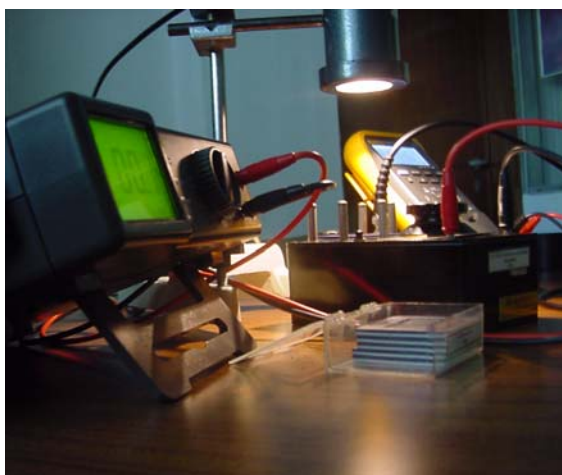


7

Fotões que ‘arrancam’ electrões — O efeito fotoeléctrico em metais

- *Demonstrar o efeito fotoeléctrico*
- *Compreender o funcionamento de alguns dispositivos foto-sensíveis*
- *Determinar os parâmetros que controlam a emissão de fotoelectrões de superfícies metálicas*
- *Exemplificar um método de medir a função de trabalho de uma superfície*
- *Estimar a constante de Planck*



Introdução

Os dispositivos foto-sensíveis emitem electrões quando sujeitos à luz visível ou a radiação de frequência superior (ultra-violeta e radiação X). Estes dispositivos tem aplicações comuns em vários sensores como as fotocélulas usadas como detectores de radiação.

Foi no fim do século XIX que se verificou que algumas superfícies metálicas emitiam electrões quando irradiados com luz visível ou ultra-violeta. No entanto, surpreendentemente verificou-se que a energia dos electrões emitidos não dependia da intensidade da luz mas apenas da sua cor. Este fenómeno não podia ser explicado com base na teoria ondulatória da radiação que previa que a energia fosse igualmente transportada tanto pela intensidade (amplitude da onda) como pela sua frequência. A experiência demonstrava que a luz violeta, mesmo que pouco intensa, era capaz de produzir a emissão de electrões de algumas superfícies metálicas, enquanto que a luz vermelha não— mesmo que fosse muito intensa. É este fenó-

meno que foi designado de efeito fotoeléctrico.

A forma como a radiação electromagnética transporta energia, apenas foi bem descrita em 1905 quando Einstein propôs a hipótese da existência de um corpúsculo ou *quantum* de radiação com uma energia

$$E = h\nu \quad (\text{Eq. 1})$$

onde h é a designada constante de Planck e ν a frequência da radiação. Esta hipótese explicava muito bem o efeito fotoeléctrico porque descrevia a radiação como transportando energia, não de uma forma contínua (como na descrição ondulatória), mas em pacotes ou *quanta* com uma energia individual igual a $h\nu$. Foram estes corpúsculos de radiação que se passaram a designar de fótons.

A hipótese de Einstein foi mais tarde confirmada experimentalmente por Millikan que determinou com extraordinária acuidade a constante de Planck.

Verificação experimental

Considere-se o arranjo experimental esquematizado na Fig. 1. Quando a luz incide no cátodo os electrões do metal podem absorver uma parte desta radiação.

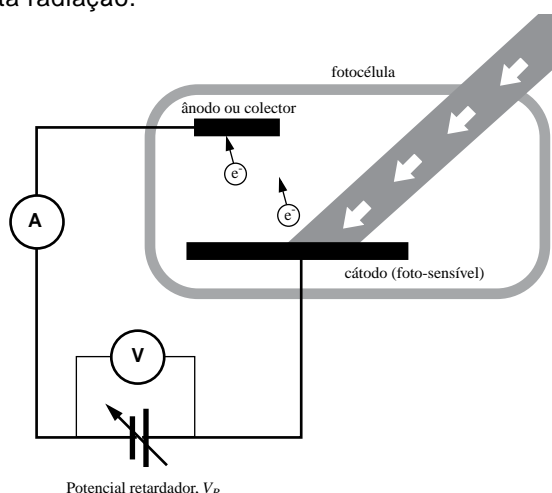


Figura 1. Verificação experimental do efeito fotoeléctrico. Quando o cátodo é irradiado com luz alguns electrões são emitidos e colectados no ânodo.

