



## **Uso de *smartphones* como sensores colorimétricos: caso de estudo para análise a vinho**

**António Manuel Bicha Marques**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Prof. Doutor Paulo Sérgio de André Brito

### **Júri**

Presidente: Prof. Doutor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Vogal: Prof. Doutor Paulo Luís Serras Lobato Correia

**Maio de 2019**



# Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família e aos meus amigos, por todo o apoio e confiança que me foram dando ao longo desta dissertação. Mas gostava de agradecer em especial aos meus pais. Graças a eles, sempre tive a oportunidade de estudar e nunca me faltou nada do que fui precisando ao longo do meu percurso académico. Além disso foram eles que me educaram e me passaram os valores morais com os quais cresci e me tornei na pessoa que sou hoje.

Depois gostaria de agradecer ao Professor Paulo André por me ter escolhido para desenvolver este tema e por sempre se ter mostrado disponível para ajudar e esclarecer todas as dúvidas que me foram aparecendo ao longo deste percurso.

Por último, gostaria de agradecer ao IT (Instituto de Telecomunicações) pela disponibilidade que me deu para utilizar todo o material necessário ao desenvolvimento deste projeto e agradeço também, ao Instituto Superior Técnico por tudo o que aprendi e por me dar as bases necessárias para me tornar num bom profissional.



# Resumo

Ao longo dos anos os telemóveis, em específico os *smartphones*, têm vindo a sofrer grandes alterações, tornando-os ferramentas capazes de recolher, tratar e processar informação que há uns anos apenas era possível recorrendo a diversos aparelhos em conjunto: câmara fotográfica, computador, etc.

O objetivo desta dissertação é explorar a utilização de um *smartphone*, para a realização de análises colorimétricas, especificamente para avaliar a cor de vinho.

Para tratar e estudar os resultados adquiridos com o *smartphone*, estudou, desenvolveu e melhorou-se um método de inversão espectral que através dos valores característicos de uma cor, XYZ, consiga apresentar uma representação espectral coincidente com o obtido em laboratório.

Foram testadas várias soluções como a inversão através de valores normalizados, não normalizados e divisões em conjuntos assimétricos e simétricos. Para cada uma destas soluções foram testadas várias amostras, antes de se realizar a experiência final com uma amostra de vinho, como por exemplo: LED de um iPhone e corantes com diferentes cores. Foi também calculado o valor do erro quadrático médio (RMSE) para servir como mais um termo de avaliação do método de inversão espectral.

Na experiência final, vinho, o melhor resultado para o valor de RMSE foi atingido usando a divisão espectral com conjuntos assimétricos (25 e 45 amostras), erro igual a 0.1466, enquanto que a melhor representação espectral é obtida através do uso dos valores normalizados.

**Palavras Chave:** *Smartphone*, Vinho, XYZ





# Abstract

Over the years mobile phones, specifically smartphones, have undergone in major changes, making them tools capable of collecting and processing data that was only possible a few years ago using several devices together: camera, computer, etc.

The purpose of this dissertation is to demonstrate how the use of a smartphone, for conducting spectral and colorimetric analyzes, allows us to evaluate the color of a wine sample.

In order to treat and study the results obtained with the smartphone, it was studied, developed and improved a method of spectral inversion that through the characteristic values of a color, XYZ, can present a spectral representation coincident with the one obtained in the laboratory.

Several solutions were tested as the inversion through normalized and non-normalized values and the division into asymmetric and symmetric sets. For each of these solutions, several samples were tested before the final experiment with a wine sample, such as: LED of an iPhone and dyes with different colors. The Root Mean Square Error (RMSE) value was calculated to serve as an additional term of evaluation for the spectral inversion method.

In the final experiment, wine sample, the best result for the RMSE value was reached using the spectral division with asymmetric sets (25 and 45 samples), the error was 0.1466, while the best spectral representation is obtained through the use of normalized values.

**Keywords:** Smartphone, Wine, XYZ



# Índice

Declaração .....	iii
Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract .....	ix
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xiv
Lista de Abreviações .....	xv
1. Introdução .....	16
1.1 Motivação .....	17
1.2 Objetivos .....	19
2. Estado da Arte .....	20
2.1. Evolução dos sensores em <i>smartphones</i> .....	21
2.2. Áreas de aplicação dos sensores de <i>smartphones</i> .....	23
2.3. Monitorização do vinho .....	24
3. Fundamentação Teórica .....	27
3.1. Sistema Visual Humano .....	28
3.2. Recetores Óticos .....	29
3.3. Radiometria, Fotometria e Visão Tricromática .....	31
3.4. Inversão dos valores XYZ para espectro .....	33
4. Resultados .....	35
4.1. Teste do procedimento de inversão espectral de um LED de iluminação de um iPhone 4 ...	36
4.2. Melhoria do método de inversão espectral .....	38
4.3. Melhoria do método de inversão espectral recorrendo ao MATLAB (Fminsearch) .....	43
4.4. Aplicação para a caracterização de uma amostra de Vinho .....	49
5. Conclusões .....	55
Referências .....	58
Anexos .....	63
Anexo A .....	64
Anexo B .....	66
Anexo C .....	68
Anexo D .....	69

# Lista de Figuras

Figura 1: Evolução temporal da utilização de smartphones em Portugal (% da população) (extraído de [4]).....	17
Figura 2: Percentagem de smartphones consoante o preço de venda em dólares (extraído de [7])...	19
Figura 3: Fotografia do IBM Simon, primeiro smartphone (extraído de [8]).....	21
Figura 4: Imagem do CAT S60 (extraído de [13]) .....	22
Figura 5: Sensores presentes num smartphone (extraído de [14]).....	23
Figura 6: Sensor para monitorizar a temperatura, humidade do ar e da folha, entre outras (extraído de [25]).....	25
Figura 7: Espectro visível da luz (extraído de [33]).....	28
Figura 8: Olho Humano (extraído de [34]).....	28
Figura 9: Resposta espectral dos cones L, M e S (extraído de [33]).....	29
Figura 10: Resposta espectral (extraído de [38]).....	30
Figura 11: a) CIE RGB CMF; b) CIE XYZ CMF (extraído de [32]).....	32
Figura 12: Diagrama de cromaticidade (extraído de [41]).....	32
Figura 13: Método para analisar uma amostra de vinho.....	36
Figura 14: Espectro de emissão do LED de iluminação de um iPhone 4.....	37
Figura 15: Espectro LED branco obtido através da inversão dos valores XYZ (RMSE = 0.2485).....	37
Figura 16: Espectro LED branco obtido através da inversão dos valores XYZ (RMSE = 0.4177).....	39
Figura 17: Espectro LED branco depois da minimização (RMSE = 0.2108).....	40
Figura 18: Espectro original e invertido para a cor Vermelha (RMSE = 0.3256).....	41
Figura 19: Espectro original e invertido para a cor Verde (RMSE = 0.2964) .....	41
Figura 20: Espectro original e invertido para a cor Azul (RMSE = 0.3452) .....	42
Figura 21: Espectro original e espectro invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.2108) .....	44
Figura 22: Espectro original e espectro invertido (Minimização com X, RMSE = 0.2246).....	44
Figura 23: Espectro original e espectro invertido para a cor Azul (RMSE = 0.2259).....	45
Figura 24: Espectro original e espectro invertido para a cor Amarelo (RMSE = 0.0751).....	46
Figura 25: Espectro original e espectro invertido com dados não normalizados (LED branco).....	47
Figura 26: Espectro original e invertido para os conjuntos assimétricos (RMSE = 0.2329).....	48
Figura 27: Espectro original e invertido para os conjuntos simétricos (RMSE = 0.1373).....	48
Figura 28: Espectro original da amostra de vinho.....	49
Figura 29: Espectro original e invertido utilizando o Excel (RMSE = 0.3179) .....	50
Figura 30: Espectro original e invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.3636) .....	51
Figura 31: Espectro original e invertido (Minimização com Z, RMSE = 0.3838) .....	51
Figura 32: Espectro original e invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.3749) .....	52
Figura 33: Espectro original e invertido para conjuntos assimétricos (Minimização com XYZ, RMSE = 0.1466).....	53
Figura 34: Espectro original e invertido para conjuntos simétricos (Minimização com XYZ, RMSE = 0.1723).....	53
Figura 36: Cálculo do RMSE.....	68



# Lista de Tabelas

Tabela 1: Matriz CMF CIE 1931 ..... 64  
Tabela 2: Matriz E ..... 66

# Lista de Abreviações

<b>CCD</b>	<i>Charge Coupled Device</i>
<b>CIE</b>	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
<b>CMF</b>	<i>Color Matching Functions</i>
<b>DHS</b>	<i>Department of Homeland Security</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IBM</b>	<i>International Business Machines</i>
<b>IVV</b>	Instituto da Vinha e do Vinho
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>MATLAB</b>	<i>MATrix LABoratory</i>
<b>MOS</b>	<i>Metal Oxide Silicon</i>
<b>NASA</b>	<i>Ntional Aeronautics and Space Administration</i>
<b>NIRS</b>	<i>Near Infrared Spectroscopy</i>
<b>RGB</b>	<i>Red, Green and Blue</i>
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i>
<b>UV</b>	Radiação Ultravioleta

1.

# Introdução



## 1.1 Motivação

O *smartphone*, provavelmente a invenção tecnológica mais usada pela população mundial, ainda é considerado nos dias de hoje uma nova tecnologia, apesar da elevada penetração no mercado observada desde 2015 (147%) [1].

No caso de Portugal, em 2017 cerca de 70% das pessoas utilizavam um *smartphone*, um valor que aumentou perto de 40 pontos percentuais relativamente ao ano de 2012, conforme se pode observar na Figura 1, correspondendo a uma população de cerca de 6,8 milhões de indivíduos [2]. Apesar da evolução positiva que se tem vindo a observar no número de pessoas que utilizam um *smartphone*, aliado ao facto deste equipamento incorporar vários dispositivos de grande utilidade num único aparelho (telefone, câmara, lanterna, etc.) e à diversidade da oferta que se tem vindo a verificar no mercado, este número mantém-se ainda abaixo da média Europeia [3].

