

Espectroscopia e Fluorescência

Rui Martins

17 de novembro de 2021

Departamento de Física e Astronomia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Resumo

Este trabalho laboratorial permitiu a obtenção dos espectros de emissão de três lâmpadas (lâmpada de sódio, fluorescente e de néon), através dos espectrómetros DC, VIS-NIR e UV-VIS. Para além disso, possibilitou o cálculo das resoluções espectrais, para os espectrómetros VIS-NIR e UV-VIS, tendo-se obtido larguras de 11,5 nm e 5,1 nm, respetivamente. De seguida, foi feita a análise, com a lâmpada de halógeno, da transmitância e da absorvância, em função do comprimento de onda, ocorrida quando a radiação emitida tem como obstáculo diferentes filtros óticos (filtro verde, filtro vermelho e óculos de proteção laser). Por fim, determinou-se o tempo de fluorescência, tendo-se obtido $\tau = (4,83 \pm 0,09)$ ms.

Introdução

Este trabalho foi efetuado no âmbito da disciplina de Laboratórios de Física III, com o objetivo de estudar, de forma espectral e temporal, a emissão de diferentes fontes de luz, pela análise de espectros de emissão. Para isso, foi utilizado um espectrómetro DC e espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR, e foi feita a análise da emissão de fluorescência de um vidro dopado.

O espectrómetro DC permite-nos, através de uma ocular, observar os espectros de emissão de riscas, para as lâmpada de sódio, fluorescente e de néon, e contínua, para a lâmpada de halógeno. Enquanto que os espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR nos permitem, através do software do computador, observar graficamente os espectros, neste caso permite-nos obter a intensidade em função do comprimento de onda.

Espetros Óticos

Um espectro é a representação da intensidade luminosa em função da frequência ótica ou do comprimento de onda da radiação. É característico da substância que emite/absorve a radiação, permitindo, em muitas circunstâncias, a sua identificação ou o estudo de alterações da sua composição interna. Existem diferentes tipo de espectros de emissão: espectro de riscas, é constituído por riscas bem definidas, na qual cada uma delas corresponde a um comprimento de onda singular, representado por uma cor. Estas riscas estão associadas aos eletrões menos ligados ao núcleo que transitam entre níveis energéticos; espectro contínuo, consiste num espetro que se trata de uma região contínua de emissão, em que para os diferentes comprimentos de onda se observa uma risca contínua multicolor; espetro de banda, constituído por um certo número de bandas luminosas mas difusas, em que cada uma delas tem um limite bem definido. Cada banda é constituída por um grande número de riscas muito próximas, tão próximas que não se conseguem distinguir umas das outras. A formação destas bandas deve-se ao facto de uma molécula possuir, além dos níveis de energia eletrónicos, níveis correspondentes à quantificação dos seus estados de vibração e de rotação próprios.

Transmitância e Absorbância

A transmitância é a fração da luz incidente, com um comprimento de onda específico, que consegue atravessar uma determinada espessura de um material, sem ser absorvida. Esta é dada por:

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda) - I_d(\lambda)}{I_I(\lambda) - I_d(\lambda)} \quad (1)$$

onde I_T , I_d e I_I correspondem, respetivamente, à intensidade transmitida, intensidade do espetro escuro (sem iluminação de referência) e intensidade incidência ou de referência.

A absorvância é a fração da luz incidente, com um comprimento de onda específico, que é absorvida por uma determinada espessura de um material. Esta é dada por:

$$A(\lambda) = -\log_{10}T(\lambda) \quad (2)$$

Fluorescência

O processo da fluorescência está inserida na classe de emissão denominada fotoluminescência. A fotoluminescência corresponde à emissão de luz despoletada pela excitação de átomos através de fótons. A fluorescência consiste num fenómeno de vida curta que dura entre 10^{-9} e 10^{-3} segundos de emissão de luz.

Uma vez removida a luz incidente de excitação, a intensidade da radiação fluorescente emitida decai exponencialmente segundo a expressão:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

onde τ é o tempo característico de desexcitação e I_0 é a intensidade da luz emitida por fluorescência no instante inicial ($t=0$).

Fazendo o logaritmo da equação 3, obtemos:

$$\ln(I) = -\frac{t}{\tau} + \ln(I_0) \quad (4)$$

E, assim, é possível determinar o tempo de fluorescência τ , pois:

$$\tau = -\frac{1}{m} \quad (5)$$

Método Experimental

O método experimental foi subdividido em três partes, conforme o proposto no protocolo experimental.

Parte 1 - Espectros óticos de diferentes fontes luminosas

Numa primeira parte, tínhamos como objetivo observar os espectros de emissão das três lâmpadas (lâmpada de sódio, fluorescente e de néon), através do espectrómetro DC, e determinar o comprimento de onda das riscas visíveis do espectro, e a sua respetiva incerteza. Para tal, ajustámos o espectrómetro de forma a conseguirmos observar bem as riscas e fomos determinando o comprimento de onda destas à medida que rodávamos o tambor graduado, sempre na mesma direção. Numa segunda parte tínhamos como objetivo observar o espectro de cada lâmpada, mas agora de forma gráfica (intensidade em função do comprimento de onda), utilizando dois espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR. Para tal, colocámos a fibra de captação do

interferómetro de forma a receber a luz da lâmpada. De seguida, ligávamos esta fibra a um dos espectrómetros, e, depois de ajustar no software o sinal de forma a que o gráfico não estivesse saturado, guardámos os dados numa pen. Depois, efetuámos o mesmo procedimento para o outro espectrómetro. Por último, com o objetivo de calcular a resolução espectral da lâmpada de sódio, neste caso, calcular a largura do pico da risca amarela a meia altura deste, traçou-se uma reta à meia altura do pico e através das interseções desta reta com o gráfico determinou-se a respetiva largura (procedeu-se para os dois espectrómetros).