A radiação é absorvida sob a forma de energia cinética produzindo a libertação desses electrões dos metais. (Os electrões emitidos em resultado da absorção de um fóton, são designados por fotoelectrões). Se existir uma outra superfície metálica na proximidade, alguns fotoelectrões podem ser colectados e a corrente eléctrica produzida pode ser medida.

Os electrões emitidos têm uma energia que depende da energia da radiação incidente, conforme descrita pela Eq. 1. Fótons mais energéticos (maior frequência) produzirão a emissão de electrões com mais energia.

Se se aplicar um potencial retardador no ânodo em relação ao cátodo, os electrões emitidos encontrarão um campo repulsivo, que apenas será vencido se a sua energia cinética inicial for superior à energia potencial associada ao campo repulsivo.

O aumento gradual do potencial retardador, produzirá primeiro um decréscimo da corrente colectada e depois a sua extinção. A determinação deste potencial de extinção pode ser directamente relacionado com a energia dos fótons incidentes. Para o estabelecimento exacto dessa relação é necessário estabelecer alguns fundamentos teóricos relativos a condutores.

Condutores e função de trabalho

Num metal, os electrões mais exteriores dos átomos, estão tão fracamente ligados aos seus núcleos que podem se movimentar livremente por todo o volume metálico. É a existência destas cargas 'livres' que torna os metais bons condutores eléctricos. Os níveis energéticos destes electrões são tão próximos que normalmente são descritos por uma banda, designada de condução.

Nas superfícies, existe uma barreira de potencial que 'mantém' os electrões dentro do metal (ou abaixo do nível do vácuo). Para que os electrões possam abandonar a superfícies é necessário que transportem uma energia cinética superior a essa barreira. Esta barreira é designada por função de trabalho, ϕ e depende dos metais e do estado da

sua superfície. Pode ter valores entre 1,5 eV (para metais alcalinos) e 6 eV (para algumas superfícies metálicas oxidadas).

Considere-se agora a Fig. 2. O fotoelectrão quando abandona o cátodo em resultado da absorção de um fóton de energia $h\nu$ é emitido com uma energia cinética máxima (será inferior se não for emitido do topo da banda de condução)

$$E_{c,max} = h\nu - \phi_1 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde ϕ_1 é a função de trabalho da superfície irradiada.

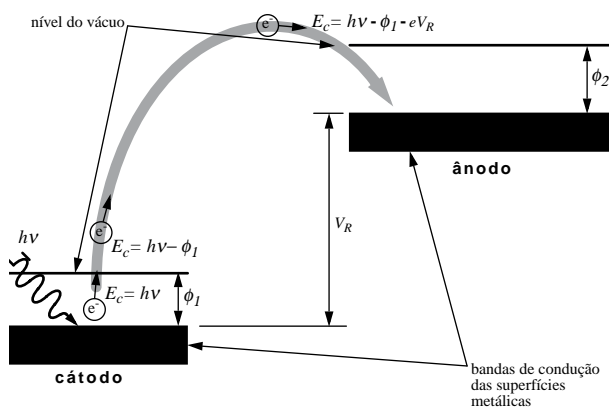


Figura 2. Energias e potenciais na experiência do efeito fotoelétrico. Quando se estabelece uma diferença de potencial entre dois condutores, esta diferença aparece entre o topo das bandas de condução de cada condutor.

Tabela 1. Grandezas e unidades

Grandeza	Unidades (SI, outras)
Energia	joule (J), eV ($1,6 \times 10^{-19}$ J)
Comprimento de onda, λ	metro (m), Å (10^{-10} m)
Função de trabalho, ϕ	joule (J), eV ($1,6 \times 10^{-19}$ J)

Se o ânodo estiver ao mesmo potencial do cátodo, então o fotoelectrão ao ser colectado fica com uma energia máxima

$$E_{c,max} = h\nu - \phi_1 \quad (\text{Eq. 3})$$

A aplicação de um potencial retardador V_R produz

uma diminuição desta energia. Quando o potencial retardador iguala a energia máxima (potencial de extinção, $V_{R,o}$) verifica-se a relação:

$$h\nu - \phi_1 - eV_{R,o} = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

ou

$$eV_{R,o} = h\nu - \phi_1 \quad (\text{Eq. 5})$$

onde e é carga do electrão. Atendendo a que

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{Eq. 6})$$

(c é a velocidade da luz) a Eq. 5 pode ser escrita na forma

$$V_{R,o} = -\frac{\phi_1}{e} + \frac{hc}{e\lambda} \quad (\text{Eq. 7})$$

A Eq. 7 quando representada graficamente em função de $1/\lambda$ descreve uma recta com um declive hc/e e uma ordenada na origem $-\phi_1/e$. O valor desta ordenada permite obter uma medida directa (em eV) da função de trabalho da superfície irradiada.