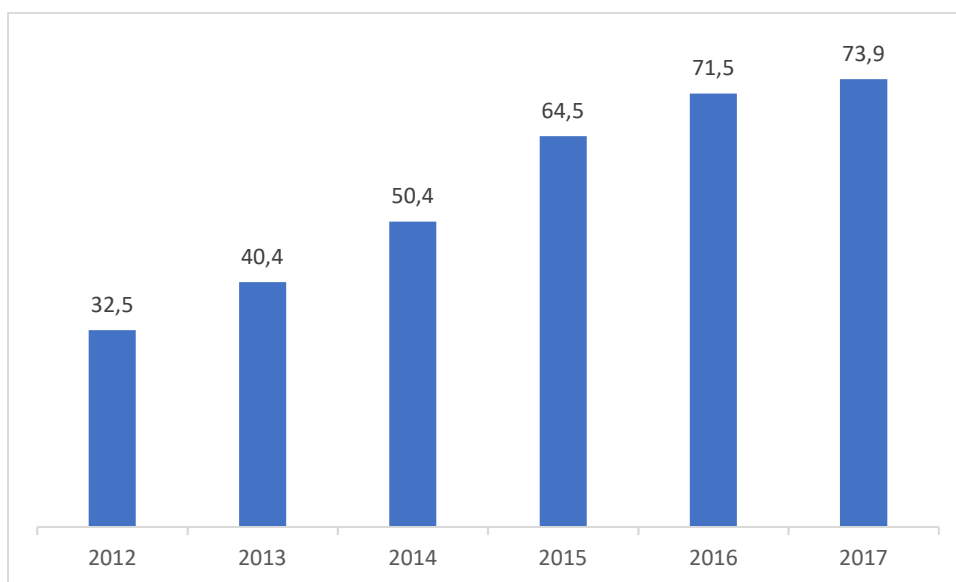


Figura 1: Evolução temporal da utilização de *smartphones* em Portugal (% da população) (extraído de [4])

Um dos elementos dos telemóveis que mais tem evoluído nos últimos anos é a câmara fotográfica/vídeo, sendo que numa fase inicial esta era caracterizada pela baixa resolução (0.11 Megapixels [5]), fazendo com que fosse impossível competir com as câmaras digitais já estabelecidas no mercado. Ao longo dos anos, com o aumento da qualidade das câmaras incorporadas, os consumidores começaram cada vez mais a valorizar a experiência de utilização do *smartphone*, passando a perceber a sua câmara como substituta da tradicional câmara fotográfica. Para além das vantagens para os utilizadores finais, o aumento da qualidade da câmara do telemóvel permitiu ainda que a mesma pudesse ser utilizada como impulsora para o desenvolvimento de aplicações

de obtenção, tratamento e processamento de imagem, que outrora eram realizadas por uma câmara digital.

Para além da evolução positiva verificada nas câmaras, também os sensores incorporados num *smartphone* sofreram uma melhoria, sendo nos dias de hoje comercializados equipamentos com sensores de movimento, posição, imagem, entre outros. Estes sensores podem ser utilizados com diversos objectivos finais, como podemos ver no seguinte exemplo da NASA. Em 2007, o Departamento de Segurança Interna (DHS) dos Estados Unidos da América enviou um comunicado à NASA a solicitar o desenvolvimento de um sensor que pudesse capacitar um *smartphone* para a deteção de gases e produtos químicos nocivos, que se encontrassem presentes no ar que respiramos [6]. A NASA, que já tinha em desenvolvimento a utilização de nanotubos de carbono de parede única para a avaliação de atmosferas planetárias, deteção de substâncias químicas ao redor de plataformas de lançamento de foguetões e monitorização do desempenho de sistemas de suporte à vida, possuía apenas o desafio de preparar estes dispositivos para captar uma amostra de ar e de criar uma interface nos *smartphones*. Deste modo, após testar diversas soluções, foi possível equipar 40 iPhones com este sensor, para que os mesmos pudessem reagir a substâncias químicas potencialmente nocivas, como é o exemplo do amoníaco, dióxido de nitrogénio, cloreto de hidrogénio e cloro, assim como compostos orgânicos voláteis (benzeno e tolueno) [6]. Um exemplo prático onde este sensor, criado pela NASA, pode ser utilizado é no combate aos incêndios, onde os bombeiros poderão avaliar a qualidade do ar e decidir até onde podem avançar sem sofrer danos irreversíveis.

A evolução verificada nos sensores nos telemóveis, para além de capacitar os *smartphones* para diversas aplicabilidades técnicas, veio ainda torná-los mais apelativos para os consumidores finais, dando-lhes a possibilidade de armazenar todo o tipo de funções e ferramentas num único dispositivo. Esta opção, para além de mais prática, possui um preço mais acessível quando comparada com a utilização de diversos sensores em separado. As evoluções que se têm vindo a verificar nos constituintes do telemóvel, refletem-se ainda nos preços do equipamento, permitindo aos seus fabricantes a produção de *smartphones* com diferentes tipos de componentes, associados a diferentes custos. Deste modo, conforme se pode verificar na Figura 2, existe uma elevada distribuição da oferta no que diz respeito aos preços dos *smartphones*, estando 50% dos equipamentos entre os 100 US\$ e 250 US\$ (85€ e 210€ aproximadamente). Esta tendência tornou mais acessível a aquisição de um *smartphone*, em função dos diferentes níveis de poder de compra, resultando também numa maior percentagem da população utilizadora.

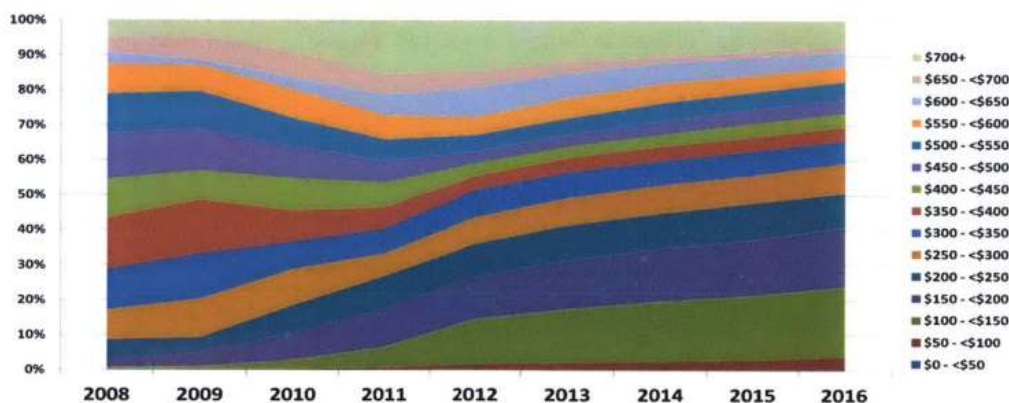


Figura 2: Percentil de vendas dos *smartphones*, em função do preço (em dólares) ao longo dos últimos anos (extraído de [7])

Tendo por base estes resultados dos estudos de mercado, é fácil perceber a acessibilidade de compra por parte das pessoas interessadas nas características sensoriais dos telefones e na sua utilização para aplicações quotidianas, permitindo a utilização de uma plataforma multifuncional para a realização de tarefas específicas.

Tendo por base tudo o que foi aqui referenciado é possível perceber-se a utilidade de um *smartphone* para o caso de estudo desta tese, porque este evita que hajam encargos na aquisição de software e hardware para recolher e tratar todo o tipo de informação necessária ao desenvolvimento do trabalho e devido ao seu tamanho e acessibilidade facilita todo o processo envolvido.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a demonstração da possibilidade de utilização de um *smartphone* para a realização de diversas análises espectrais e colorimétricas aplicadas a um cenário específico, a monitorização de vinho, perspetivando uma aplicação futura.

Para concretizar este objetivo, será necessário desenvolver ferramentas que permitirão avaliar a qualidade do vinho. Deste modo, a primeira ferramenta consiste na representação do espectro de luz branca, que irá servir como base de comparação ao longo do projeto. Posteriormente, utilizando as três componentes que representam a cor branca proceder-se-á a um método de inversão espectral para tentar obter o espectro inicial da amostra em estudo. Na tentativa de melhorar os resultados do método de inversão espectral, serão desenvolvidas ferramentas de minimização do erro quadrático médio com o objectivo de obter a mais fiel representação gráfica do espectro original. Para além da luz branca, serão objeto de estudo a cor amarela, azul, verde e vermelha. Por último, e tendo por base todas as experiências realizadas, será aplicado o método de inversão espectral a uma amostra de vinho, que servirá como base para uma análise qualitativa dos resultados.

# 2.

## Estado da Arte

## 2.1. Evolução dos sensores em *smartphones*

Em 1994, foi lançado o primeiro *smartphone*, o IBM Simon, cuja fotografia se encontra na Figura 3, que pesava aproximadamente 500 g, dificultando o seu transporte. Para além das funcionalidades básicas de outros telemóveis convencionais, o IBM Simon apresentava a tecnologia *touchscreen*, a capacidade de correr aplicações de *software* e a possibilidade de ligação a uma máquina de fax [8]. Sendo o equipamento pioneiro no mercado de *smartphones* possuía limitações a nível da duração da bateria e um preço muito elevado, caindo rapidamente em desuso.



Figura 3: Fotografia do IBM Simon, primeiro *smartphone* (extraído de [8])

Ao longo dos anos, foram sendo desenvolvidos diversos aparelhos que tinham como objetivo combinar as funcionalidades de um computador e de um telemóvel. Os primeiros equipamentos eram parecidos com um telemóvel normal com uma tampa no teclado que se abria, ficando com um dispositivo semelhante a um pequeno computador, dificultando o seu uso. Com o aumento da popularidade, os fornecedores foram investindo cada vez mais no *design* e nas funcionalidades dos equipamentos, em função das novas necessidades dos consumidores, sendo uma das maiores inovações a capacidade de ligação à internet. Esta transição do telemóvel convencional para o *smartphone* com acesso à internet permitiu que o equipamento deixasse de ser visto como um mero aparelho para efetuar comunicações. Este passou a agregar outras funcionalidades que outrora estavam incorporadas apenas nos computadores, como é o exemplo do acesso ao *e-mail* e da navegação na internet [9]. Atualmente, sendo a internet utilizada como uma funcionalidade básica dos *smartphones*, os consumidores têm cada vez mais exigências de novas funções no telemóvel, levando a que existisse um aumento do número de aplicações desenvolvidas e consequentemente da sua popularidade, tendo a *AppStore* em 2011 mais de 350 mil aplicações disponíveis e mais de 10 milhares de milhões de *downloads* [10]. O aumento das funcionalidades, levou a um aumento da procura e consequentemente a uma maior necessidade de diversificação, levando a que no ano de 2000 a SHARP lançasse o

primeiro dispositivo móvel com câmara, que permitia aos seus utilizadores enviar fotografias tiradas instantaneamente por *e-mail* [11].

Com o passar do tempo e com as evoluções observadas a nível do *hardware* e *software* do equipamento, verificou-se um desenvolvimento de muitos sensores para este tipo de telemóvel, melhorando o seu desempenho em diversos aspetos, sendo nos dias de hoje possível encontrar diversos sensores, como é o exemplo [12]:

- Acelerómetro;
- Giroscópio;
- Magnetómetro;
- GPS (*Global Positioning System*);
- Barómetro;
- Sensor de proximidade;
- Sensor de luz ambiente;
- Sensor de iluminação.