Parte 2 - Transmitância e Absorvância

Nesta parte, tínhamos como objetivo observar a transmitância e a absorvância aquando da utilização de alguns filtros. Utilizou-se, para isso, a lâmpada de halógeno. Para tal, começámos por colocar a lâmpada em frente à fibra óptica de captação, tendo sido registados os espectros de UV-VIS e VIS-NIR. Sem alterar os parâmetros de controlo, foram medidos os espectros novamente, desta vez colocando entre a lâmpada e a fibra um filtro de cor verde, depois um de cor vermelha e, por último, uns óculos de proteção laser.

Parte 3 - Tempo de fluorescência

Por último, com o objetivo de medir o tempo de fluorescência, começou-se por efetuar a seguinte montagem.

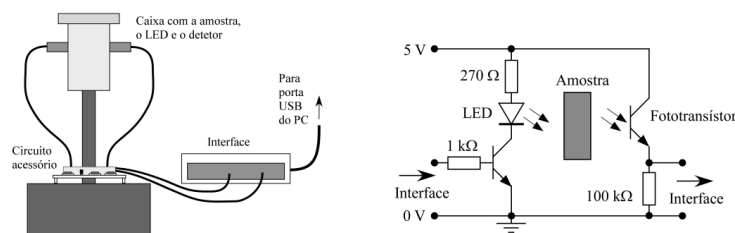


Figura 1: Esquema de montagem para a observação do fenómeno de fluorescência no vidro dopado.

Depois observou-se, através do software otimizado, o fenómeno da fluorescência. De seguida, foram realizadas 5 medidas e registados os dados de cada uma.

O método experimental encontra-se de uma forma mais detalhada em [1].

Resultados e Discussão

Parte 1

Lâmpada de Sódio

Através do espectrómetro DC, observámos que o espectro da lâmpada de sódio é um espectro de riscas. Desta forma, obtivemos, tabela 1, os valores dos comprimentos de onda, e respetiva incerteza, das riscas do espectro, com o auxílio do tambor graduado (figura 23).

cor	λ (nm)	u (λ)
vermelho	622	1
amarelo	591,0	0,5
verde	570,0	0,5
ciano	504,0	0,2
azul	492,0	0,2
roxo	460,0	0,2

Tabela 1: Comprimentos de onda das riscas do espectro da lâmpada de sódio e suas, respetivas, incertezas.

As incertezas desta tabela, bem como também das próximas tabelas desta parte, foram obtidas numa análise visual do tambor graduado, uma vez que, como podemos observar pela figura 23, neste tambor ocorre, com o aumento do valor do comprimento de onda, uma diminuição, a cada intervalo de nanómetros, do espaçamento dos nanómetros. Assim, para valores de comprimentos de onda menores a incerteza é também menor, e, pelo contrário, para valores de comprimento de onda superiores a incerteza é maior.

De seguida obtivemos o seguinte gráfico, figura 2.

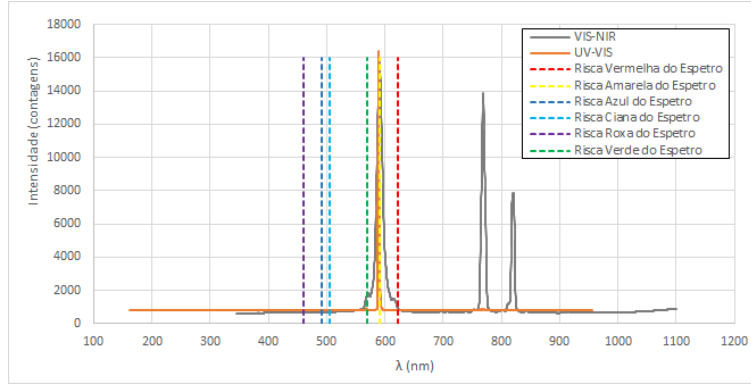


Figura 2: Espectro da lâmpada de sódio obtido pelos espectrômetros UV-VIS e VIS-NIR, sobrepostos com as riscas de emissão obtidas com o espectrômetro DC.

Pela observação da figura 2, podemos salientar que, na gama do visível, existe um único pico de intensidade muito elevada, obtido pelos dois espectrômetros, que, por sua vez, se encontra bem sobreposto à risca amarela. Já era esperado que obtivéssemos a risca amarela com intensidade muito discrepante das restantes riscas, uma vez que, as lâmpadas de sódio emitem uma luz amarela, com $\lambda = 589 \text{ nm}$. Sabendo que, através do espectrômetro DC obtivemos a risca amarela para $\lambda = (591,0 \pm 0,5) \text{ nm}$ (tabela 1) então existe, consequentemente, um erro associado de 0,34% (equação 4, em anexo). Ainda, na figura 2, observamos dois picos que ocorrem na gama entre $\lambda = 750 \text{ nm}$ e $\lambda = 850 \text{ nm}$. Estes correspondem à radiação emitida na zona dos infravermelhos, ou seja não visível pelo olho humano.

Lâmpada fluorescente

A lâmpada fluorescente, tal como a lâmpada de sódio, emite um espectro de riscas. Obtivemos, tabela 2, os valores dos comprimentos de onda, e respetiva incerteza, das riscas do espectro.

cor	λ (nm)	u (λ)
vermelho	614	1
laranja	590,0	0,5
amarelo	576,0	0,5
verde	543,0	0,5
ciano	489,0	0,3
azul	470,0	0,3
roxo	434,0	0,2

Tabela 2: Comprimentos de onda das riscas do espectro da lâmpada fluorescente e suas, respectivas, incertezas.

De seguida obtivemos o seguinte gráfico, figura 3.

