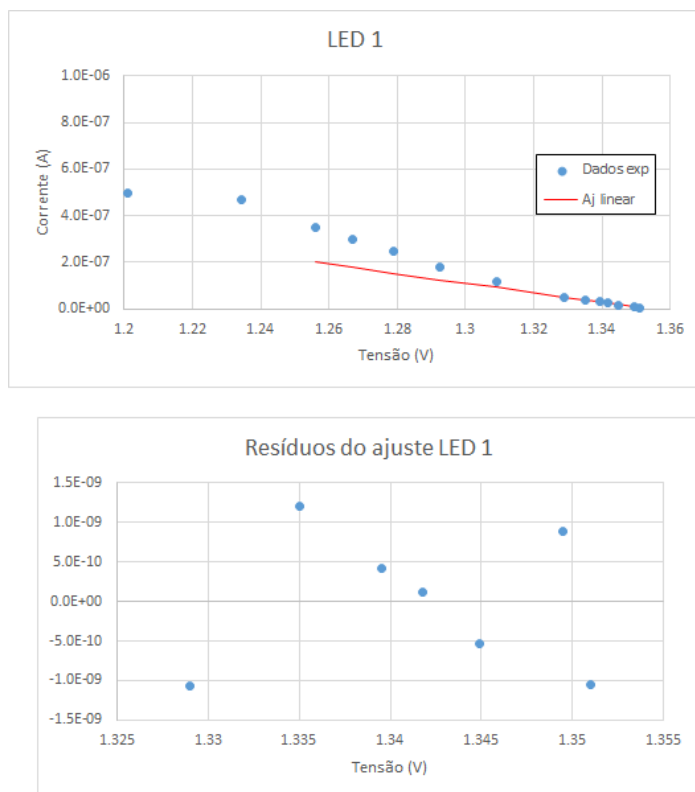
1. Montar o circuito esquematizado na figura 3
2. Apontar o LED escolhido para a célula fotoelétrica e deixar o condensador carregar totalmente (assim originando uma tensão antagonista que será  $V_c$ )
3. Determinar  $h$  e  $W$  a partir do gráfico de  $V_c(\nu)$

## 5 Análise dos dados

### 5.1 Parte A

Na primeira parte da experiência utilizaram-se os pontos experimentais que estavam mais próximos do zero para fazer um ajuste e determinar o zero, ou seja, o potencial de paragem. Para tal foi feita uma ajuste linear, porque na maior parte dos LEDs os resíduos apresentavam uma distribuição aleatória. A exceção disto é para o LED 5, em que se fez um ajuste linear por coerência com os outros LEDs, mas os resíduos não apresentam uma distribuição aleatória, não se alterou a gama de ajuste por causa da quantidade reduzida de pontos que essa gama iria ter.

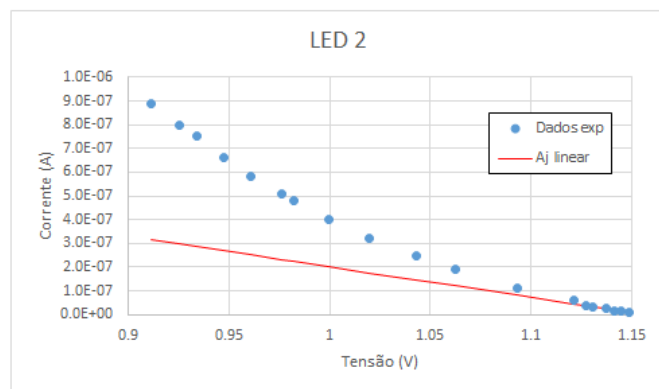
### 5.1.1 LED 1



|       | Aj gama escolhida |          |       |
|-------|-------------------|----------|-------|
| m=    | -2.05E-06         | 2.77E-06 | b=    |
| s(m)= | 5E-08             | 7E-08    | s(b)= |
| r^2=  | 0.997             | 1E-09    | s(y)= |
|       |                   | 2E-09    | 2σ=   |

Figura 4: Gráfico do ajuste feito, dos resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste

### 5.1.2 LED 2



|       | Aj gama escolhida |          |       |
|-------|-------------------|----------|-------|
| m=    | -1.29E-06         | 1.49E-06 | b=    |
| s(m)= | 3E-08             | 3E-08    | s(b)= |
| r^2=  | 0.997             | 7E-10    | s(y)= |
|       |                   | 1E-09    | 2σ=   |