Para além dos sensores, também a câmara dos telemóveis foi sofrendo diversas atualizações a nível da resolução, captação de luz e detalhe da cor, capacidade de focagem, inclusão de *flash* e de um estabilizador, com o objetivo de se aproximar cada vez mais de uma máquina fotográfica, podendo mesmo vir a servir como sua substituta. Adicionalmente, estas funcionalidades vieram permitir a um telefone o processamento de fotografia sem a necessidade de recorrer a programas ou aparelhos externos de tratamento de imagem.

Todos os avanços verificados na câmara de um *smartphone* permitiram à CAT lançar no ano de 2016 o primeiro telemóvel com imagem térmica, o CAT S60 (Figura 4) [13].

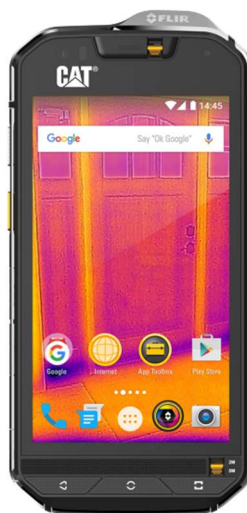


Figura 4: Imagem do CAT S60 (extraído de [13])

Para tal, o telemóvel recorre a uma câmara térmica e uma câmara visual para tirar duas fotografias em simultâneo, sobrepondo-as, resultando numa imagem com mais detalhe, sobretudo para ambientes com pouca luminosidade. Através da câmara térmica, o *smartphone* consegue medir temperaturas entre os -20 °C e os 120 °C até 30 m e analisar diretamente as imagens sem recorrer a outros sensores externos aos telemóveis [13].

## 2.2. Áreas de aplicação dos sensores de *smartphones*

Todos os sensores referidos anteriormente (Figura 5), presentes nos telemóveis comercializados atualmente, permitem diversas aplicações no quotidiano, através do seu uso e conhecimento, como é o exemplo do sistema de navegação de um *smartphone*, que recorre a quatro sensores. Para tal, é utilizado um acelerómetro, que nos dá informação sobre o movimento do dispositivo em qualquer uma das direções, juntamente com um giroscópio, que garante a orientação correta através da medição das variações na velocidade angular e que determina a orientação do telemóvel. Adicionalmente, é ainda utilizado um magnetómetro, que funciona como uma bússola e permite medir os campos magnéticos, enviando um sinal de satélite para o GPS do equipamento, permitindo obter a posição exata do *smartphone*. Por fim, o barómetro é utilizado para medir a pressão atmosférica, permitindo saber a que altitude o equipamento se encontra em relação ao nível do mar.

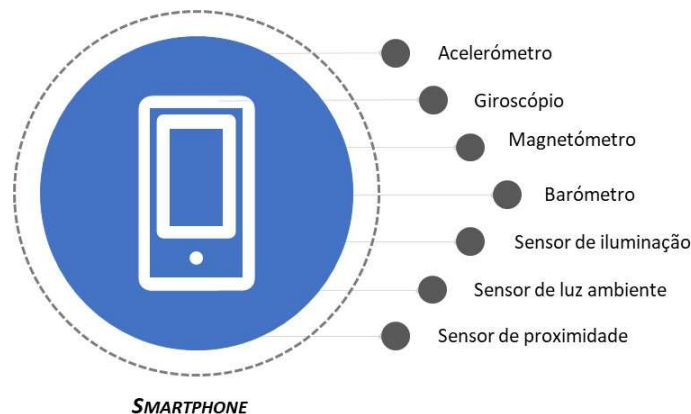


Figura 5: Sensores presentes num *smartphone* (extraído de [14])

Adicionalmente, existem ainda outros sensores com aplicabilidade no dia-a-dia do utilizador, como é o exemplo do sensor de proximidade que permite averiguar a distância entre um *smartphone* e um objeto externo, utilizando um LED de infravermelhos, ou o sensor de luz ambiente que permite medir a quantidade de luz à volta do dispositivo, utilizado para regular a intensidade luminosa do ecrã [12].

Concluindo, todos os sensores disponíveis num *smartphone*, bem como a sua câmara, podem ser usados para diferentes fins e em diferentes áreas da vida do ser humano como por exemplo [15] [16]:

- Cuidados de saúde – nas últimas décadas a população envelhecida (mais de 65 anos) representa cerca de 20% da população mundial, sendo que esta faixa etária necessita de monitorização regular ou contínua. A combinação de sensores corporais com os telemóveis permite controlar vários indicadores da saúde de um indivíduo [17];
- Realidade aumentada – possibilidade de colocar objetos digitais em locais do mundo real e interagir com eles com movimentos precisos, facilitando a escolha de mobília a ter numa casa, por exemplo [18];
- Controlo de tráfego – o trânsito pode afetar tanto o ambiente como a produtividade humana por isso, é importante detetar os caminhos mais rápidos e menos congestionados numa deslocação [12];
- Controlo ambiental – medição de níveis de poluição e acompanhamento das ações individuais que afetem tanto a exposição como a contribuição para problemas como as emissões de carbono [12];
- Monitorização comportamental – aplicações de deteção de atividade anormal chamam muita atenção entre os cientistas. É possível sentir o meio ambiente e perceber vários comportamentos das pessoas [19];
- Controlo de bens alimentares – deteção de nutrientes e químicos presentes nos alimentos consumidos pelo ser humano que beneficiem ou prejudiquem a sua saúde [20];
- Entre outros.

Como já foi referido e demonstrado anteriormente, existem diversas aplicabilidades dos sensores dos *smartphones*, sendo o foco deste documento a monitorização e controlo do vinho.

## 2.3. Monitorização do vinho

A vinicultura está presente no quotidiano do ser humano desde o quarto milénio a.C. Com a expansão dos gregos e dos romanos o cultivo da vinha foi-se espalhando pela Europa e eventualmente por todo o Mundo, sendo o velho continente aquele que apresenta maior extensão, expansão e tradição desta cultura [21].

Com o avançar do tempo e as novas exigências dos consumidores, tornou-se imperativo controlar e regular a qualidade da vinha e do vinho. Deste modo, foi fundado em Portugal em 1986 o Instituto da Vinha e do Vinho (IVV), responsável pelo cumprimento do regime legal da cultura da vinha, pela coordenação dos programas de ordenamento e melhoria da vinha e pelo controlo oficial dos produtos e dos sistemas de controlo e certificação aplicados pelas organizações interprofissionais [22].

Para tal, o IVV recorre a métodos tradicionais para medir a qualidade da uva através de diversos parâmetros, como é o exemplo do teor solúvel total, a redução do teor de açúcar, a acidez, o valor do



pH, etc., que são indispensáveis para calcular a altura de colheita e posteriormente produzir vinho com maior qualidade. Contudo, os métodos tradicionais utilizados para medir estes parâmetros são lentos, entediantes, caros e destrutivos, não correspondendo às necessidades e expectativas da produção de vinho atual [23]. Deste modo, foi necessário implementar novos métodos que combatessem as limitações dos métodos tradicionais, que assentam na análise espectral e na análise colorimétrica das amostras, como é o exemplo do uso de sensores de fibra ótica e *near infrared spectroscopy* (NIRS) [23] [24].

Como resposta às novas necessidades, a empresa Inovwine (Inovação no setor do vinho e da vinha) desenvolveu três sistemas [25]:

- Sistema de genotipagem, seleção e certificação da vinha para garantir a origem e a qualidade das videiras com base em marcadores genéticos;
- Sistema de controlo e monitorização remota dos fatores biológicos e atmosféricos associados à vinha;
- Sistema composto por uma coleção de leveduras vínicas adaptadas às condições regionais e às exigências do mercado; e por um dispositivo de monitorização da sua dinâmica durante a fermentação.

Estes sistemas foram implementados num sensor, exemplificado na Figura 6, que permite monitorizar a temperatura e humidade do ar, humidade da folha, humidade do solo, radiação solar, radiação UV, velocidade e direção do vento, permitindo identificar os pontos da vinha com maior risco de pragas, a necessidade de rega, entre outros.



Figura 6: Sensor para monitorizar a temperatura, humidade do ar e da folha, entre outras (extraído de [25])

Estes sensores, em conjunto com os *smartphones*, permitem aos produtores recolher, analisar e enviar dados de forma mais eficaz, poupando tempo e recursos, uma vez que permitem obter os resultados

no local, transmitindo os mesmos no imediato, através do carregamento num banco de dados (*cloud*) [26].

A cor do vinho representa uma característica única na definição da gradação da qualidade, uma vez que é a primeira característica em que os consumidores reparam e pode influenciar a percepção do sabor do vinho, através das expectativas criadas pelo ser humano pela associação de cores com sabores [27].

Para medir a qualidade do vinho através da cor, apresentamos o seguinte exemplo de vinho do Porto, que exige uma constante monitorização da cor e da clareza. As análises realizadas ao vinho tinto do Porto são feitas em dois comprimentos de onda (520 nm e 420 nm) [28]. Uma vez que é comum a junção de diferentes tipos de uvas da mesma zona para obter uma mistura de vinho, para saber a cor final da mistura de várias uvas é utilizado o sistema de cor do CIELAB [29]. Adicionalmente, o controlo da cor tornou-se bastante importante durante o processo de envelhecimento conduzido nas caves para detetar grandes variações na cor do vinho [30]. Os vinhos jovens apresentam um máximo do espectro de absorção na região espectral em torno dos 520 nm e os envelhecidos na região espectral correspondente à cor amarelo/castanho (420 nm). A partir das medições realizadas nestes comprimentos de onda, são calculados os valores das três componentes  $L^*$ , *Lightness*, que pode variar entre 0 (opaco) e 100 (transparente),  $a^*$ , *redness* e  $b^*$ , *yellowness* que caracterizam o vinho do Porto e que permitem uma avaliação mais precisa sobre a cor da amostra.

Atualmente, os padrões vigentes em Portugal exigem o uso de técnicas espectroscópicas que permitem determinar a cor do vinho. Sendo as medidas experimentais realizadas no intervalo espectral compreendido entre os 360 nm e os 830 nm recorrendo a um iluminante, usualmente o D65, e um passo espectral de 1 nm [31].

Como podemos perceber pelo exemplo do vinho do Porto, todos os vinhos têm uma cor característica e esta é representada por um máximo do espectro de absorção num determinado comprimento de onda. Os vinhos novos caracterizam-se por uma cor vermelha-azulada brilhante, que se deve aos monômeros de antocianina extraídos das cascas de uva que evoluem rapidamente através da condensação com outros compostos [32].

# 3. ■

## Fundamentação Teórica

### 3.1. Sistema Visual Humano

A cor é um atributo fundamental da percepção visual humana e o olho humano apenas é sensível a uma pequena banda do espectro eletromagnético, compreendida entre 380 nm e 780 nm (Figura 7) [33].