Tabela 2. Algumas relações e constantes importantes

Energia de um fóton	$E = h\nu$
Energia máxima de um fotoelectrão (na ausência de campo exterior)	$E_{c,max} = h\nu - \phi_1$
Relação entre o potencial de extinção, $V_{R,o}$ e λ	$V_{R,o} = -\frac{\phi_1}{e} + \frac{hc}{e\lambda}$
Constante de Planck, h	$6,626 \times 10^{-34}$ J.s
Carga do electrão, e	$1,6021 \times 10^{-19}$ C
Velocidade da luz no vácuo (ou ar), c	$2,997 \times 10^8$ m.s ⁻¹

Para se poder obter experimentalmente várias medidas de V_R é necessário usar radiação monocromática, isto, é, com apenas um comprimento de onda ou então com uma banda estreita de comprimentos de onda. Para esse fim podemos fazer uso de filtros de luz e de uma lâmpada incandescente. Este tipo de lâmpadas produz um espectro de radiação suficientemente largo, desde o vermelho até ao violeta, cujos comprimentos de onda podem ser seleccionados com filtros para as

medidas pretendidas.

Neste trabalho iremos utilizar uma válvula comercial foto-sensível que pode ser usada, por exemplo, como sensor de passagem. Quando a luz incidente é interrompida, a corrente eléctrica produzida pelos fotoelectrões deixa de existir podendo então ser accionado qualquer outro dispositivo. O cátodo desta válvula é constituído por uma liga de cézio e antimónio que tem uma função de trabalho muito baixa (entre 1,5 e 1,9 eV). Um pequeno ânodo em frente ao cátodo permite colectar a corrente eléctrica.

Tabela 3. Energias e cores

Cor	Energia do fóton, (eV)	Frequência ($\times 10^{12}$ Hz)	Comprimento de onda, λ (Å)
Vermelho	2,00	484	3800
Laranja	2,16	522	5750
Amarelo/verde	2,34	566	5300
Turquesa	2,64	638	4700
Azul	2,76	667	4500
Violeta	3,27	789	3800

Equipamento

É necessário o seguinte equipamento para a realização da montagem experimental:

- 1 unidade com uma célula fotoeléctrica e fonte de tensão ajustável.
- 1 lâmpada de filamento e 1 tripé
- 2 multímetros.
- 2 cabos banana/banana.
- 1 cabo BNC/banana.
- 1 conjunto de filtros com bandas passantes conhecidas.

A montagem está ilustrada na Fig. 3. Alguns dos equipamentos indicados podem ser substituídos por outros com especificações equivalentes.

Montagem experimental

1. Identifique as unidades, o equipamento necessário e os pontos de ligação dos cabos.
2. Estabeleça as ligações conforme o esquema ilustrado na Fig. 3.

3. Coloque o suporte da lâmpada a aproximadamente 5 cm da unidade que contém a fotocélula.
4. Seleccione no multímetro 1 uma escala de 200 mV (alguns multímetros têm escolha automática de escala). O multímetro neste modo, permite a medição indirecta de correntes muito pequenas. Tendo em conta que a resistência interna do multímetro no modo voltímetro é de $10\text{ M}\Omega$, a leitura de 1 mV equivale a uma passagem de corrente de $1\text{ mV}/10\text{ M}\Omega=100\text{ nA}$.
5. Seleccione no multímetro 2 uma escala de 2 V.