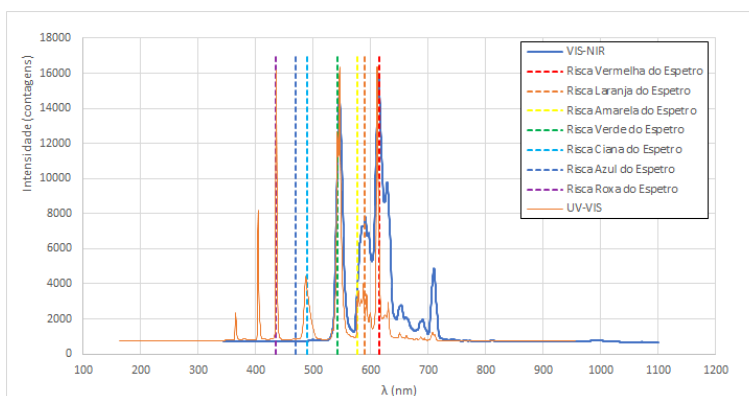


Figura 3: Espectro da lâmpada fluorescente obtido pelos espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR, sobrepostos com as riscas de emissão obtidas com o espectrómetro DC.

Perante este gráfico (figura 3), podemos constatar que existe uma boa sobreposição de todas as riscas com os picos espectrais. Nesta lâmpada obtivemos picos de elevada intensidade ao longo de toda a extensão da gama visível do espectro, pois podemos constatar que, das sete riscas obtidas, as duas dos extremos e a do meio são as riscas em que os picos espectrais apresentam maior intensidade, facto que comprova a afirmação anterior. Isto deve-se ao facto de esta ser uma lâmpada que emite uma luz branca. Luz branca é o nome dado ao que o olho humano vê quando todas as cores que compõem o espectro de luz visível são combinadas.

Lâmpada de néon

Observamos que a lâmpada de néon também apresenta um espectro de riscas. Obtivemos, tabela 3, os valores dos comprimentos de onda, e respectiva incerteza, das riscas do espectro.

cor	λ (nm)	$u(\lambda)$
vermelho	639	1
laranja	594,0	0,5
amarelo	585,0	0,5
verde	541,0	0,5
ciano	488,0	0,2
roxo	436,5	0,2

Tabela 3: Comprimentos de onda das riscas do espectro da lâmpada de néon e suas, respectivas, incertezas.

De seguida obtivemos o seguinte gráfico, figura 4.

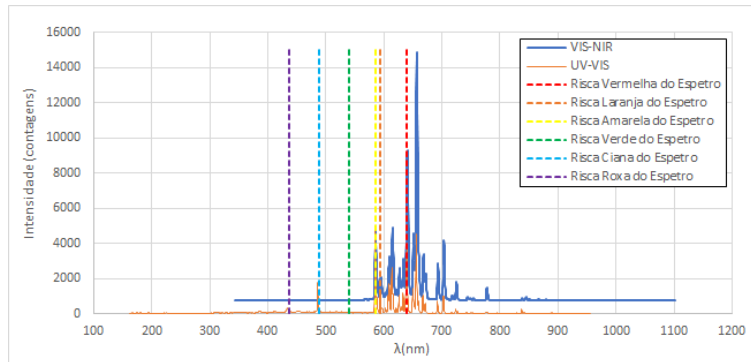


Figura 4: Espectro da lâmpada de néon obtido pelos espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR, sobrepostos com as riscas de emissão obtidas com o espectrómetro DC.

Para uma melhor análise do gráfico da figura 4, preparámos o gráfico da figura 5, na qual diminuimos um pouco o intervalo do eixo do comprimento de onda.

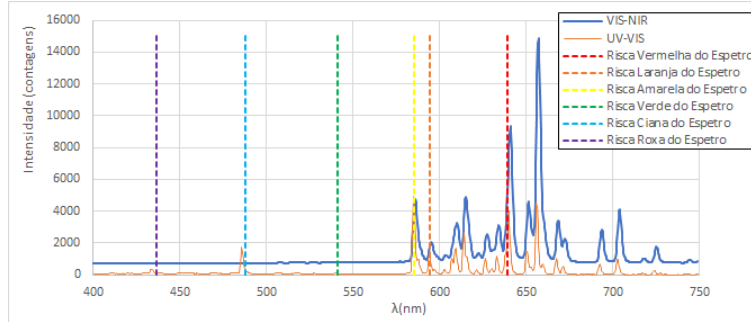


Figura 5: Espectro da lâmpada de néon obtido pelos espectrómetros UV-VIS e VIS-NIR, sobrepostos com as riscas de emissão obtidas com o espectrómetro DC (com diminuição do intervalo do eixo do comprimento de onda).

Perante este gráfico, figura 5, podemos salientar, uma vez mais, que a sobreposição das riscas com os picos espectrais é boa. Podemos também constatar que ocorreu uma maior predominância dos picos entre $\lambda = 570$ nm e $\lambda = 720$ nm, o que já era expectável, dadas as cores avermelhadas emitidas pela lâmpada.

Nesta primeira parte, conseguimos observar, pelos gráficos das figuras 2, 3 e 5, que o espectrómetro UV-VIS consegue medir valores de comprimentos de onda mais baixos (começa a medir a partir de, aproximadamente, $\lambda = 150$ nm) quando comparado com o espectrómetro VIS-NIR (começa a medir a partir de, aproximadamente, $\lambda = 350$ nm). Pelo contrário, o espectrómetro VIS-NIR consegue medir até valores mais elevados de comprimentos de onda (mede até $\lambda = 1100$ nm) enquanto que o UV-VIS mede apenas até, aproximadamente, $\lambda = 950$ nm. Também podemos constatar, sendo um bom exemplo a lâmpada fluorescente, que o espectrómetro UV-VIS obtém, para comprimentos de onda mais baixos, picos espectrais mais elevados que o VIS-NIR ou até mesmo picos que este não obtém. Pelo contrário, o espectrómetro VIS-NIR obtém, para comprimentos de onda mais elevados, picos mais elevados que o UV-VIS ou até mesmo picos que este não obtém. Ou seja, podemos concluir que para a análise de comprimentos de onda mais elevados é melhor a utilização do VIS-NIR e para comprimentos de onda mais baixos é melhor a utilização do UV-VIS.