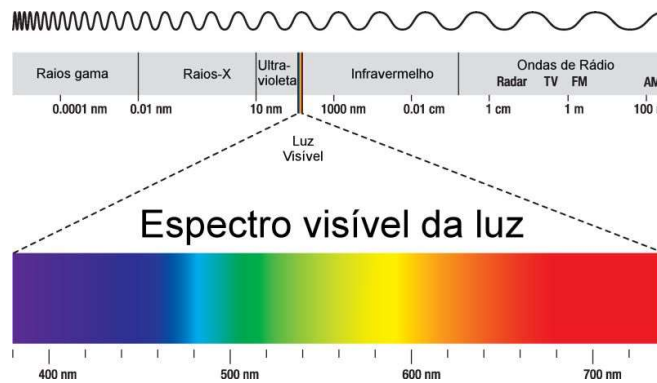


Figura 7: Espectro visível da luz (extraído de [34])

O sistema visual humano é composto por duas partes, o olho e o cérebro. Enquanto o olho funciona como uma espécie de câmara, o cérebro desempenha o papel de processamento de imagem. O olho humano, Figura 8, tem a forma esférica com cerca de 24 mm de diâmetro. A luz incidente atinge a córnea, parte desta é retida pela íris que regula a quantidade de luz que chega à retina. A retina, por sua vez, contém dois tipos de células sensíveis à luz, nomeadas de acordo com a sua forma: os cones e os bastonetes. Os bastonetes (cerca de 100 milhões) que permitem detetar os níveis de luminosidade e são, basicamente, os responsáveis pela visão noturna (*Scotopic*), detetando apenas tons de branco, preto e cinzento. Os cones (cerca de 4-6 milhões) permitem reconhecer as diferentes cores, principalmente em ambientes relativamente iluminados (*Photopic*) [33].

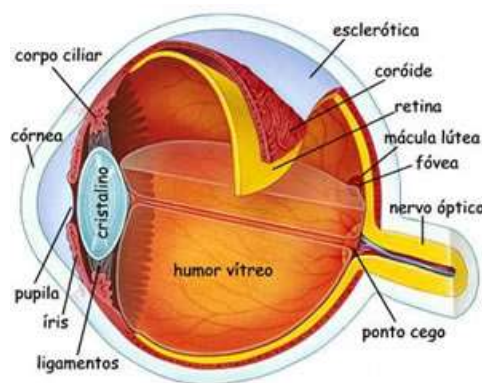


Figura 8: Olho Humano (extraído de [35])

Uma vez que os bastonetes são mais sensíveis à luz do que os cones, podemos identificar três tipos de visão tendo em conta a quantidade de luz que atinge o olho [34]:

- *Scotopic* – Apenas tons de cinzento (noite e ambientes escuros), bastonetes;
- *Photopic* – À luz do dia, cones;
- *Mesopic* – Lusco fusco, cones e bastonetes.

Existem três tipos de cones baseados no comprimento de onda a que são sensíveis, cuja sensibilidade espectral se encontra na Figura 9. A proporção relativa desses cones é de 32:16:1, respetivamente para os cones longos (L), médios (M) e curtos (S). Esta capacidade permite-nos afirmar que os humanos possuem uma visão tricromática, sendo cada imagem representada por 3 cores distintas: azul (S), verde (M) e vermelho (L).

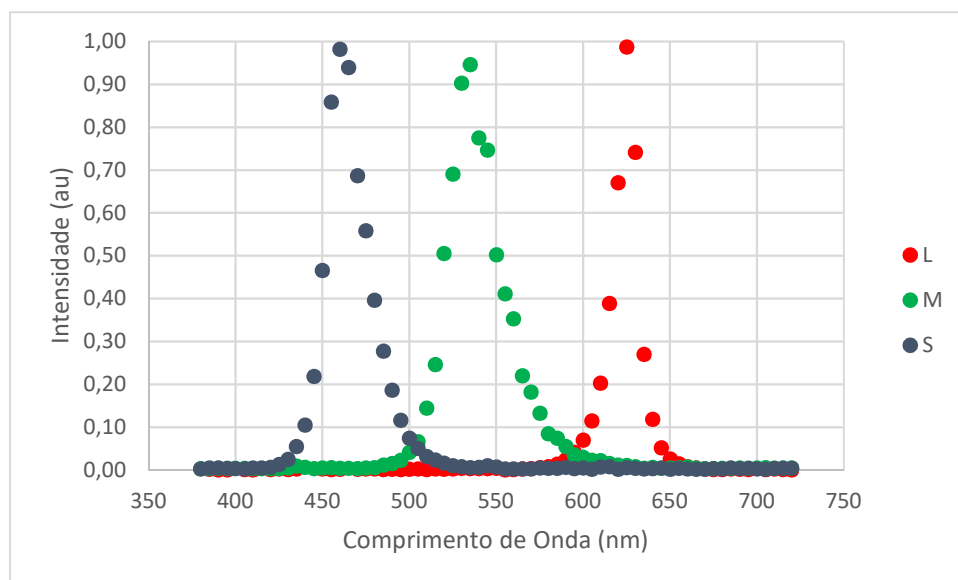


Figura 9: Resposta espectral dos cones L, M e S (extraído de [34])

Pode-se assim concluir que cada cor percebida através do sistema visual humano é uma combinação destas três cores, sendo a cor branca caracterizada pela igualdade das três (1/3 para cada componente).

## 3.2. Recetores Óticos

Os dispositivos de carga acoplada (CCD) são matrizes de silício baseadas em díodos MOS (*Metal-Oxide-Silicon*) que têm a capacidade de armazenar e transferir informações através de vários pacotes de carga [36]. Embora tenham sido originalmente inventados como um dispositivo de memória, os CCD destinam-se a ser usados como um sensor de imagem, usufruindo da sua sensibilidade à luz. Estes

recebem como entrada a luz de um objeto ou uma carga elétrica, captados através de pequenos detetores de luz, os pixels, que funcionam como um balde de elétrons que durante o tempo de exposição enchem-se na proporção da quantidade de luz captada [37] e posteriormente convertem-na num sinal eletrónico. O sinal à saída é então processado por outros equipamentos e/ou *software* para produzir uma imagem ou para fornecer informações [38].

A sensibilidade destes dispositivos varia consoante a fonte de luz, uma vez que o ganho de conversão depende do comprimento de onda do sinal ótico. O valor da tensão de saída no escuro aumenta com a temperatura ambiente e é necessário impor-se um limite para que este não atinja um valor de saturação. Caso este valor seja atingido a sensibilidade passa a ser zero e há perda de informação, daí a necessidade de controlar o valor máximo da tensão de saída mesmo que se continue a aumentar a intensidade da luz incidente [38].

Por sua vez, a resposta espectral é a resposta comparativa à exposição de luz com diferentes comprimentos de onda. Pela estrutura da região fotossensível, a sua resposta à cor azul é muito melhor do que um díodo MOS convencional e o uso de outro tipo de estruturas mais avançadas (sensor MD e sensor p-well) permite suprimir a sensibilidade dos elevados comprimentos de onda para melhor corresponder ao alcance visual humano. A Figura 10 ilustra a resposta espectral de um CCD que utiliza duas destas estruturas [39].

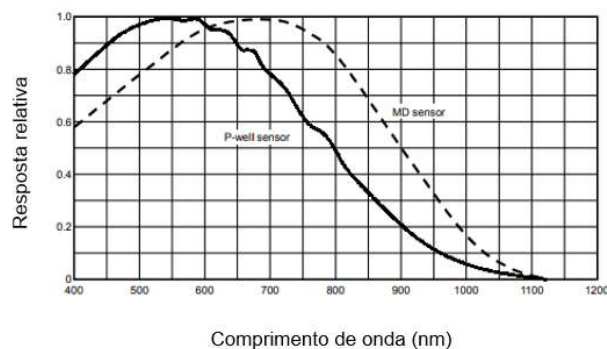


Figura 10: Resposta espectral (extraído de [39])

As câmaras CDD são muito úteis do ponto de vista científico, especialmente em astronomia, onde, com a ajuda de um telescópio permitem fotografar estrelas, galáxias e outros corpos celestes com uma resolução muito elevada que o olho humano não consegue detetar. Estes dispositivos também são muito usados em laboratório para captarem pequenos detalhes que uma máquina de fotografia comum não consegue, visto serem muito sensíveis à luz [37]. Para utilizar este tipo de tecnologia é preciso ter em consideração que é sempre necessário usar *software* para adquirir, ver e editar as imagens pretendidas.

### 3.3. Radiometria, Fotometria e Visão Tricromática

A Radiometria é a ciência que quantifica a luz na região visível do espectro eletromagnético. A luz é energia radiante e à sua exposição por comprimento de onda  $\lambda$  dá-se o nome de energia radiante espectral [40]. Uma vez que a luz viaja pelo espaço, a potência radiada é normalmente descrita como fluxo radiante e o seu valor por unidade de área numa superfície denomina-se por densidade de fluxo radiante [32]. Esta densidade pode tomar dois valores distintos consoante a orientação do fluxo numa superfície, se este está a chegar à superfície (Irradiância) ou a sair da mesma (Saída Radiante). Por fim, a densidade de fluxo radiante espectral é obtida dividindo o valor da Irradiância e da Saída Radiante por unidade de comprimento de onda [40]. A radiância é a quantidade infinitesimal de fluxo radiante contido num raio, que está a chegar ou a sair de uma superfície, sendo a radiância espectral a mesma quantidade, mas representada por unidade de comprimentos de onda, enquanto a intensidade radiante espectral é a intensidade radiante por unidade de tempo [40].

Por outro lado, a fotometria é a arte de medir a radiação visível tendo em conta as características do sistema visual humano. É uma ciência quantitativa baseada num modelo estatístico da resposta visual à luz sobre condições cuidadosamente controladas [41]. Em fotometria não se mede a potência ou a energia radiada, mas sim a impressão subjetiva produzida por estimulação do sistema visual com essa energia. Esta tarefa torna-se bastante complicada uma vez que o olho humano não tem uma resposta linear à luz, pois esta depende de diversas variáveis, entre as quais: o comprimento de onda, a quantidade de fluxo radiado, a intermitência da luz, a complexidade espacial da cena observada, a adaptação da retina e da íris, entre outras [40]. O fluxo luminoso é o fluxo radiante ponderado fotometricamente e a sua unidade de medida é o *lumen*, definido como 1/683 de potência radiada à frequência de  $540 \times 10^{12}$  Hz, e este fluxo é emitido por uma fonte luminosa com um espectro de potência, com a informação da sensibilidade média do olho humano [33]. Por último, a iluminância é o equivalente fotométrico da irradiância, onde a saída luminosa é o equivalente fotométrico da saída radiante. A luminância é a radiância ponderada fotometricamente e representa-se em termos de percepção visual. É uma medida aproximada de quão brilhante parece uma superfície segundo uma determinada direção, antigamente conhecida por brilho fotométrico [40].