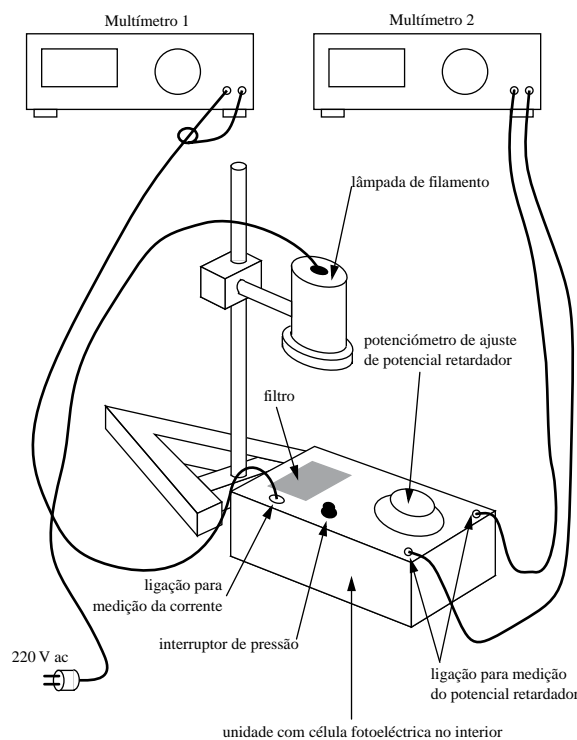


Figura 3. Montagem experimental.

Medidas a obter

Determinação do variação da corrente de fotoelectrões em função do potencial retardador:

1. Monte o filtro vermelho. Coloque o potencial retardador a 0 V e meça a corrente (tensão).
2. Aumente o potencial retardador e meça de novo a corrente (tensão). Obtenha cerca de 6 pontos

até atingir uma corrente nula. Registe pelo menos 2 pontos próximos de uma corrente nula.

3. Repita 1 e 2 com os filtros laranja, amarelo/verde e azul.

Determinação da variação da corrente de fotoelectrões em função da intensidade luminosa:

4. Aumente a distância da lâmpada à célula para aproximadamente o dobro (≈ 10 cm).
5. Repita os pontos 1 e 2 com o filtro vermelho e com o filtro azul.

Determinação dos potenciais de extinção:

6. Coloque de novo a lâmpada a 5 cm da unidade com a fotocélula.
7. Obtenha o potencial retardador que anula a corrente de fotoelectrões para cada filtro.

Proceda ao tratamento dos resultados, conforme as questões em anexo.

Exemplo de medida

Na Fig. 4 está representado o resultado das medições da corrente de fotoelectrões em função do potencial retardador para os 4 filtros indicados.

Pode-se observar que, quanto mais energética é a luz, mais potencial eléctrico é necessário para anular a corrente produzida pelo fotoelectrões. As diferentes intensidades iniciais indicam que a lâmpada tem uma distribuição não uniforme de intensidade em função da frequência (e provavelmente que os filtros têm uma transmissão que é diferente de cor para cor).

A Fig. 5 representa a variação da corrente medida em função da intensidade luminosa. O afastamento da lâmpada produziu uma diminuição de intensidade da radiação sobre a fotocélula, mas não afectou o potencial de extinção (as pequenas diferenças observadas são essencialmente devidas à dificuldade de medir as correntes muito baixas).

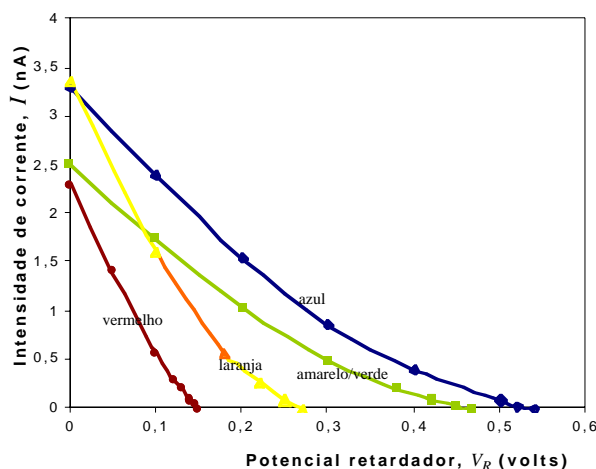


Figura 4. Corrente de fotoelectrões em função do potencial retardador. É evidente que com a luz vermelha (menos energética) é necessário um potencial retardador menor que com a luz azul (mais energética). As linhas que unem os pontos medidos são apenas para facilitar a sua identificação.