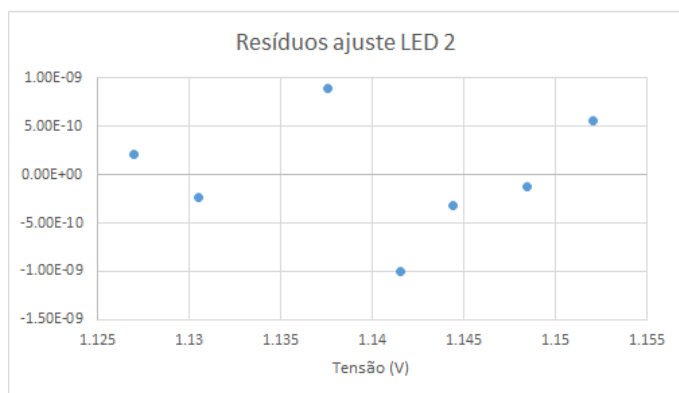
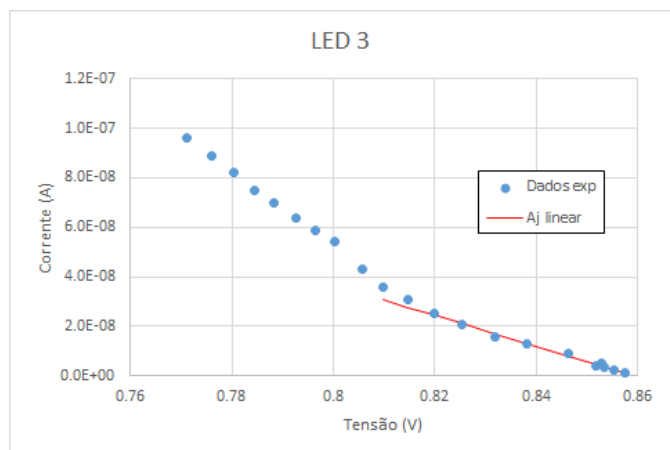


Figura 5: Gráfico do ajuste feito, dos resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste

### 5.1.3 LED 3



|       | Aj gama escolhida |         |       |
|-------|-------------------|---------|-------|
| m=    | -6.2E-07          | 5.3E-07 | b=    |
| s(m)= | 2E-08             | 1E-08   | s(b)= |
| r^2=  | 0.994             | 7E-10   | s(y)= |
|       |                   | 1E-09   | 2σ=   |

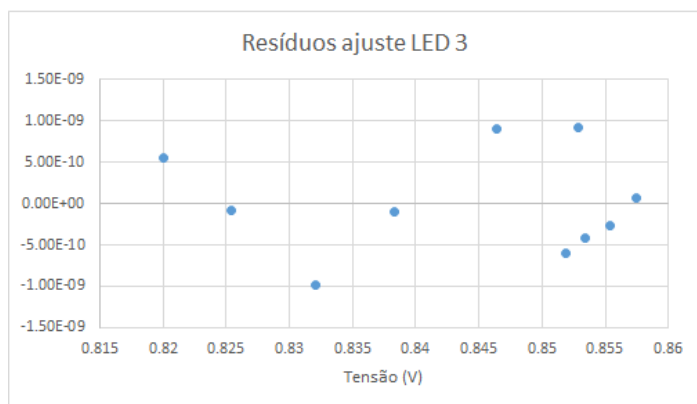
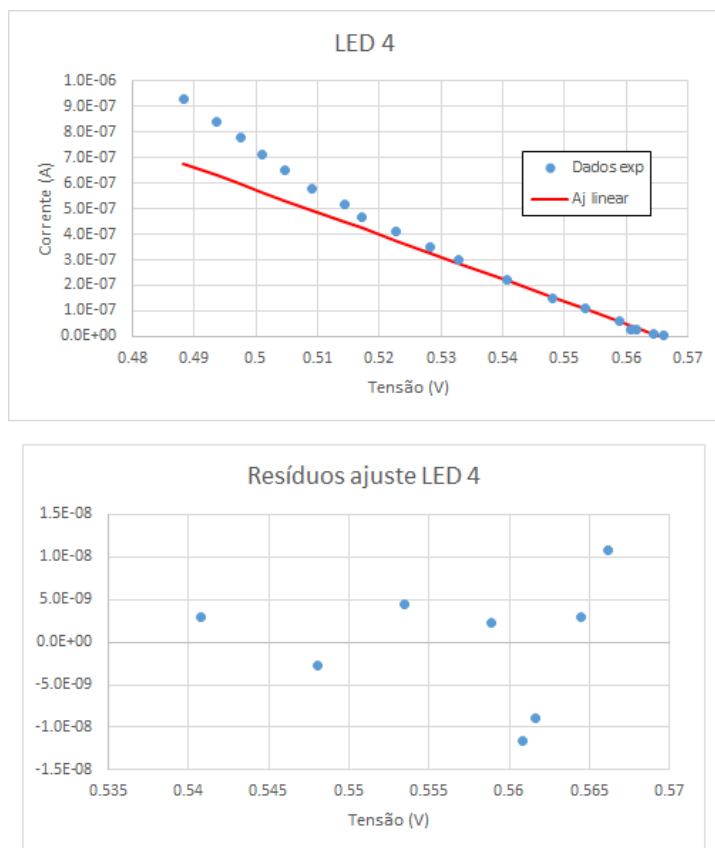


Figura 6: Gráfico do ajuste feito, dos resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste; No gráfico dos pontos é possível observar uma dobra na curva, esta é devida a uma mudança de escala durante as medições