Para o desenvolvimento desta dissertação apenas estamos interessados nas medições fotométricas, uma vez que todo o processo de análise desenvolvido tem por base as cores, e valores representativos dessas cores, de diferentes amostras. Para isso, é necessário compreender o que é a visão tricromática.

Em 1931 foram criados, pelo CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*), dois espaços de cor, o RGB e o XYZ. As CMF (*Color Matching Functions*), de cada um destes espaços estão representadas na Figura 11, e caso os valores sejam todos iguais é produzida a cor branca. No caso do XYZ, a CMF de Y é definida para corresponder à função de eficiência luminosa do olho humano.

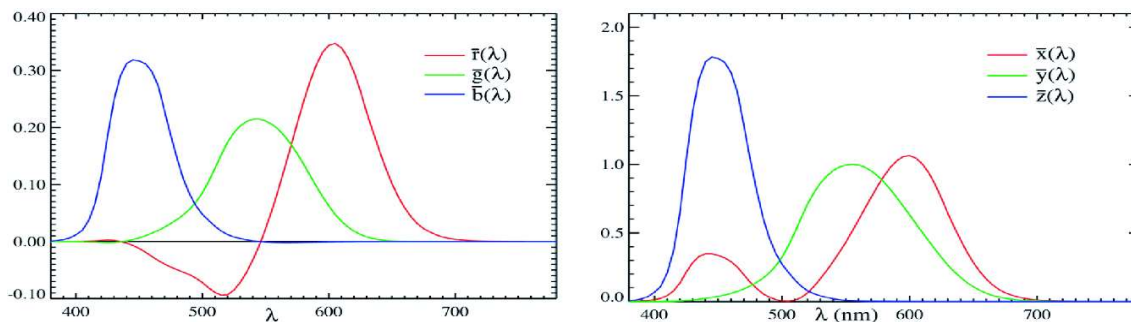


Figura 11: a) CIE RGB CMF; b) CIE XYZ CMF (extraído de [33])

É possível obter os valores de XYZ a partir dos dados espectrais da seguinte forma:

$$X = \frac{K}{N} \int S(\lambda)I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$Y = \frac{K}{N} \int S(\lambda)I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \frac{K}{N} \int S(\lambda)I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

Onde  $S(\lambda)$  é a refletância espectral,  $I(\lambda)$  é a densidade espectral de potência,  $N = \int I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$ ,  $K$  é um fator de escala (normalmente 1 ou 100) e  $\lambda$  o comprimento de onda. A partir destes resultados é possível normalizar XYZ nas coordenadas de cromaticidade (x,y) e representá-las no plano xy, Figura 12, uma vez que  $z = 1 - x - y$ :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (6)$$

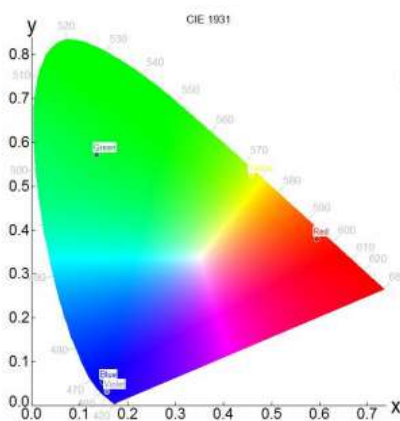


Figura 12: Diagrama de cromaticidade (extraído de [42])



O modelo de cor aditivo mais comum é o RGB. Este modelo é utilizado para apresentar as cores em diversos dispositivos eletrônicos como televisões, computadores, câmaras, etc. Outros modelos de cor usados com frequência são:

- CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow, Black*) – Usado em impressoras;
- YCbCr (Luminância, Crominância Azul, Crominância Vermelha) – Usado em codificação de vídeo e câmaras digitais;
- YUV (Luminância, Crominância Azul, Crominância Vermelha) – Usado em codificação de vídeo.

Embora não sendo o modelo mais comum, neste projeto iremos utilizar os valores de XYZ das amostras estudadas.

### 3.4. Inversão dos valores XYZ para espectro

De uma forma geral, a inversão dos valores XYZ para o espectro pode ser direta, uma vez que os valores de XYZ são diretamente proporcionais às componentes de um espectro fundamental.

O primeiro passo para efetuar esta inversão consiste na definição da constante de proporcionalidade, à qual se irá associar a letra K. Para se calcular o valor desta constante é necessário multiplicar a segunda coluna da matriz A (matriz CMF CIE 1931 correspondente aos valores de XYZ com o passo espectral de 5 nm na região entre os 380 nm e os 720 nm, Anexo A) pelo espectro de iluminação de uma fonte de luz, seguido pelo somatório de todos os valores do vetor gerado [42].

$$K = \sum_{i=1}^{69} y(\lambda)_i * I(\lambda)_i \quad (7)$$

À constante de proporcionalidade K dá-se o nome de fator de escala, que é posteriormente utilizado para calcular um novo vetor (B) com três coordenadas [43], obtido através da multiplicação do fator de escala por cada uma das componentes XYZ que representam uma determinada cor.

$$B [X Y Z] = [K * x \quad K * y \quad K * z] \quad (8)$$

No passo seguinte, é necessário obter uma matriz E, Anexo B, onde cada coluna representa cada uma das três componentes (XYZ), utilizada como base para o cálculo e representação do espectro [43]. Para se conseguir obter esta matriz numa primeira fase é necessário multiplicar a matriz A pela sua transposta e de seguida, calcula-se a inversa desta multiplicação. O valor obtido a partir desta inversão, é subsequentemente multiplicado pela transporta da matriz A e por último transposto, resultando numa nova matriz, conforme se pode verificar na equação 9 [43]:

$$E = ((A' \times A)^{-1} \times A)' \quad (9)$$

Por fim, combinando os valores da matriz E com o vetor B, conforme podemos verificar na equação 10, é possível obter os valores finais utilizados para representar o espectro [43].

$$f = B \times E \quad (10)$$

Com os valores obtidos a partir desta equação, passa a ser possível representar os valores de XYZ no espectro inicial.

É com base no método acima descrito que utilizando os valores de XYZ correspondentes a cada amostra, iremos proceder à sua inversão para tentar chegar ao espectro inicial representativo da amostra em estudo. Para dar algum significado a esta dissertação, na inversão das três componentes de cor não se irá recorrer aos dados do espectro inicial. Consequentemente, não será calculada a constante de proporcionalidade K nem o vetor B, originando assim uma nova fórmula para obter os valores finais  $f = [x \ y \ z] \times E$ . Optou-se por adotar esta cláusula para que o método em estudo apresentasse alguma inovação e não fosse apenas uma inversão baseada em dados já conhecidos à priori.

# 4.

## Resultados

## 4.1. Teste do procedimento de inversão espectral de um LED de iluminação de um iPhone 4

Com o objetivo de demonstrar a exequibilidade da utilização de um *smartphone* para quantificar as características colorimétricas de uma amostra, foi iniciada a implementação de um algoritmo, em Matlab, que visa a utilização da luz proveniente de uma fonte de luz branca numa determinada amostra e analisa a imagem obtida do sinal ótico transmitido pela amostra. Com estes valores, e seguindo o método descrito na secção 3.4, será possível obter o espectro de absorção da amostra em estudo e consequentemente o espectro de absorção da cor do exemplar em análise. Este espectro de absorção permite a realização de uma análise qualitativa desse vinho e perceber se este atinge os requisitos mínimos de qualidade impostos pela lei [31]. A descrição do método utilizado encontra-se na Figura 13.

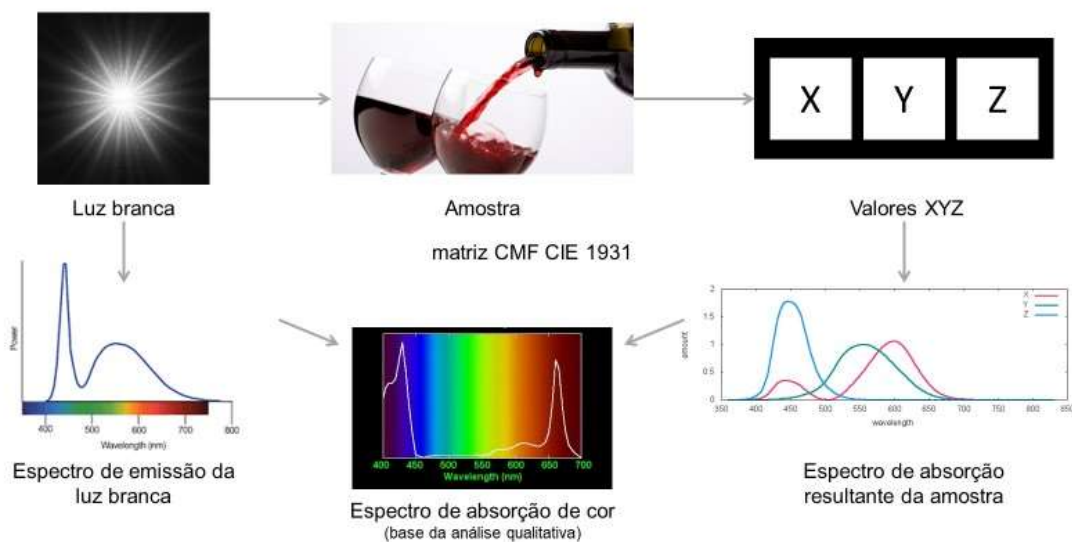


Figura 13: Método para analisar uma amostra de vinho

Para que fosse possível analisar uma amostra de vinho desenvolveu-se uma rotina que executasse todo o método da inversão espectral, a partir das coordenadas correspondentes de uma cor (XYZ), e assim fosse possível comparar o espectro inicial com o resultado obtido através desta inversão.

Em primeiro lugar, foi utilizado o espectrómetro *Oceanview S09500* com uma resolução de 1024 pixels e um tempo de integração de 1 segundo, para obter o espectro de emissão do LED de iluminação de um iPhone 4 e o espectro de transmissão da amostra em análise. Os dados experimentais, referentes ao LED de iluminação, foram interpolados para a região espectral compreendida entre os 380 e os 720 nm com um passo espectral de 5 nm, de acordo com os requisitos CIE, originando no espectro ilustrado na Figura 14.