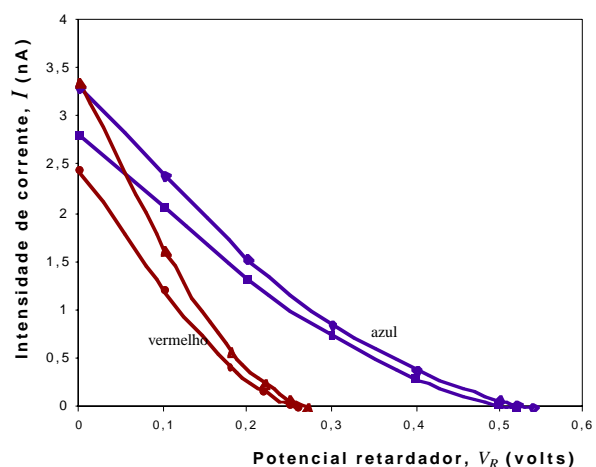
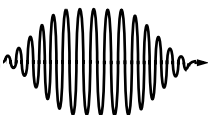


Figura 5. Corrente de fotoelectrões em função da intensidade luminosa. Os pontos com menor intensidade foram obtidos com a lâmpada mais afastada. Pode-se observar que o potencial de extinção não é afectado pela diminuição de intensidade luminosa. As linhas que unem os pontos medidos são apenas para facilitar a sua identificação.

Por fim, na Fig. 6 está representado o potencial de extinção em função do filtro usado ($1/\lambda$). A recta foi traçada por aplicação da Eq. 7 e usando o valor conhecido para as constantes.



Os primeiros pontos (que correspondem a medidas obtidas com maiores comprimentos de onda) ajustam-se bastante bem à recta representada. É importante lembrar que o declive da recta é determinado pela constante de Planck, pelo que não deve ser considerado um factor de ajuste.

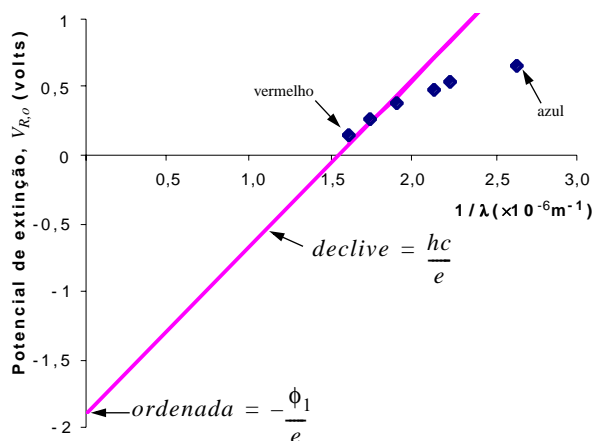


Figura 6. Potencial de extinção em função de $1/\lambda$. A recta representada é a aplicação da Eq. 7 usando o valor tabelado da constante de Planck.

Qual pode ser o motivo do desvio crescente observado nas medidas efectuadas com maiores comprimentos de onda? Um dos motivos, é que o ânodo também pode ser sensível à luz e emitir fotoelectrões. Provavelmente o ânodo tem uma função de trabalho superior ao cátodo o que o torna foto-sensível apenas para certos comprimentos de onda (maiores energias). E, embora o ânodo não seja iluminado directamente, pode receber luz por reflexão no cátodo de alguma radiação. Nesta situação, uma corrente nula no ânodo equivale à soma de duas correntes de electrões, em sentidos opostos e não devido à repulsão dos fotoelectrões emitidos do cátodo.

A intersecção da recta no eixo das ordenadas permite a determinação da função de trabalho. Obteve-se o valor de 1,9 eV, o que é um valor aceitável para uma superfície de césio e antimónio.



Fotões que ‘arrancam’ electrões— Relatório

Nomes:

1-

2-

3-

Data

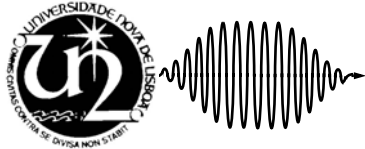
Licenciatura

Grupo

(Não use este relatório como rascunho)

Registo dos dados

Registe o que achar necessário para a correcta identificação da sua experiência (poderão, eventualmente, ser usadas condições diferentes das indicados).



Dados obtidos

Preencha as seguintes tabelas.

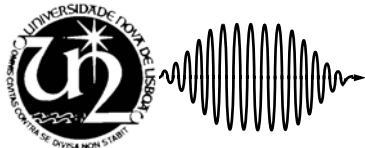
Obtenha a corrente dos fotoelectrões por dividir o valor medido em mV por $10^7 \Omega$.

Tabela 1. Valores obtidos da variação do potencial retardador.