Cálculo da resoluções espectrais

Para o cálculo da resolução espectral utilizou-se a lâmpada de sódio. É uma boa lâmpada para este cálculo, uma vez que apresenta um pico, que corresponde à risca amarela do espectro, de elevada intensidade e com uma forma quase simétrica. Para este cálculo, traçou-se uma reta correspondente à meia altura deste pico, para os gráficos correspondentes aos espectrómetros VIS-NIR e UV-VIS, figuras 6 e 7.

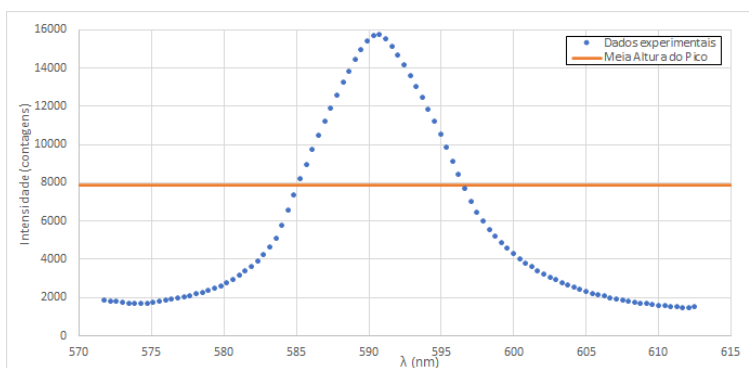


Figura 6: Resolução espectral para o gráfico correspondente ao espectrómetro VIS-NIR.

Neste espectrómetro, como a altura do pico é para uma intensidade de 15705,5 então a meia altura corresponde a uma intensidade de 7852,75. Para obter a largura do pico procedemos ao cálculo das interseções da reta com o pico e obtivemos uma largura de 11,5 nm.

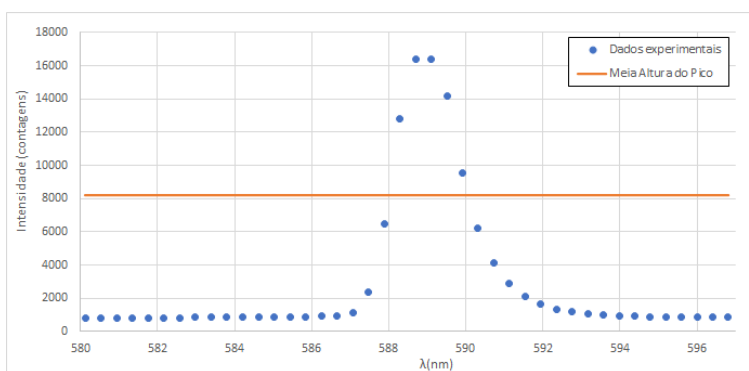


Figura 7: Resolução espectral para o gráfico correspondente ao espectrómetro UV-VIS.

Neste espectrómetro, como a altura do pico é para uma intensidade de 16383 então a meia altura corresponde a uma intensidade de 8191,5. Para obter a largura do pico procedemos da mesma forma que no espectrómetro anterior e obteve-se uma largura de 5,1 nm, figura 7.

Parte 2

Nesta parte, foram obtidos os espectros da lâmpada de halogéneo sob o condicionamento de alguns filtros óticos (filtro verde, filtro vermelho e óculos de proteção laser). As lâmpadas de halogéneo apresentam um espectro de emissão contínuo.

Filtro Verde

Começámos por obter o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halogéneo, na qual se obtém os espectros com e sem o filtro verde, para o espectrómetro VIS-NIR, figura 8.

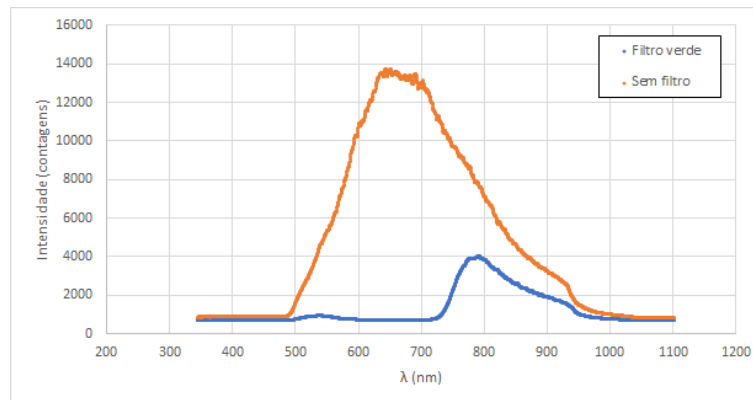


Figura 8: Espectro obtido, pelo espectrómetro VIS-NIR, para a lâmpada de halogéneo com e sem o filtro verde.

Perante este gráfico (figura 8) podemos observar que o espectro, obtido com a utilização do filtro verde, apresenta uma diferença, em termos da intensidade, muito significativa quando comparado com o espectro sem o filtro, que pode ter sido consequência de, durante a obtenção dos dados com o filtro verde, se ter alterado um pouco a distância entre a fibra ótica de captação e a lâmpada, para uma distância maior, e, por este motivo, obteve-se uma intensidade inferior com a utilização deste filtro.

De seguida, obtivemos o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halógeno, na qual se obtém os espectros com e sem o filtro verde, mas agora para o espectrómetro UV-VIS, figura 9.

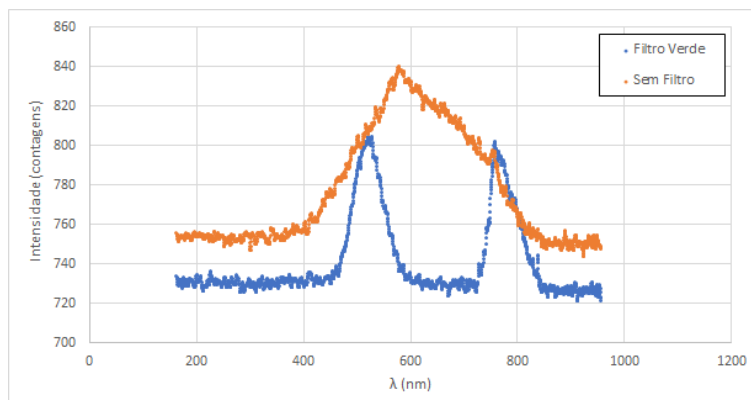


Figura 9: Espectro obtido, pelo espectrómetro UV-VIS, para a lâmpada de halógeno com e sem o filtro verde.