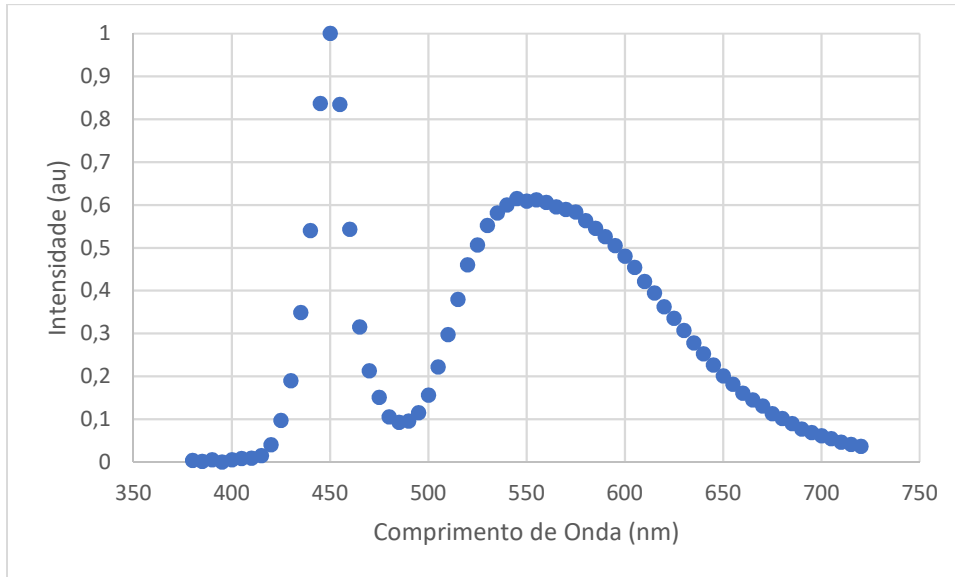


Figura 14: Espectro de emissão do LED de iluminação de um iPhone 4

O passo seguinte é tentar chegar ao espectro do LED estudado através da inversão dos valores de XYZ. Para isso, e tendo por base os resultados apresentados na figura anterior, calcularam-se os valores de XYZ que servem de apoio à resolução do método da inversão espectral descrito na secção anterior. A partir dos valores de XYZ, e recorrendo às expressões que descrevem a inversão espectral, tentou-se obter novamente o espectro original. A Figura 15 ilustra esse espectro reconstruído, com um erro em relação ao original de 0.2485.

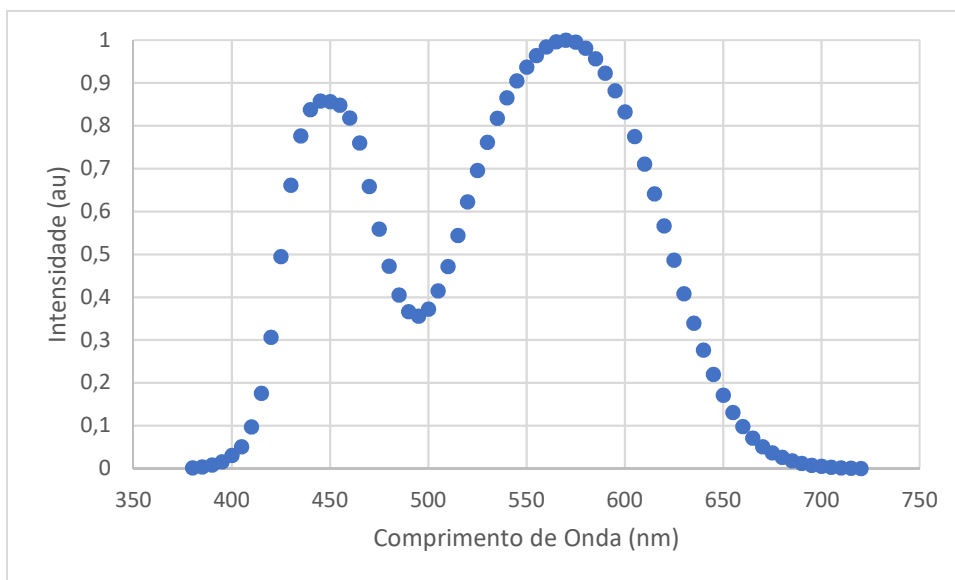


Figura 15: Espectro LED branco obtido através da inversão dos valores XYZ (RMSE = 0.2485)

Era de esperar que ambos os gráficos fossem idênticos visto estar-se a proceder à inversão dos valores de XYZ para uma fonte de luz branca, mas como é possível observar o mesmo não acontece e utilizando o valor do erro [44], entre os valores de ambos os espetros, podemos confirmar essa mesma discrepância de gráficos. Este valor difere do ideal (0), que representaria uma igualdade dos dados obtidos. Estas diferenças devem-se essencialmente à perda de informação na obtenção dos valores de XYZ e na consequente inversão dos mesmos, principalmente pela necessidade de redução do número inicial de amostras, por meio de uma interpolação, de 1024 para as necessárias, com o objectivo de conseguir utilizar a matriz CIE 1931 XYZ com espaçamento espectral de 5 nm. Perante estes resultados foi necessário melhorar o processo do método de inversão espectral com o objectivo de aproximar as representações espectrais.

## **4.2. Melhoria do método de inversão espectral**

Depois dos resultados inconclusivos e desajustados obtidos anteriormente, tornou-se imperativo tentar alterar o desfecho do método de inversão espectral. O primeiro passo foi a redução do espaçamento espectral de 5 nm para 1 nm, com o objetivo de inspecionar se aumentando o número de amostras, e consequentemente perdendo menos informação, seria possível atingir resultados mais satisfatórios. Para efetuar este teste, foi necessário interpolar novamente os valores obtidos em laboratório para que fossem elegíveis de ser aplicados ao método de inversão espectral. Depois da interpolação feita, foi necessário alterar a matriz que serve de base a todo o método de inversão espectral, a matriz CMF CIE 1931, para que esta também apresentasse um espaçamento espectral de 1 nm. Com todas as variáveis em concordância procedeu-se ao cálculo do espectro invertido e, como é possível comprovar pela Figura 16, os resultados pouco, ou nada, diferem dos alcançados anteriormente, sendo então possível concluir que a utilização de um passo espectral mais ou menos estreito em nada contribui para a perda de informação e para uma representação desajustada do espectro inicial. Neste caso, para além do que já foi mencionado, o valor do erro entre gráficos aumentou consideravelmente para 0.4177.

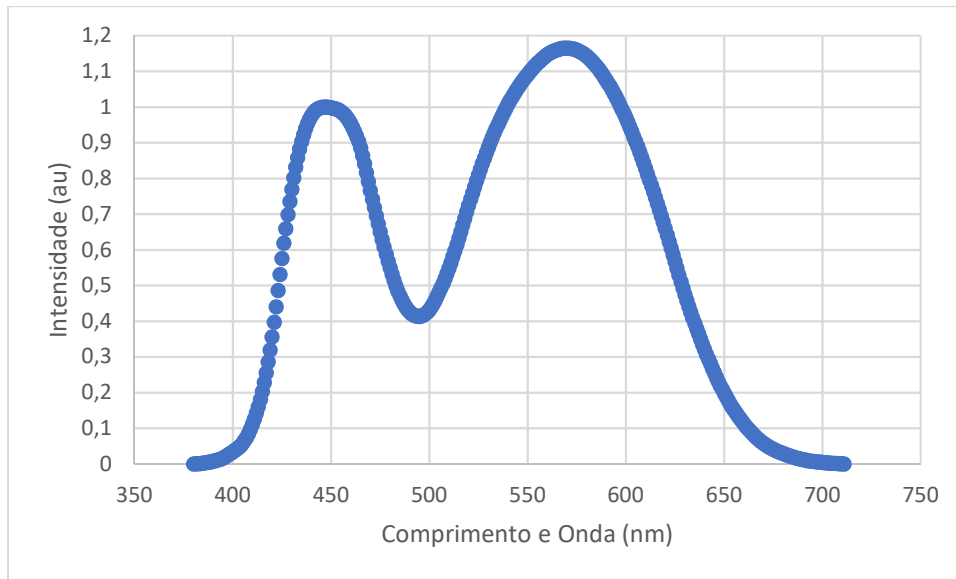


Figura 16: Espectro LED branco obtido através da inversão dos valores XYZ (RMSE = 0.4177)

Depois das conclusões tiradas a partir da interpretação da figura, e voltando novamente a utilizar o passo espectral inicial de 5 nm, decidiu-se calcular os valores de XYZ a partir dos valores de intensidade que compõem o espectro invertido. Este passo tem como objetivo comparar estes três valores com os do espectro original e perceber se a aplicação do método da inversão espectral está a ser bem calculada. Depois de feita a experiência, verifica-se que os valores das três coordenadas se mantêm inalterados, o que nos leva a excluir a hipótese que pela inversão do espectro os valores de XYZ se modifiquem, originando uma adulteração dos resultados.

O passo seguinte, na tentativa de descobrir a origem das diferenças espectrais obtidas, foi a criação de uma rotina que minimizasse o valor do erro quadrático médio utilizando apenas como parâmetros a alterar os valores das três coordenadas que representam a cor do LED estudado (XYZ). Recorrendo à ferramenta Solver do Excel [45], verifica-se que o valor de RMSE diminuiu de 0.2485 para 0.2108. Com esta diminuição, e como é possível comprovar pela Figura 17, é de esperar que exista uma ligeira melhoria no gráfico do espectro invertido.

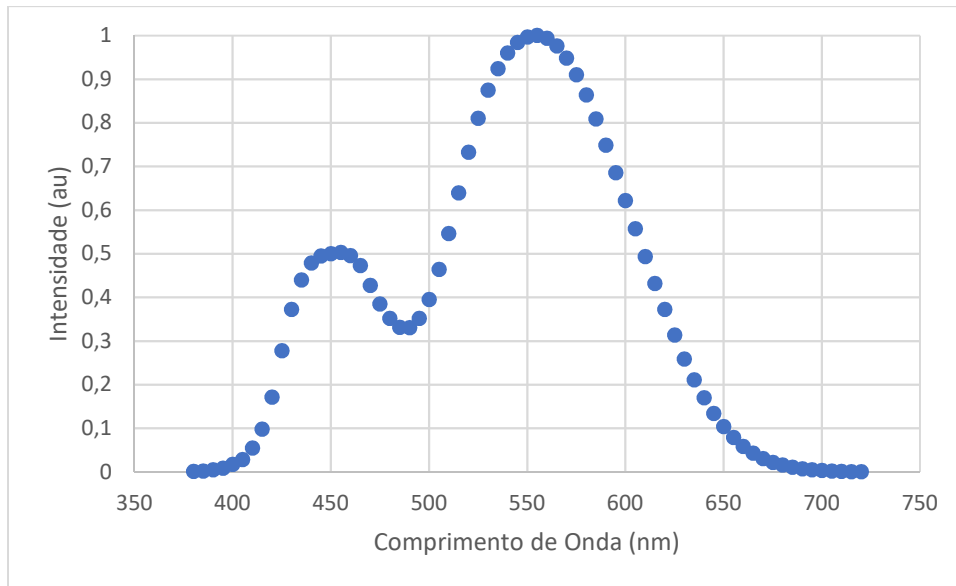


Figura 17: Espectro LED branco depois da minimização (RMSE = 0.2108)

Como se pode observar ao comparar os gráficos das Figuras 15 e 17, a representação espectral, aquando da minimização do erro, melhorou ligeiramente. Apesar dos valores de intensidade nos dois máximos se apresentarem praticamente iguais ao gráfico original, estes encontram-se trocados em relação ao comprimento de onda. Enquanto que o maior máximo do gráfico invertido deveria estar aproximadamente nos 450 nm, este encontra-se nos 550 nm, local onde deveria ser registado o menor dos máximos. Conclui-se que o método de inversão espectral está a ser bem implementado, à exceção do mesmo se encontrar invertido sobre o seu valor de mínimo no eixo das abcissas, aproximadamente nos 490 nm.