Filtro	Potencial retardador, V_R (volts)	Corrente de fotoelectrões (mV)	Corrente de fotoelectrões, (nA)
Vermelho			

Tabela 2. Valores obtidos da variação do potencial retardador.

Filtro	Potencial retardador, V_R (volts)	Corrente de fotoelectrões (mV)	Corrente de fotoelectrões, (nA)
Amarelo/verde			



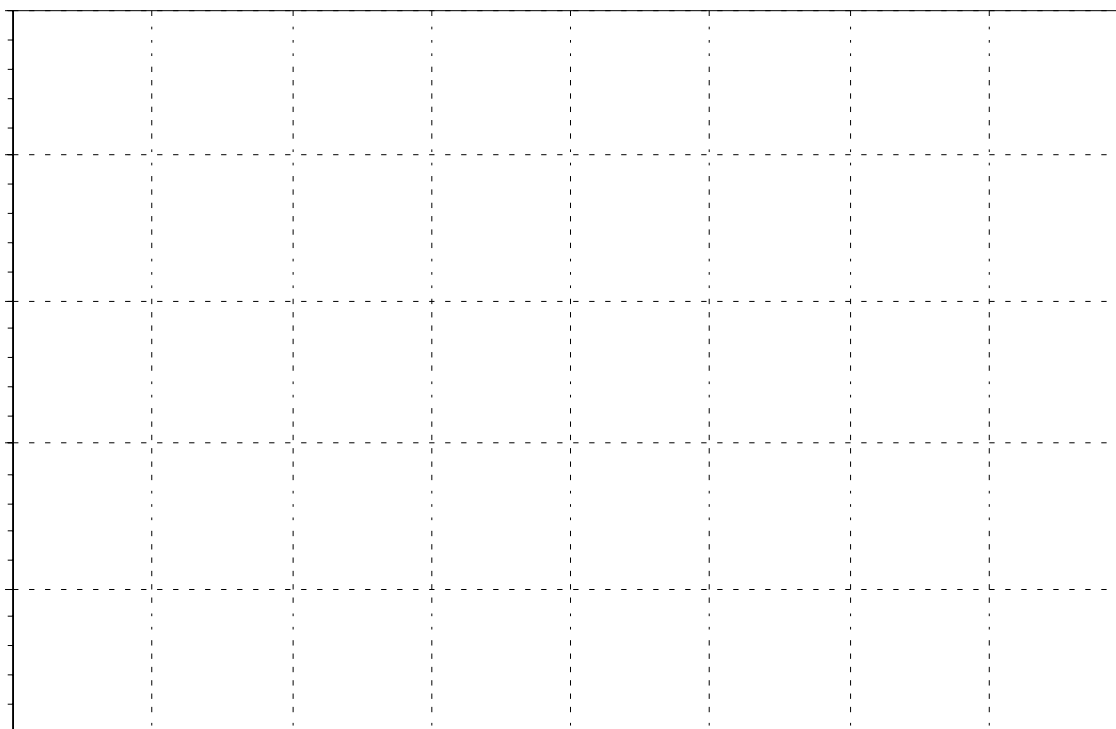
Visto que os filtros têm uma banda de comprimentos de onda que deixa passar, na tabela abaixo use os comprimentos de onda capazes de produzir a maior energia de emissão dos fotoelectrões.