Com a observação deste gráfico (figura 9), podemos constatar que a intensidade obtida, em ambos casos (com e sem o filtro verde), é consideravelmente inferior comparada com a intensidade obtida para o espectrómetro VIS-NIR.

Através da equação 1 obteve-se o seguinte gráfico da transmitância, figura 10.

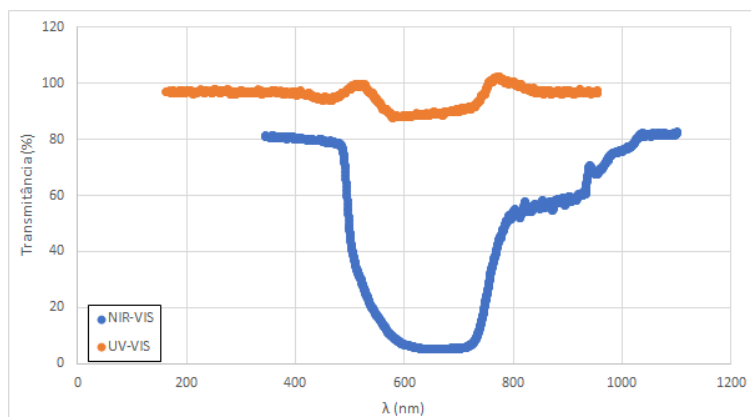


Figura 10: Gráfico da transmitância (em percentagem) com a utilização do filtro verde

Este gráfico (figura 10) demonstra a análise referida anteriormente sobre a reduzida intensidade do UV-VIS quando comparada com o NIR-VIS, pois pode-se observar que a curva correspondente ao UV-VIS tem alterações em termos da percentagem de transmitância muito reduzidas, comparadas com as da curva do NIR-VIS.

Através da equação 2 obteve-se o seguinte gráfico da absorvância, figura 11.

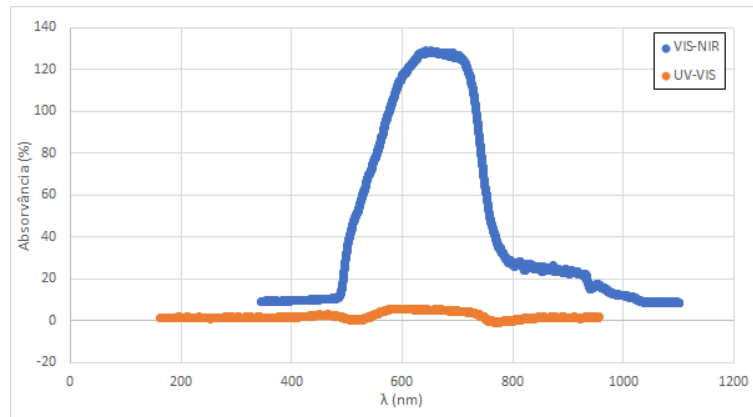


Figura 11: Gráfico da absorvância (em percentagem) com a utilização do filtro verde

Neste gráfico (figura 11) também é visível a observação referida anteriormente.

A partir dos gráficos das figuras 10 e 11, concluímos que o filtro verde permite a transmissão da radiação no intervalo de, aproximadamente, $\lambda = 600 \text{ nm}$ a $\lambda = 720 \text{ nm}$, sendo que nessa mesma gama ocorre a maior taxa de absorção. Observamos ainda que ocorre maior transmissão da cor verde, cor do filtro, sendo a absorção mais reduzida nesta cor. No entanto, verifica-se que este filtro absorve mais a cor complementar ao verde, o vermelho, e por isso transmite menos esta cor.

Filtro Vermelho

Começámos por obter o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halogéneo, na qual se obtém os espectros com e sem o filtro vermelho, para o espectrómetro VIS-NIR, figura 12.

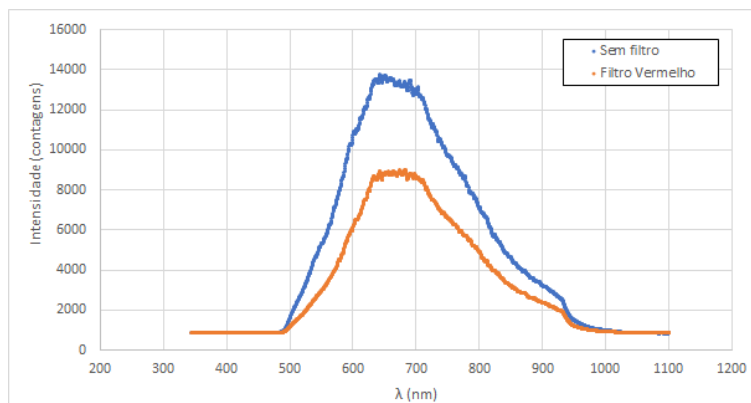


Figura 12: Espectro obtido, pelo espectrômetro VIS-NIR, para a lâmpada de halogéneo com e sem o filtro vermelho.

De seguida, obtivemos o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halogéneo, na qual se obtém os espectros com e sem o filtro vermelho, mas agora para o espectrômetro UV-VIS, figura 13.