### 5.1.4 LED 4

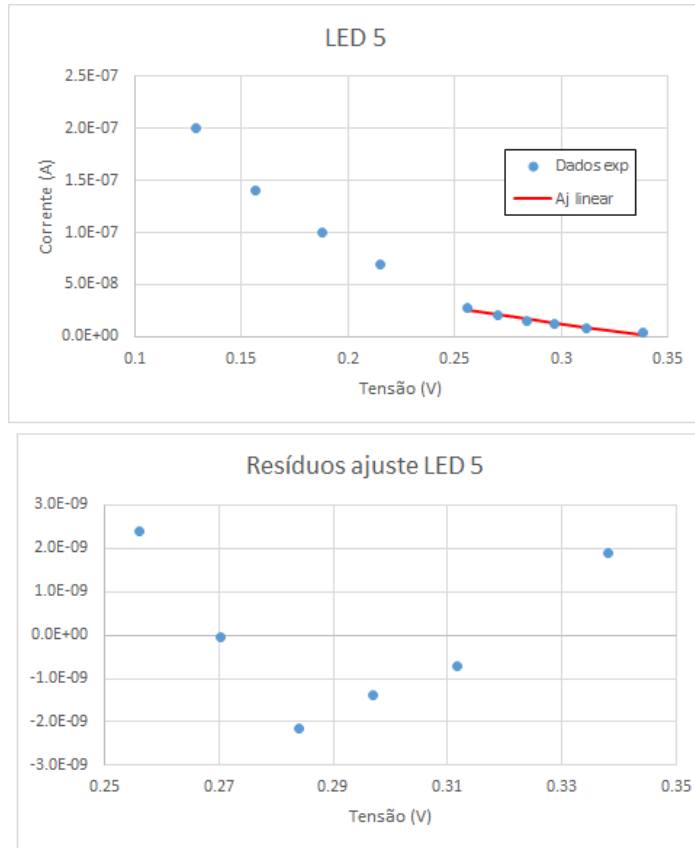


|       | Aj gama escolhida |         |       |
|-------|-------------------|---------|-------|
| m=    | -8.8E-06          | 5.0E-06 | b=    |
| s(m)= | 3E-07             | 2E-07   | s(b)= |
| r^2=  | 0.991             | 8E-09   | s(y)= |
|       |                   | 2E-08   | 2σ=   |

Figura 7: Gráfico do ajuste feito, dos resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste



### 5.1.5 LED 5



|       | Aj gama escolhida |         |       |
|-------|-------------------|---------|-------|
| m=    | -2.9E-07          | 9.9E-08 | b=    |
| s(m)= | 3E-08             | 9E-09   | s(b)= |
| r^2=  | 0.96              | 2E-09   | s(y)= |
|       |                   | 4E-09   | 2σ=   |

Figura 8: Gráfico do ajuste feito, dos resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste

A partir das equações de ajuste foi possível determinar o valor do potencial de paragem correspondente a cada LED (isto foi feito assumindo que  $I=0$ , assim  $V_c = \frac{-b}{m}$ , em que  $b$  e  $m$  são os parâmetros de ajuste lineares). Com isto, foi possível determinar  $h$  e  $W$ :

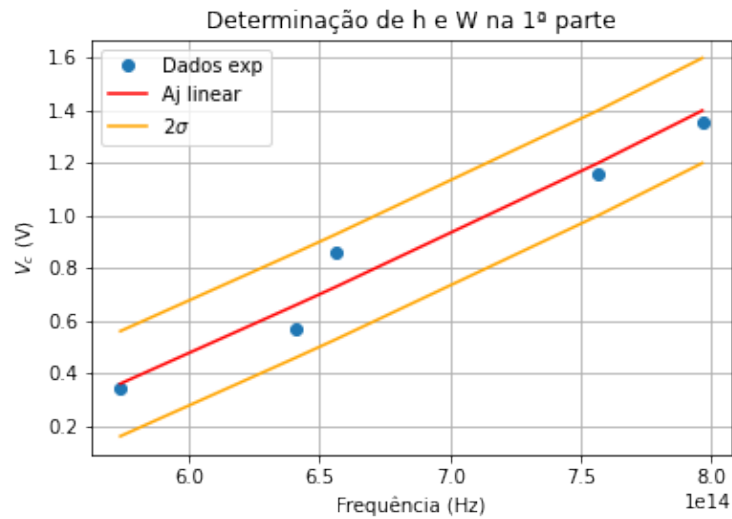
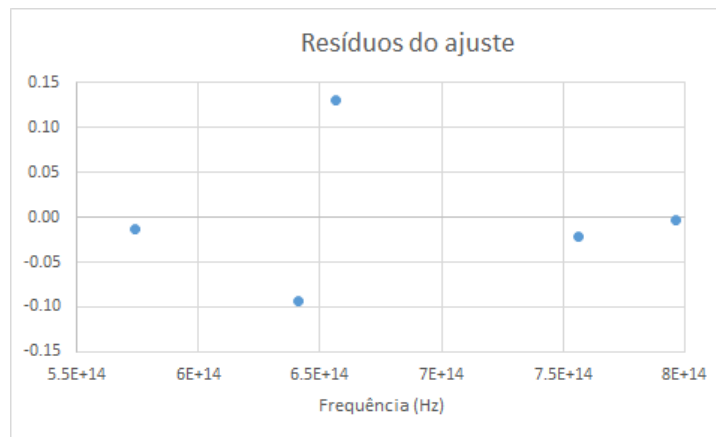


Figura 9: Gráfico da parte A para a determinação de h e W



| Aj total |         |       |       |
|----------|---------|-------|-------|
| m=       | 4.5E-15 | -2.2  | b=    |
| s(m)=    | 5E-16   | 4E-01 | s(b)= |
| r^2=     | 0.96    | 9E-02 | s(y)= |
|          |         | 2E-01 | 2σ=   |

Figura 10: Resíduos obtidos e a tabela com os parâmetros de ajuste

Com isto foi possível obter que  $h = (7.2 \pm 0.8) \times 10^{-34} \text{kg m}^2/\text{s}$  e  $W = (3.5 \pm 0.6) \times 10^{-19} \text{J}$  com erros percentuais de 8.7% e 14%, respetivamente e relativamente aos valores de referência  $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{kg m}^2/\text{s}$  e  $W = 3.12 \times 10^{-19} \text{J}$ . Obteve-se isto, aplicando a equação 2.