Uma vez que não se atingiram melhorias significativas em relação ao método de inversão espectral, optou-se por aplicar este método a diferentes amostras na expectativa que ao operar com diferentes exemplares de cor, os resultados produzidos fossem mais eficazes. Utilizaram-se os três espectros, da emissão CIE, que representam as cores azul, verde e vermelho, e após calcular os valores de XYZ para cada uma das três amostras, procedeu-se à inversão espectral dos mesmos. Os resultados obtidos a partir desta experiência estão registados nas Figuras 18, 19 e 20.



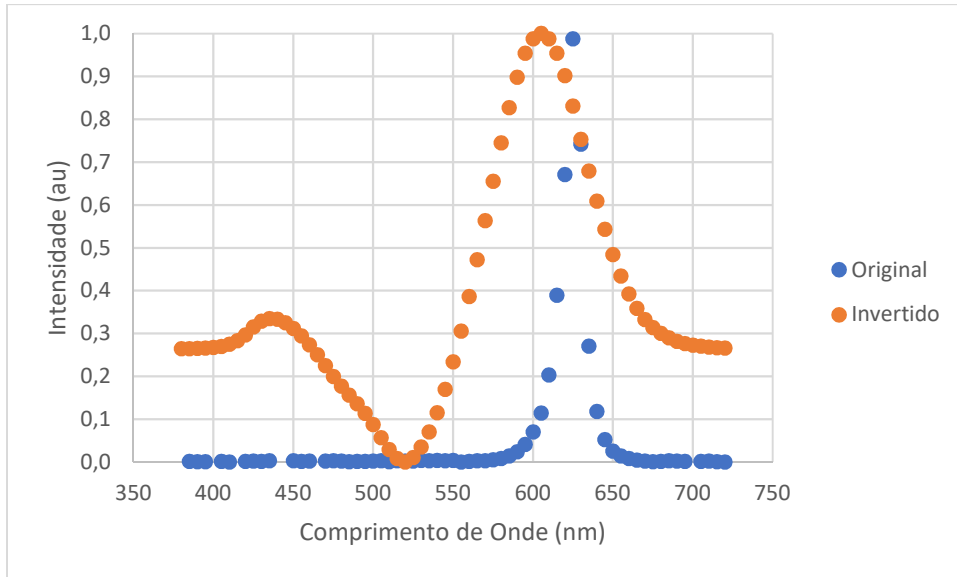


Figura 18: Espectro original e invertido para a cor vermelha (RMSE = 0.3256)

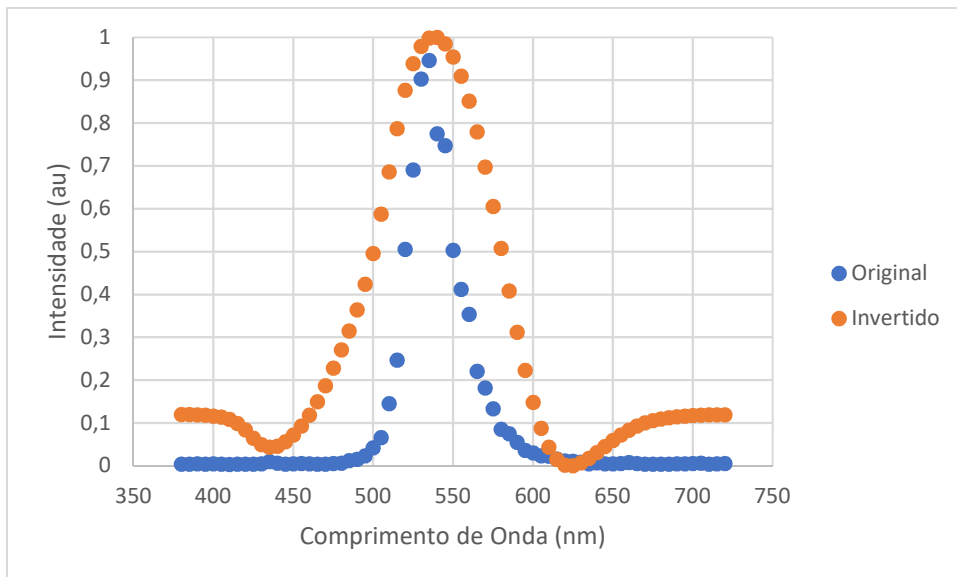


Figura 19: Espectro original e invertido para a cor verde (RMSE = 0.2964)

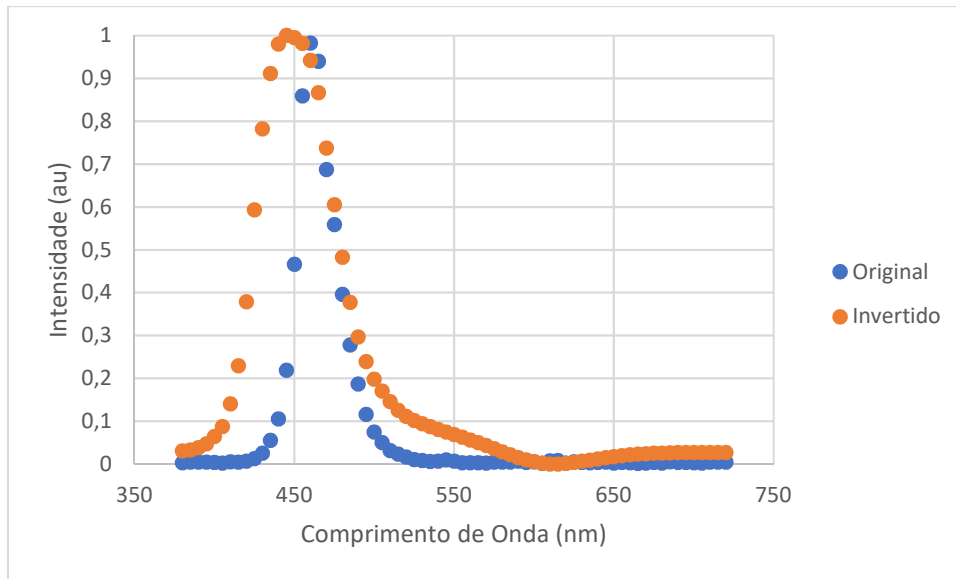


Figura 20: Espectro original e invertido para a cor azul (RMSE = 0.3452)

Conclui-se que, a qualidade do espectro invertido aumenta à medida que o comprimento de onda característico de cada cor diminui. Seguindo-se este raciocínio, o espectro da cor Azul é aquele que mais se aproxima do original, contudo o seu valor do erro não corresponde a esta aproximação gráfica. Os diferentes valores do erro para as cores vermelha, verde e azul foram 0.3256, 0.2964 e 0.3452 respetivamente. Foram então realizados mais quatro testes com diferentes corantes que simularam as cores amarela, azul marinho, castanho e verde. Após a recolha e tratamento dos dados (interpolação e cálculos das três coordenadas de cor características de um espécime) referentes a cada uma das amostras, efetuaram-se as quatro inversões espectrais correspondentes a cada um dos exemplares em questão. Os resultados de todas as quatro experiências não apresentaram repercussões significativas e, por se mostrarem novamente inconclusivos, optou-se pela sua omissão gráfica neste relatório. É provável que estas desigualdades estejam correlacionadas com o facto de os corantes não representarem uma simulação real das cores que se ambicionavam estudar.

Chegou-se à conclusão que uma das possíveis causas para a inconsistência dos dados, fosse o facto desta ferramenta apenas realizar cinco iterações, limitando assim o progresso da rotina de minimização. Foi então que, com base nesta contrariedade, se decidiu implementar esta rotina com recurso a outra ferramenta.

### 4.3. Melhoria do método de inversão espectral recorrendo ao MATLAB (Fminsearch)

De acordo com os resultados atingidos com o Excel, sentiu-se a necessidade de implementar uma nova rotina de minimização do RMSE para tentar melhorar a representação do espectro invertido. A ferramenta escolhida para reproduzir esta rotina foi o Matlab e para a implementar foram desenvolvidos dois *scripts*, que podem ser consultados nos Anexos C e D, um que calcula o erro quadrático médio e outro que o minimiza através da função *fminsearch* [46]. Conjeturou-se que, aumentando o número de iterações realizadas os resultados produzidos melhorassem, originando assim uma representação gráfica mais fidedigna dos resultados. Para além de todos os cálculos inerentes a estas funções, os *scripts* geram os espectros original e invertido na mesma figura, que atualiza à medida que a função *fminsearch* vai fazendo iterações até chegar ao menor valor do erro quadrático médio possível.

Para a primeira experiência explorou-se novamente o LED de iluminação do iPhone, e tendo em conta o número de iterações desempenhadas pela rotina, facilmente se percebe que operando apenas com os valores de XYZ como parâmetros a alterar, a rotina passa a fazer cento e treze iterações. De seguida, na perspetiva de melhorar o valor final de RMSE, foram testadas todas as sete hipóteses combinando os valores de XYZ:

1. Mudar os valores de XYZ;
2. Mudar os valores de XY;
3. Mudar os valores de XZ;
4. Mudar os valores de YZ;
5. Mudar os valores de X;
6. Mudar os valores de Y;
7. Mudar os valores de Z.

Para se resumir a informação e reduzir o excesso de imagens, apenas se apresentam as soluções onde foram registados o menor valor do erro quadrático médio e a maior semelhança gráfica, Figuras 21 e 22.