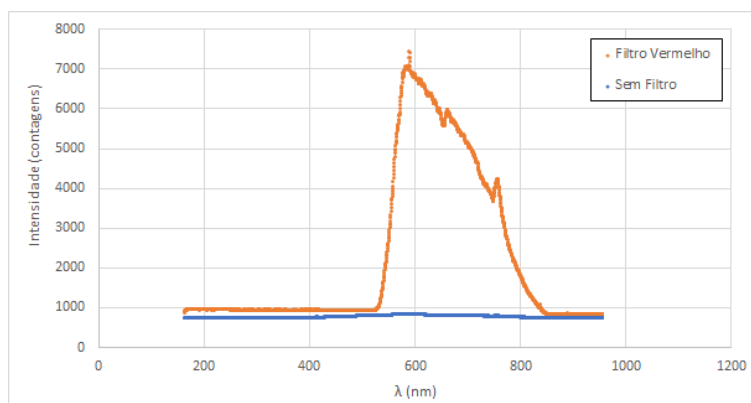


Figura 13: Espectro obtido, pelo espectrômetro UV-VIS, para a lâmpada de halogéneo com e sem o filtro vermelho.

Para este espectrômetro, o espectro obtido sem o filtro apresenta muito reduzida intensidade, o que já foi observado no gráfico da figura 9. No entanto, nesse gráfico, com o filtro verde, obteve-se, aproximadamente, intensidades próximas, o que não acontece neste gráfico (figura 13). Neste caso, a curva obtida para o espectro com o filtro vermelho apresenta, no intervalo de $\lambda = 550 \text{ nm}$ a $\lambda = 850 \text{ nm}$, valores de intensidade muito elevados. Por esta

razão, não serão feitos os gráficos da transmitância e da absorvância para este espectrômetro, pois os valores destes serão, conseqüentemente, afetados.

Através da equação 1 obteve-se o seguinte gráfico da transmitância, figura 14.

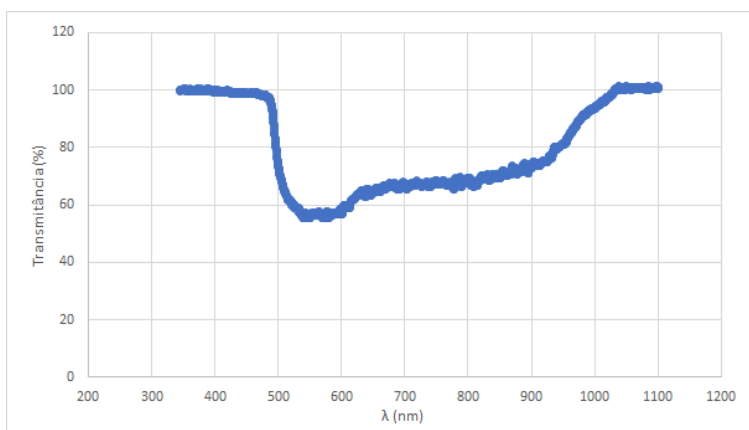


Figura 14: Gráfico da transmitância (em percentagem) com a utilização do filtro vermelho, apenas para o espectrômetro VIS-NIR

Através da equação 2 obteve-se o seguinte gráfico da absorvância, figura 15.

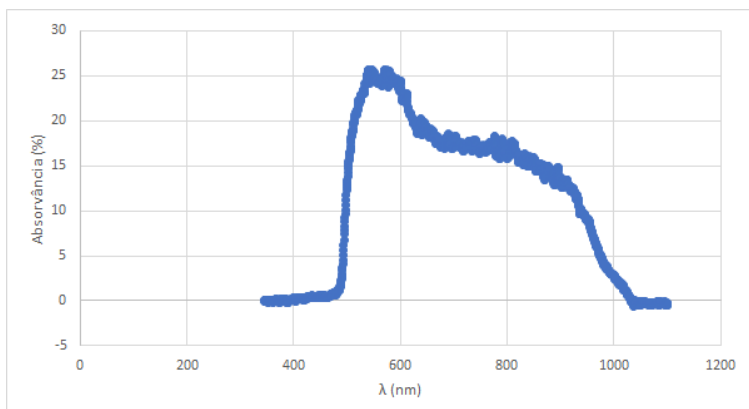


Figura 15: Gráfico da absorvância (em percentagem) com a utilização do filtro verde, apenas para o espectrômetro VIS-NIR

A partir dos gráficos das figuras 14 e 15, podemos observar que, na

gama visível do espectro, existe uma maior transmissão da cor vermelha, cor do filtro, ou seja, menor absorção desta cor. Por outro lado, ocorreu uma maior absorção da cor complementar, verde, e, conseqüentemente, uma menor transmissão desta cor.

Óculos de proteção laser

Começamos por obter o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halogéneo, na qual se obtém os espectros com e sem os óculos de proteção laser, para o espectrómetro VIS-NIR, figura 16.

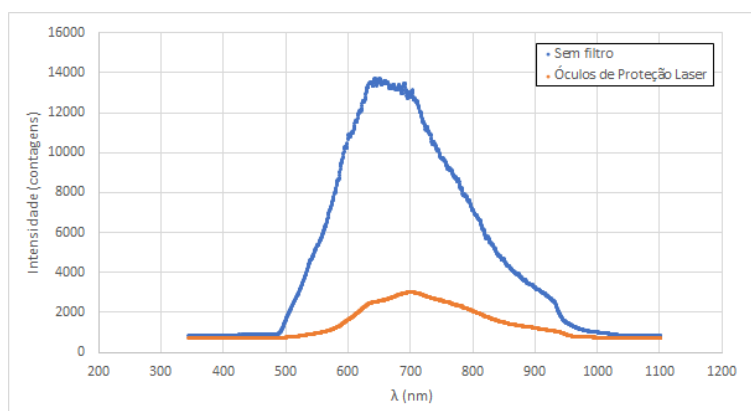


Figura 16: Espectro obtido, pelo espectrómetro VIS-NIR, para a lâmpada de halogéneo com e sem os óculos de proteção laser.

Perante este gráfico (figura 16) constatamos o que era esperado, ou seja, que a intensidade do espectro com os óculos, em toda a gama visível do espectro, é bem mais reduzida do que a intensidade do espectro sem os óculos. Isto será explicado com os gráficos da transmitância e da absorvância.

De seguida, obtivemos o gráfico que representa os valores obtidos do espectro de halogéneo, na qual se obtém os espectros com e sem os óculos de proteção laser, mas agora para o espectrómetro UV-VIS, figura 17.