Devido à natureza quântica e corpuscular da luz, uma intensidade maior de um feixe luminoso apenas se traduz numa maior quantidade de fotões a serem enviados para o cátodo. Isto apesar de aumentar a quantidade de eletrões excitados não altera a energia de cada uma (porque cada fotão tem a mesma energia associada, eq. 1, porque têm o mesmo comprimento de onda). Por causa disto, a tensão antagonista que é preciso inserir no circuito não depende da intensidade da fonte luminosa [2].

Outro fator que poderia ser uma fonte de erro seria o espectro de emissão da luz libertada pelos LEDs. Devido ao facto desta não ser completamente coerente é possível que apenas uma parte desta seja captada de forma eficiente pela célula fotoelétrica. No entanto, como é possível verificar gráfico 15 (que está em anexo), isto apenas será um fator no caso dos LEDs 7 e 8. No caso desses dois LEDs vai haver um erro sistemático associado à corrente gerada (vai ser menor do que deveria ser por causa de parte do seu espectro de emissão não ser captada tão eficientemente).

## 5.2 Parte B

Nesta parte foi possível realizar dois ensaios de forma a se poder verificar os resultados obtidos. Durante esta parte tiraram-se vários valores da tensão medida para cada LED para depois fazer a média desses valores. Algo notório é o facto de as tensões inicialmente estarem num valor e depois irem lentamente decrescendo à medida que o tempo passa, isto ocorreu para todos os LEDs. Para evitar que este descarregamento afetasse as medições, só se consideraram os valores iniciais, pois como o circuito usado tem uma resistência baixa associada (a dos fios e do condensador) o condensador carrega quase instantaneamente fazendo os valores iniciais mais próximos da tensão de paragem de cada LED.

Assim para o primeiro ensaio obteve-se:

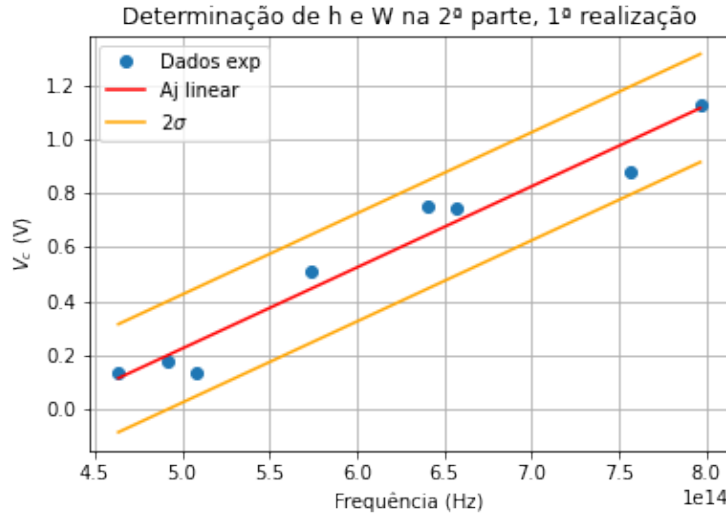


Figura 11: Gráfico do ajuste linear feito

O que corresponde a se ter  $h = (4.8 \pm 0.4) \times 10^{-34} kg \, m^2/s$  (erro percentual de 27%) e  $W = (2.0 \pm 0.3) \times 10^{-19} J$  (erro percentual de 35%).  
Para o segundo:

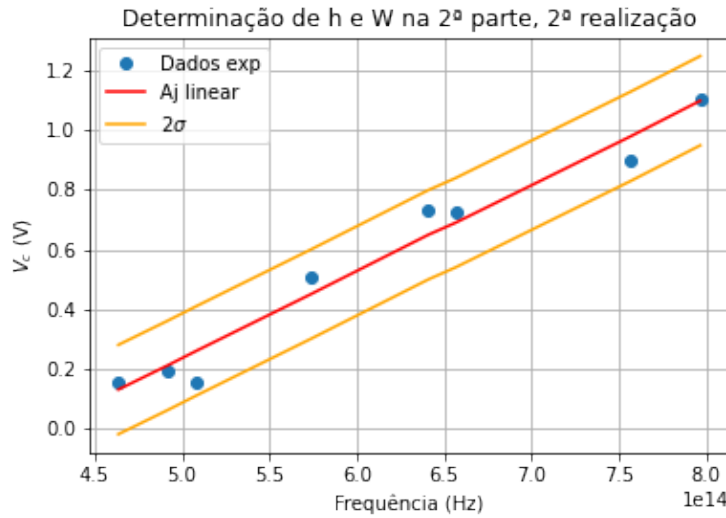


Figura 12: Gráfico do ajuste linear feito

O que corresponde a se ter  $h = (4.7 \pm 0.4) \times 10^{-34} kg \, m^2/s$  (erro percentual

de 29%) e  $W = (2.0 \pm 0.2) \times 10^{-19} J$  (erro percentual de 35%).