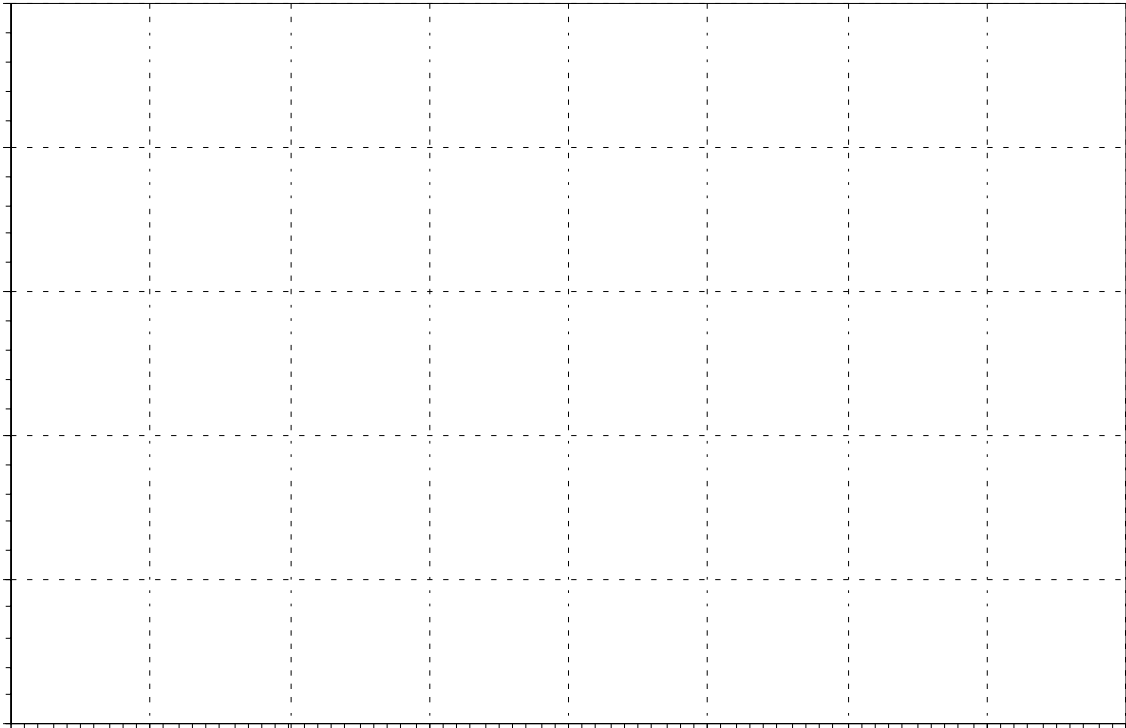
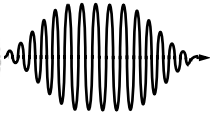
Tabela 5. Potenciais de extinção

Filtro	Comprimento de onda (Å)	$1/\lambda$ ($\times 10^6 \text{ m}^{-1}$)	Potencial de extinção, $V_{R,0}$ (volts)
Vermelho			
Laranja			
Amarelo/verde			
Verde/azul			
Azul			
Violeta			

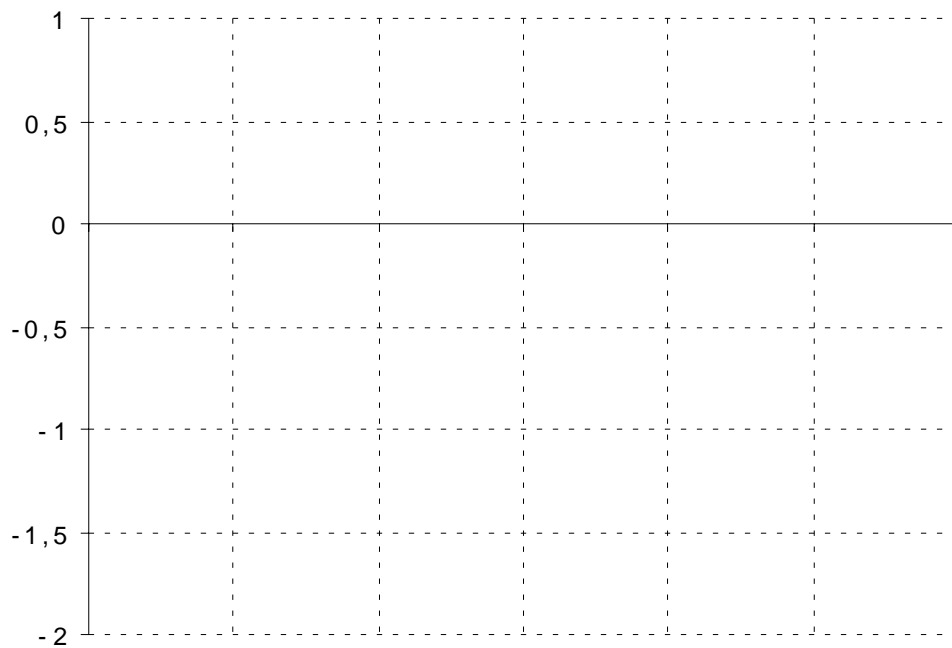
Representação gráfica

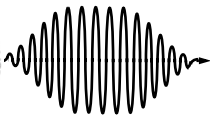
Trace os gráficos semelhantes aos da Fig. 4 e 5. Identifique correctamente os eixos.





Trace um gráfico semelhante ao da Fig. 6. Identifique correctamente os eixos.





(Use se necessário apenas para relatório)