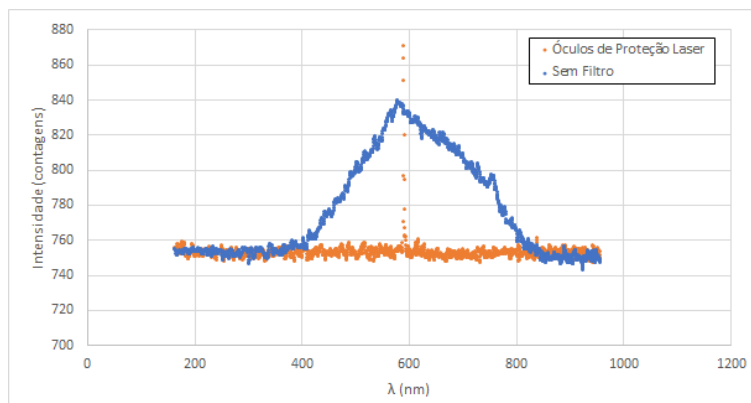


Figura 17: Espectro obtido, pelo espectrômetro UV-VIS, para a lâmpada de halógeno com e sem os óculos de proteção laser.

Na observação deste gráfico (figura 17), está saliente, uma vez mais, os reduzidos valores da intensidade do espectro sem os óculos. Verifica-se também que a curva do espectro com os óculos é constante.

Através da equação 1 obteve-se o seguinte gráfico da transmitância, figura 18.

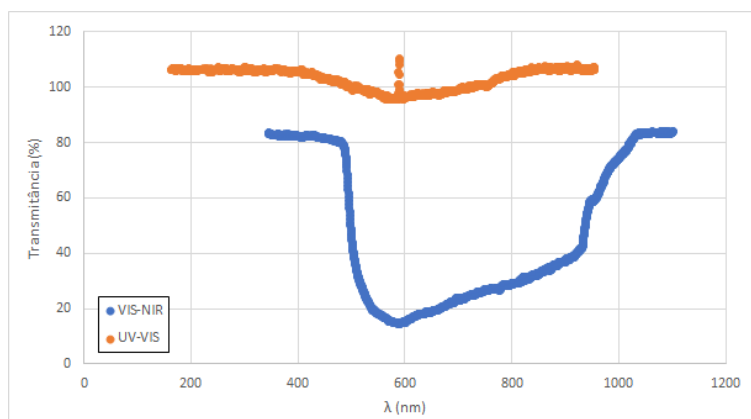


Figura 18: Gráfico da transmitância (em percentagem) com a utilização dos óculos de proteção laser.

Através da equação 2 obteve-se o seguinte gráfico da absorvância, figura 19.

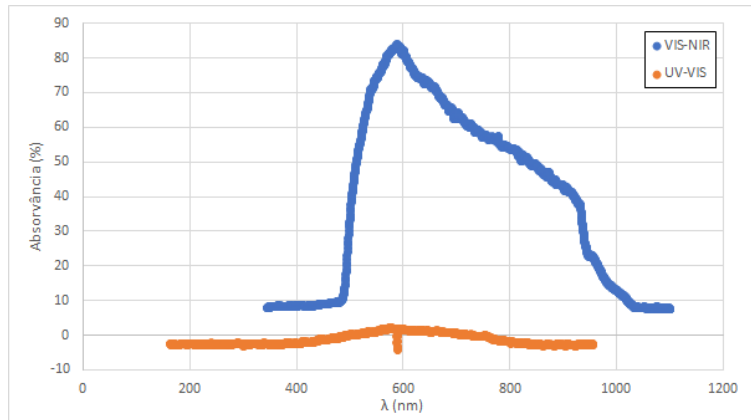


Figura 19: Gráfico da absorvância (em percentagem) com a utilização dos óculos de proteção laser.

Em ambos os gráficos das figura 18 e 19, as curvas dos espectros obtidos pelo espectrómetro UV-VIS, são quase constantes quando comparadas com as obtidas pelo espectrómetro VIS-NIR, devido aos reduzidos valores de intensidade verificados para o espectro sem os óculos. Como é possível observar nestes gráficos, os óculos de proteção laser absorvem, em toda a gama do visível, grande parte da radiação e, conseqüentemente, grande parte da radiação não é transmitida.

Parte 3

Nesta parte da experiência, as medidas foram realizadas com 40 kHz de frequência e foram obtidos 30000 pontos para a análise posterior. Foi traçado um gráfico da variação do sinal em função do tempo, para apenas uma medida e para a média de 5 medidas, para controlar a razão sinal-ruído.

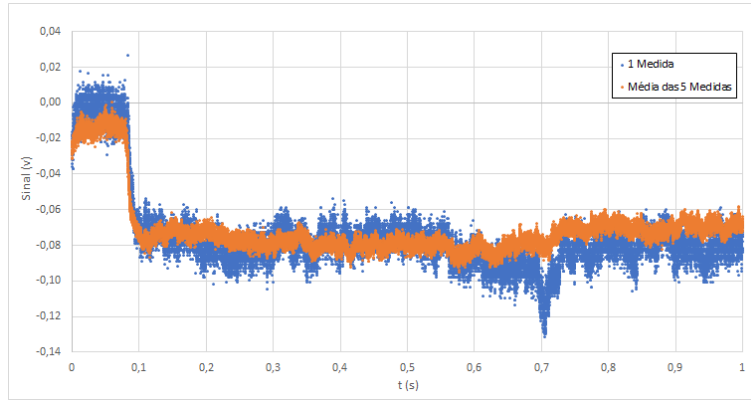


Figura 20: Variação do sinal em função do tempo.

De seguida, de forma a determinar o tempo de fluorescência, utilizámos os valores que se encontram no decaimento da fluorescência e obtivemos uma curva exponencial. Depois, de forma a obter a curva exponencial a decair para zero, extraímos o valor da radiação incidente, fazendo a média dos valores obtidos da zona do gráfico onde a exponencial decai para um valor constante. Extraímos esse valor e obtivemos o gráfico representado na figura 21.