Comparando estes valores com os que foram obtidos na parte A é possível observar que os da primeira parte são mais exatos que os da segunda. Assim, as técnicas usadas na parte A são mais adequadas para determinar  $h$ ,  $W$  e, por consequência, os valores dos potenciais de paragem. O erro associado ao declive pode estar relacionada com o facto de se ter utilizado os LEDs com comprimentos de onda maiores, no entanto tentou-se fazer um ajuste sem os últimos LEDs, mas obtiveram-se valores com erros percentuais ainda maiores que anteriormente. O erro na ordenada na origem é esperada, pois verifica-se que todos os valores obtidos da tensão de paragem na parte B são menores que os obtidos na parte A, indicando um erro sistemático inerente ao método de medição.

### 5.3 Lâmpadas de descarga

Uma questão que poderia surgir na realização deste trabalho é a razão pela qual se usaram LEDs em vez de lâmpadas de descarga (como lampadas fluorescentes, que são muito comuns no nosso dia-a-dia). Isto é devido ao facto de LEDs terem um espetro de emissão de potência mais concentrado que lampadas de descarga [1]. Algo que é possível ver no seguinte gráfico retirado de [1]:

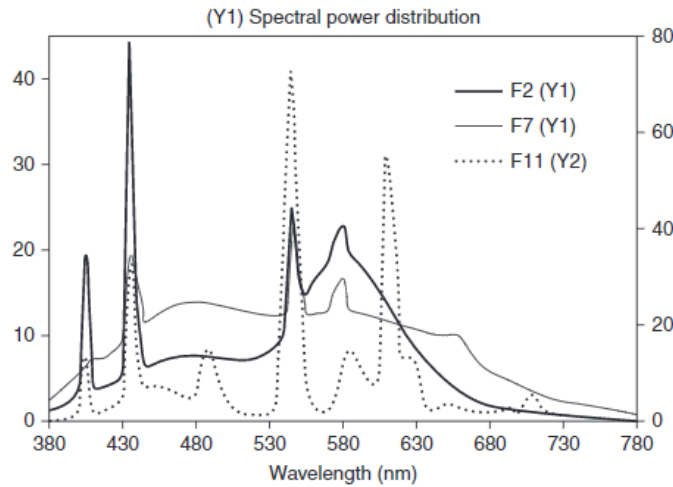


Figura 13: Distribuição espectral de potência de acordo com o comprimento de onda para três lâmpadas diferentes normal (F2), *broad band* (F7) e *three band* (F11); esta distribuição é mais larga, levando a que uma maior percentagem da potência libertada esteja numa região pouco sensível da célula fotoelétrica

## 6 Conclusão

Na parte da experiência em que se determinou o potencial de paragem através da diminuição da corrente induzida foi possível obter  $h = (7.2 \pm 0.8) \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$  e  $W = (3.5 \pm 0.6) \times 10^{-19} \text{ J}$  com erros percentuais de 8.7% e 14%. Enquanto que na parte em que se determinou o potencial de paragem medindo este num condensador em série com a célula fotoelétrica, obteve-se para o primeiro ensaio  $h = (4.8 \pm 0.4) \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$  (erro percentual de 27%) e  $W = (2.0 \pm 0.3) \times 10^{-19} \text{ J}$  (erro percentual de 35%) e no segundo:  $h = (4.7 \pm 0.4) \times 10^{-34} \text{ kg m}^2/\text{s}$  (erro percentual de 29%) e  $W = (2.0 \pm 0.2) \times 10^{-19} \text{ J}$  (erro percentual de 35%).

A partir destes resultados é possível concluir que o método usado na parte A é mais adequada para obter os valores de  $h$ ,  $W$  e, conseqüentemente, dos potenciais de paragem.

Para além disso, foi possível concluir que o comprimento de onda da luz emitida pelo LED é a característica mais importante nos resultados, sendo que a intensidade não é um fator (algo que pode ser comprovado com experiências adicionais).

## 7 Anexo

### 7.1 Limites de funcionamento da célula fotoelétrica

A célula fotoelétrica utilizada tem um regime de melhor funcionamento que depende do comprimento de onda da luz incidente:

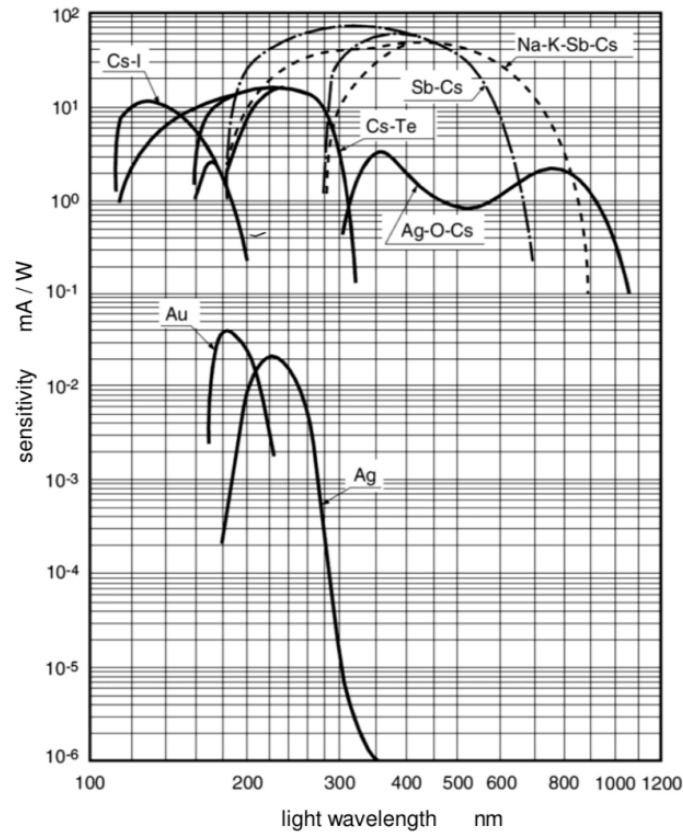


Figura 14: Gráfico do regime de melhor funcionamento da célula fotoelétrica *Phywe PhotoCell*–06779–00, sendo isto na gama de 185-650 nm e com máxima sensibilidade a 340 nm

## 7.2 Comprimentos de onda dos LEDs disponíveis para a experiência

Durante a experiência começou-se por realizar medições com os LEDs com comprimentos de onda menores, por serem aqueles que libertam luz que é melhor captada pela célula fotoelétrica. Por exemplo, nem se usou o LED 9 porque a corrente originada no circuito era residual.

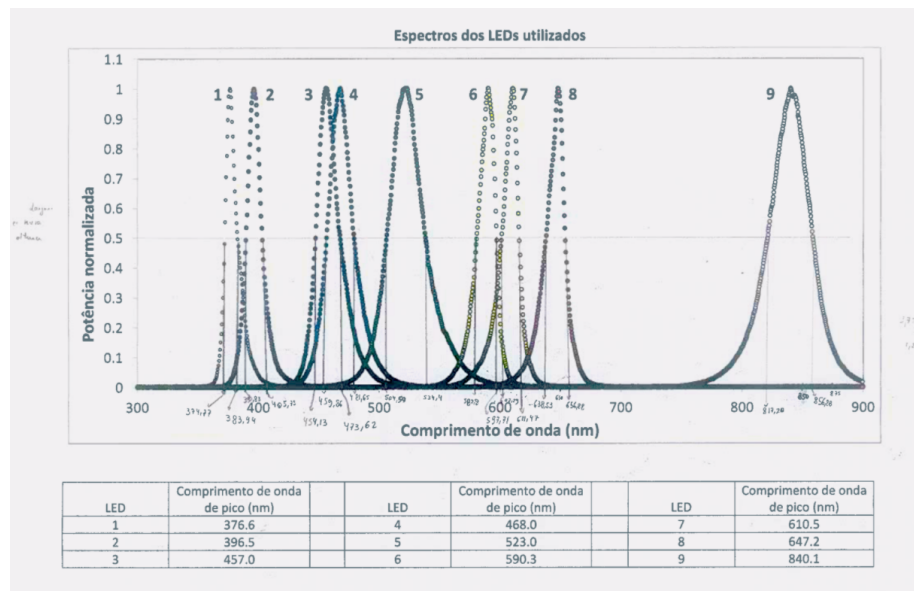


Figura 15: Gráfico da potência da luz libertada pelos diferentes LEDs em função do comprimento de onda; Tabela com os valores do comprimento de onda de pico dos LEDs



## 7.3 Dados retirados

### 7.3.1 Parte A

|                   |                          |        |               |         |
|-------------------|--------------------------|--------|---------------|---------|
|                   |                          |        |               |         |
|                   | LED 1                    |        |               |         |
|                   |                          |        |               |         |
|                   | corrente (micro amperes) | u(I)   | tensão (volt) | u(V)    |
|                   | 0.510                    | 0.005  | 0.96284       | 0.00001 |
|                   | 0.390                    | 0.005  | 1.00135       | 0.00001 |
|                   | 0.270                    | 0.005  | 1.04872       | 0.00001 |
|                   | 0.180                    | 0.005  | 1.09654       | 0.00001 |
|                   | 0.100                    | 0.005  | 1.15713       | 0.00001 |
| mudança de escala | 0.05                     | 0.0005 | 1.2012        | 0.0001  |
|                   | nano amperes             |        |               |         |
| mudança de escala | 47.0                     | 0.5    | 1.2343        | 0.0001  |
|                   | 35.0                     | 0.5    | 1.2560        | 0.0001  |
|                   | 30.0                     | 0.5    | 1.2671        | 0.0001  |
|                   | 25.0                     | 0.5    | 1.2790        | 0.0001  |
|                   | 18.0                     | 0.5    | 1.2925        | 0.0001  |
|                   | 12.0                     | 0.5    | 1.3090        | 0.0001  |
|                   | 5.0                      | 0.5    | 1.3290        | 0.0001  |
| mudança de escala | 4.00                     | 0.05   | 1.3350        | 0.0001  |
|                   | 3.00                     | 0.05   | 1.3395        | 0.0001  |
|                   | 2.50                     | 0.05   | 1.3418        | 0.0001  |
|                   | 1.80                     | 0.05   | 1.3449        | 0.0001  |
|                   | 1.00                     | 0.05   | 1.3495        | 0.0001  |
|                   | 0.50                     | 0.05   | 1.3510        | 0.0001  |
|                   |                          |        |               |         |
|                   |                          |        |               |         |
|                   |                          |        |               |         |
|                   | LED 2                    |        |               |         |
|                   |                          |        |               |         |
|                   | corrente (nano amperes)  | u(I)   | tensão (volt) | u(V)    |
|                   | 89.0                     | 0.5    | 0.91119       | 0.00001 |
|                   | 80.0                     | 0.5    | 0.92552       | 0.00001 |
|                   | 75.0                     | 0.5    | 0.93441       | 0.00001 |
|                   | 66.0                     | 0.5    | 0.94745       | 0.00001 |
|                   | 58.0                     | 0.5    | 0.96108       | 0.00001 |
|                   | 51.0                     | 0.5    | 0.97601       | 0.00001 |
|                   | 48.0                     | 0.5    | 0.98212       | 0.00001 |
|                   | 40.0                     | 0.5    | 0.99965       | 0.00001 |
|                   | 32.0                     | 0.5    | 1.01947       | 0.00001 |
|                   | 25.0                     | 0.5    | 1.04294       | 0.00001 |
|                   | 19.0                     | 0.5    | 1.06265       | 0.00001 |
|                   | 11.0                     | 0.5    | 1.09349       | 0.00001 |
|                   | 6.0                      | 0.5    | 1.12115       | 0.00001 |
| mudança de escala | 3.80                     | 0.05   | 1.12697       | 0.00001 |
|                   | 3.30                     | 0.05   | 1.13050       | 0.00001 |
|                   | 2.50                     | 0.05   | 1.13758       | 0.00001 |
|                   | 1.80                     | 0.05   | 1.14155       | 0.00001 |
|                   | 1.50                     | 0.05   | 1.14441       | 0.00001 |
|                   | 1.00                     | 0.05   | 1.14844       | 0.00001 |
|                   | 0.60                     | 0.05   | 1.15207       | 0.00001 |