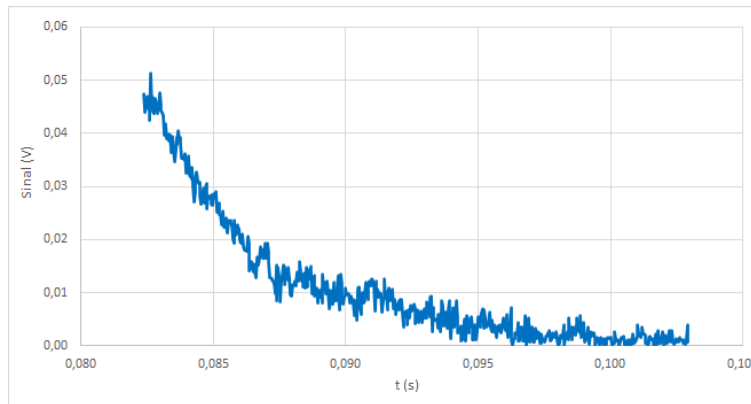


Figura 21: Variação do sinal em função do tempo, dos valores obtidos durante o decaimento da fluorescência (já extraído o valor da radiação incidente)

De seguida, foi obtido o logaritmo dos valores presentes no gráfico anterior (figura 21), de forma a obter um ajuste linear, e, desta forma, permitiu

obter o tempo de fluorescência τ através da equação 5 (figura 22).

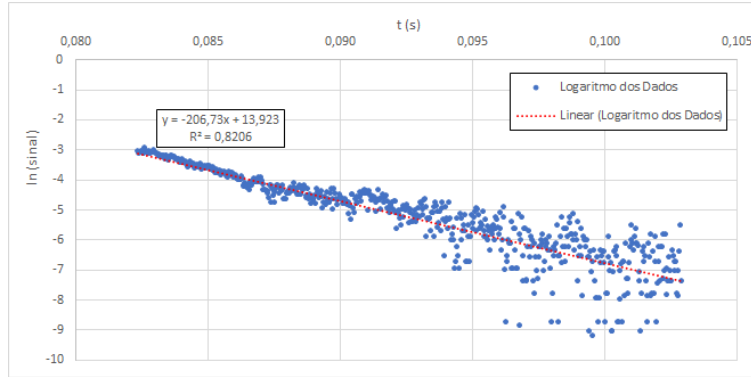


Figura 22: Logaritmo do sinal em função do tempo, dos valores obtidos durante o decaimento da fluorescência (já extraído o valor da radiação incidente)

De acordo com este ajuste linear obteve-se os seguintes parâmetros:

m	-207	13,9	b
u(m)	4	0,4	u(b)
r ²	0,821	0,58	sy

Tabela 4: Parâmetros de ajuste.

Sabendo, a partir da tabela 4, que $m = -207$ e $u(m) = 4$ e utilizando as equações 5 e 7 (equação 7 em anexo) obtivemos que $\tau = (4,83 \pm 0,09)$ ms. Como obtivemos τ na ordem dos 10^{-3} segundos então, como era esperado, obtivemos o fenómeno da fluorescência, pois a fluorescência consiste num fenómeno de vida curta que dura entre 10^{-9} e 10^{-3} segundos de emissão de luz.

Conclusões

Na primeira parte desta experiência obtivemos os espectros de emissão de 3 fontes diferentes (lâmpada de sódio, lâmpada fluorescente e lâmpada de néon) tendo-se obtido boa sobreposição entre as riscas, obtidas com o auxílio do espectrómetro DC, e os picos espectrais, obtidos através dos espectrómetros VIS-NIR e UV-VIS. Para a lâmpada de sódio obteve-se um

único pico de elevada intensidade correspondente à risca amarela e através do espectrómetro DC obtivemos esta risca para um $\lambda = (591,0 \pm 0,5) \text{ nm}$ e, por isso, com um erro de 0,34%. Na lâmpada fluorescente obtivemos picos de elevada intensidade ao longo de toda a extensão da gama do visível do espectro, visto que é uma lâmpada que emite luz branca. Na lâmpada de néon obtivemos maior predominância dos picos entre $\lambda = 570 \text{ nm}$ e $\lambda = 720 \text{ nm}$, dado que esta emite cores mais avermelhadas. Na determinação da resolução espectral, usando a lâmpada de sódio, obtivemos uma largura de 11,5 nm e 5,1 nm, para os espectrómetros VIS-NIR e UV-VIS respetivamente.

Na segunda parte, para o filtro verde, ocorreu maior transmissão da cor verde, cor do filtro, como consequência de uma menor absorção desta cor. No entanto, verificou-se que este filtro absorve mais a cor complementar ao verde, o vermelho, e, por isso, transmite menos esta cor. Para o filtro vermelho, conseguimos observar que existe uma maior transmissão da cor vermelha, cor do filtro, ou seja, menor absorção desta cor. Por outro lado, ocorreu uma maior absorção da cor complementar, verde, e, consequentemente, uma menor transmissão desta cor. Para os óculos de proteção laser, foi possível observar que estes óculos absorvem grande parte da radiação, na gama do visível, e, consequentemente, grande parte da radiação, nesta gama, não é transmitida.

Na terceira parte, obtivemos, para 30000 pontos e para uma frequência de 40KHz, um tempo característico de desexcitação $\tau = (4,83 \pm 0,09) \text{ ms}$, que corresponde a um fenómeno de vida curta e, por isso, diz respeito ao fenómeno da fluorescência.

Anexos



Figura 23: Tambor graduado do espectrómetro DC.

$$\text{Erro relativo}(\%) = \frac{|\text{valor teorico} - \text{valor experimental}|}{\text{valor teorico}} * 100 \quad (6)$$

$$u(\tau) = \frac{u(m)}{m^2} \quad (7)$$

Referências

- [1] DFA-FCUP. "protocolos de física III, 2021/2022". *Física*, 2021.