|                   | LED 3                   |       |               |         |
|-------------------|-------------------------|-------|---------------|---------|
|                   | corrente (nano amperes) | u(I)  | tensão (volt) | u(V)    |
|                   | 9.60                    | 0.05  | 0.77118       | 0.00001 |
|                   | 8.90                    | 0.05  | 0.77613       | 0.00001 |
|                   | 8.20                    | 0.05  | 0.78031       | 0.00001 |
|                   | 7.50                    | 0.05  | 0.78462       | 0.00001 |
|                   | 7.00                    | 0.05  | 0.78838       | 0.00001 |
|                   | 6.40                    | 0.05  | 0.79268       | 0.00001 |
|                   | 5.90                    | 0.05  | 0.79643       | 0.00001 |
|                   | 5.40                    | 0.05  | 0.80020       | 0.00001 |
|                   | 4.30                    | 0.05  | 0.80568       | 0.00001 |
|                   | 3.60                    | 0.05  | 0.80987       | 0.00001 |
|                   | 3.10                    | 0.05  | 0.81468       | 0.00001 |
|                   | 2.50                    | 0.05  | 0.82003       | 0.00001 |
|                   | 2.10                    | 0.05  | 0.82543       | 0.00001 |
|                   | 1.60                    | 0.05  | 0.83205       | 0.00001 |
|                   | 1.30                    | 0.05  | 0.83830       | 0.00001 |
|                   | 0.90                    | 0.05  | 0.84637       | 0.00001 |
|                   | 0.50                    | 0.05  | 0.85283       | 0.00001 |
| mudança de escala | 0.41                    | 0.005 | 0.85184       | 0.00001 |
|                   | 0.33                    | 0.005 | 0.85342       | 0.00001 |
|                   | 0.22                    | 0.005 | 0.85542       | 0.00001 |
|                   | 0.13                    | 0.005 | 0.85742       | 0.00001 |

| LED 4             |                         |      |                    |         |
|-------------------|-------------------------|------|--------------------|---------|
|                   |                         |      |                    |         |
|                   |                         |      |                    |         |
|                   | corrente (nano amperes) | u(I) | tensão (volt)      | u(V)    |
|                   | 93.0                    | 0.5  | 0.48827            | 0.00001 |
|                   | 84.0                    | 0.5  | 0.49371            | 0.00001 |
|                   | 78.0                    | 0.5  | 0.49747            | 0.00001 |
|                   | 71.0                    | 0.5  | 0.50096            | 0.00001 |
|                   | 65.0                    | 0.5  | 0.50468            | 0.00001 |
|                   | 58.0                    | 0.5  | 0.50921            | 0.00001 |
|                   | 52.0                    | 0.5  | 0.51450            | 0.00001 |
|                   | 47.0                    | 0.5  | 0.51723            | 0.00001 |
|                   | 41.0                    | 0.5  | 0.52270            | 0.00001 |
|                   | 35.0                    | 0.5  | 0.52824            | 0.00001 |
|                   | 30.0                    | 0.5  | 0.53282            | 0.00001 |
|                   | 22.0                    | 0.5  | 0.54075            | 0.00001 |
|                   | 15.0                    | 0.5  | 0.54808            | 0.00001 |
|                   | 11.0                    | 0.5  | 0.55345            | 0.00001 |
|                   | 6.0                     | 0.5  | 0.55889            | 0.00001 |
| mudança de escala | 2.90                    | 0.05 | 0.56084            | 0.00001 |
|                   | 2.50                    | 0.05 | 0.56160            | 0.00001 |
|                   | 1.20                    | 0.05 | 0.56444            | 0.00001 |
|                   | 0.50                    | 0.05 | 0.56613            | 0.00001 |
|                   |                         |      |                    |         |
| LED 5             |                         |      |                    |         |
|                   |                         |      |                    |         |
|                   |                         |      |                    |         |
|                   | corrente (nano amperes) | u(I) | tensão (mili volt) | u(V)    |
|                   | 50.0                    | 0.5  | 34.001             | 0.001   |
|                   | 41.0                    | 0.5  | 61.522             | 0.001   |
|                   | 27.0                    | 0.5  | 102.075            | 0.001   |
|                   |                         |      | volts              |         |
|                   | 20.0                    | 0.5  | 0.12868            | 0.00001 |
|                   | 14.0                    | 0.5  | 0.15649            | 0.00001 |
|                   | 10.0                    | 0.5  | 0.18827            | 0.00001 |
|                   | 7.0                     | 0.5  | 0.21545            | 0.00001 |
| mudança de escala | 2.75                    | 0.03 | 0.25625            | 0.00001 |
|                   | 2.10                    | 0.03 | 0.27032            | 0.00001 |
|                   | 1.50                    | 0.03 | 0.28392            | 0.00001 |
|                   | 1.20                    | 0.03 | 0.29705            | 0.00001 |
|                   | 0.85                    | 0.03 | 0.31154            | 0.00001 |
|                   | 0.35                    | 0.03 | 0.33807            | 0.00001 |

Figura 16: Tabelas com os valores medidos na Parte A da experiência

### 7.3.2 Parte B

|       | tensão (volt) | incerteza |
|-------|---------------|-----------|
| LED 1 | 1.13063       | 0.00001   |
| LED 2 | 0.87854       | 0.00001   |
|       | 0.87730       | 0.00001   |
|       | 0.87980       | 0.00001   |
|       | 0.88050       | 0.00001   |
|       | 0.88160       | 0.00001   |
| LED 3 | 0.74382       | 0.00001   |
|       | 0.74381       | 0.00001   |
|       | 0.74395       | 0.00001   |
|       | 0.74396       | 0.00001   |
|       | 0.74409       | 0.00001   |
| LED 4 | 0.74859       | 0.00001   |
|       | 0.74870       | 0.00001   |
|       | 0.74905       | 0.00001   |
|       | 0.74940       | 0.00001   |
| LED 5 | 0.51170       | 0.00001   |
|       | 0.51177       | 0.00001   |
|       | 0.51180       | 0.00001   |
|       | 0.51186       | 0.00001   |
| LED 6 | 0.13950       | 0.00001   |
|       | 0.13943       | 0.00001   |
|       | 0.13935       | 0.00001   |
|       | 0.13910       | 0.00001   |
| LED 7 | 0.17568       | 0.00001   |
|       | 0.17545       | 0.00001   |
|       | 0.17535       | 0.00001   |
|       | 0.17520       | 0.00001   |
| LED 8 | 0.13576       | 0.00001   |
|       | 0.13576       | 0.00001   |
|       | 0.13544       | 0.00001   |

Figura 17: Tabelas com os valores medidos na Parte B da experiência no primeiro ensaio

|       | tensão (volt) | incerteza |
|-------|---------------|-----------|
| LED 1 | 1.10207       | 0.00001   |
|       | 1.10205       | 0.00001   |
|       | 1.10210       | 0.00001   |
|       | 1.10206       | 0.00001   |
|       | 1.10204       | 0.00001   |
| LED 2 | 0.89638       | 0.00001   |
|       | 0.89675       | 0.00001   |
|       | 0.89655       | 0.00001   |
|       | 0.89765       | 0.00001   |
|       | 0.9015        | 0.0001    |
|       | 0.9016        | 0.0001    |
| LED 3 | 0.7276        | 0.0001    |
|       | 0.7275        | 0.0001    |
|       | 0.7274        | 0.0001    |
|       | 0.7275        | 0.0001    |
|       | 0.7275        | 0.0001    |
| LED 4 | 0.7345        | 0.0001    |
|       | 0.7346        | 0.0001    |
|       | 0.7345        | 0.0001    |
|       | 0.7346        | 0.0001    |
|       | 0.7347        | 0.0001    |
|       | 0.7347        | 0.0001    |
|       | 0.7346        | 0.0001    |
| LED 5 | 0.5066        | 0.0001    |
|       | 0.5065        | 0.0001    |
|       | 0.5066        | 0.0001    |
|       | 0.5067        | 0.0001    |
|       | 0.5066        | 0.0001    |
| LED 6 | 0.1516        | 0.0001    |
|       | 0.1516        | 0.0001    |
|       | 0.1513        | 0.0001    |
|       | 0.1510        | 0.0001    |
|       | 0.1511        | 0.0001    |
|       | 0.1508        | 0.0001    |
| LED 7 | 0.1938        | 0.0001    |
|       | 0.1940        | 0.0001    |
|       | 0.1939        | 0.0001    |
| LED 8 | 0.1025        | 0.0001    |
|       | 0.1022        | 0.0001    |
|       | 0.1023        | 0.0001    |
|       | 0.2021        | 0.0001    |
|       | 0.1027        | 0.0001    |
|       | 0.1024        | 0.0001    |
|       | 0.1021        | 0.0001    |

Figura 18: Tabelas com os valores medidos na Parte B da experiência no segundo ensaio

## Referências

- [1] Asim Kumar Roy Choudhury. *Principles of Colour and Appearance and Measurement*. Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [2] Maria de Fátima Mota. Aula 2 de física moderna - efeito fotoelétrico. DFA, FCUP.
- [3] Wikipedia. Work function. [https://en.wikipedia.org/wiki/Work\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Work_function).