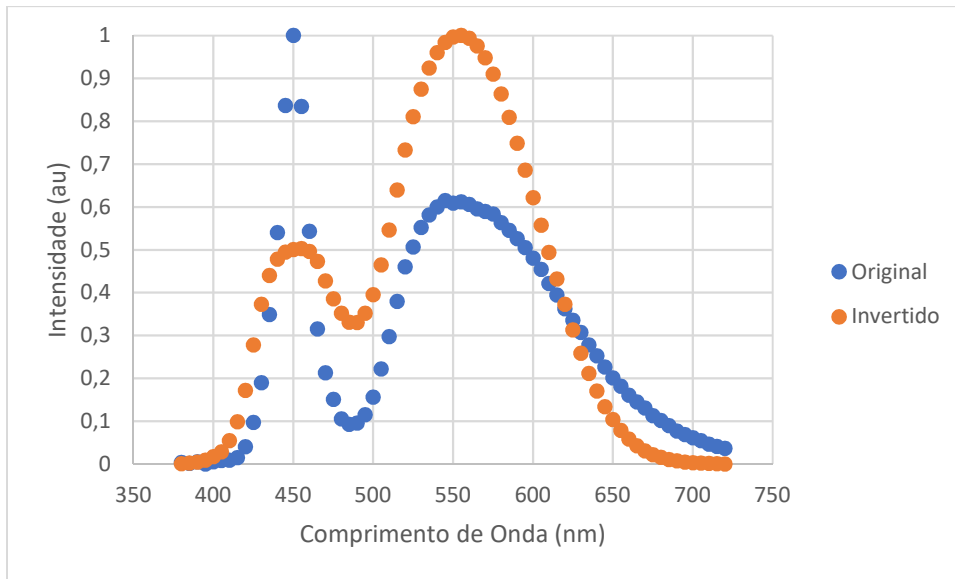


Figura 21: Espectro original e espectro invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.2108)

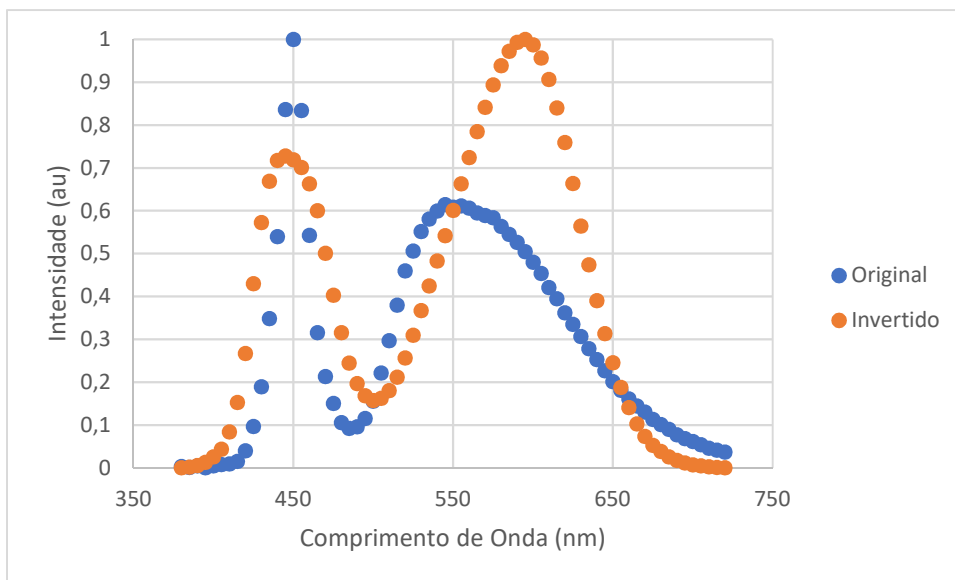


Figura 22: Espectro original e espectro invertido (Minimização com X, RMSE = 0.2246)

Utilizando apenas os diferentes valores de RMSE como termo de comparação, e tendo por base o valor inicial de 0.2485, pode-se depreender que empregando as hipóteses 1, 2 e 4 se atinge o menor valor do erro possível (0.2108). É automaticamente perceptível que o aumento do número total de iterações em nada afetou o valor final do erro, uma vez que o valor obtido foi igual ao calculado na secção anterior. Caso se recorra à comparação gráfica entre os dois espectros, os testes 1, 2 e 4 são iguais entre si, o que era de esperar visto que todos têm o mesmo valor do erro quadrático médio. No caso número 3, o primeiro máximo do gráfico melhora substancialmente, enquanto o segundo exibe uma ligeira piora. As combinações onde o espectro invertido mais se assemelha ao inicial são a 5 e a 6, onde na primeira destas situações o primeiro máximo é o que mais melhora e o segundo piora muito pouco,

enquanto que na segunda circunstância, ambos os máximos melhoram quando comparados com a primeira hipótese. Estes resultados estão mais uma vez desajustados em relação ao esperado uma vez que, com a diminuição do erro as semelhanças espectrais deveriam aumentar, o que não se verificou ao estudar esta amostra. A principal razão para tais ocorrências prende-se com o facto de a luz branca ter um espectro demasiado amplo, 380 nm a 720 nm, compreendendo assim demasiada informação para a correta aplicação do método de inversão espectral.

Procedeu-se à alteração da amostra, afim de compreender se a rotina atingiria melhores resultados utilizando uma cor caracterizada por um espectro mais estreito e com menos informação. A primeira cor escolhida foi a azul e, neste caso, o valor mais baixo registado para o erro foi de 0.2259. Este mínimo é alcançado através da aplicação das hipóteses 1, 2, 3 e 4, enquanto que para os outros três casos o erro atinge um valor mais elevado. Ponderando-se novamente a comparação gráfica, é possível constatar que nas quatro primeiras situações os gráficos são iguais, o que era de esperar face à sua igualdade no valor de RMSE. Alterando individualmente os valores de X, Y ou Z, as representações gráficas apresentam todas ligeiras diferenças entre elas, e é notável que nas situações 5 e 7 existe uma diminuição da qualidade representada, sendo esta mais acentuada no caso 7. Mudando apenas o valor de Y atinge-se a melhor situação, o que vem mais uma vez contrariar o seu valor do erro. A segunda cor selecionada foi a amarela, e os resultados alcançados nas sete diferentes experiências foram análogos aos da cor azul. Embora no caso da cor amarela as hipóteses 1, 2, 3 e 4 tenham registado um valor muito menor de RMSE, 0.0751, o que veio a ser corroborado pela homogeneidade da representação espectral. Embora a representação espectral continue a apresentar algumas imperfeições, é possível notar que existe uma melhoria significativa na sua representação gráfica, quando se compara com a cor branca. Tal é comprovado pelas Figura 23 e 24, onde estão evidenciados os gráficos do espectro original e invertido, quando existe uma alteração dos três parâmetros (XYZ), para as duas amostras de cor estudadas.

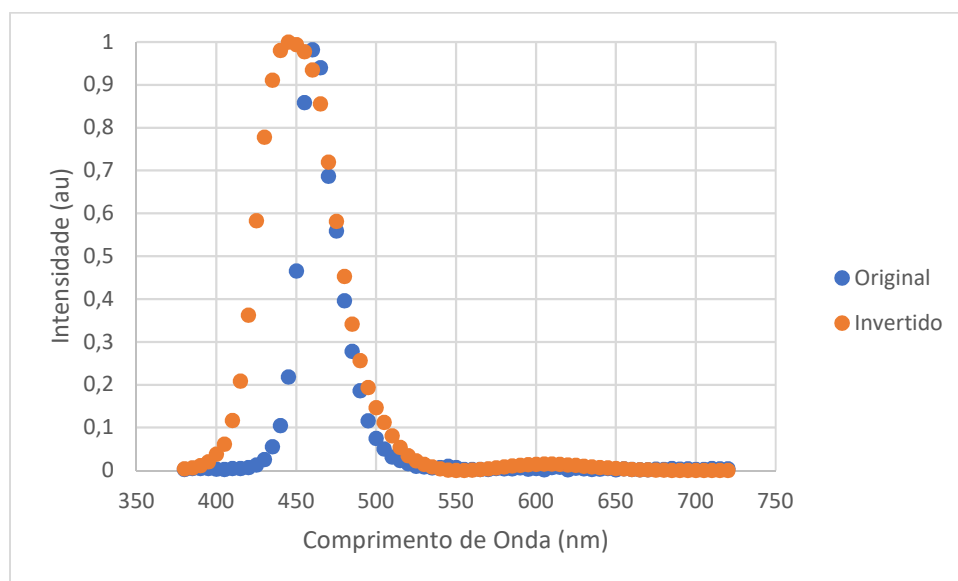


Figura 23: Espectro original e espectro invertido para a cor Azul (RMSE = 0.2259)

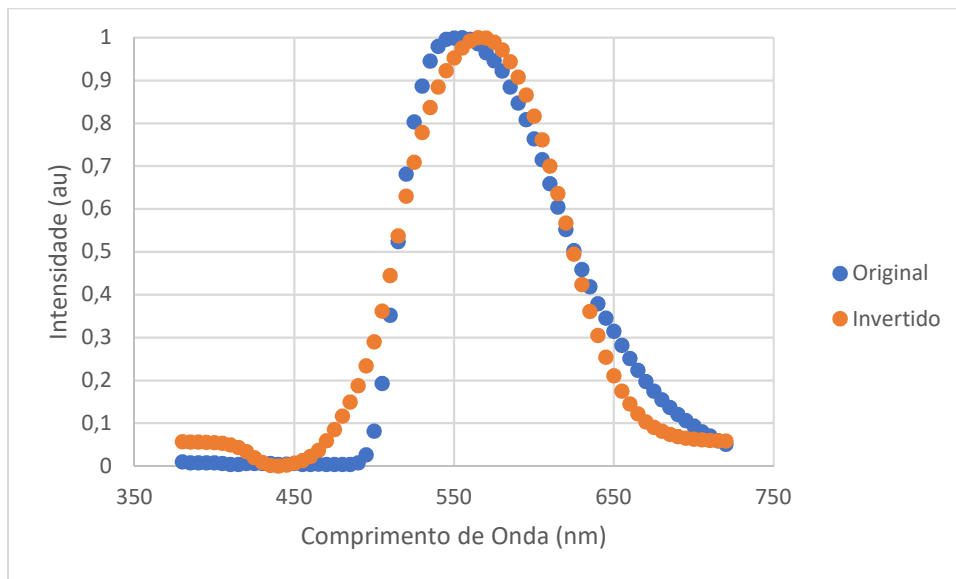


Figura 24: Espectro original e espectro invertido para a cor Amarelo (RMSE = 0.0751)

Como é possível legitimar pelas duas figuras anteriores, a semelhança entre os espectros nos casos da cor amarela e azul é notória, quando em comparação com a cor Branca. Esta aparência sustenta-se no facto de ambos os espectros conterem menos informação comparativamente com o espectro do LED de iluminação do iPhone (ambos apresentam apenas um máximo e algumas porções têm valores próximos de zero).

De seguida, e voltando a utilizar o LED de iluminação do iPhone, alteraram-se os dois *scripts* para que os resultados do método de inversão espectral não fossem normalizados, com o propósito de manter os resultados calculados através da inversão espectral. Neste caso o valor do erro quadrático médio diminuiu consideravelmente, de 0.2485 para 0.1148. A melhor representação do espectro invertido até agora testada, para o LED do iPhone, foi atingida com esta solução e tal é facilmente comprovado pela Figura 25. No caso do segundo máximo, como já não existe uma normalização dos dados entre 0 e 1, este aproxima-se bastante do resultado desejado, enquanto o primeiro máximo praticamente não sofreu qualquer mutação.

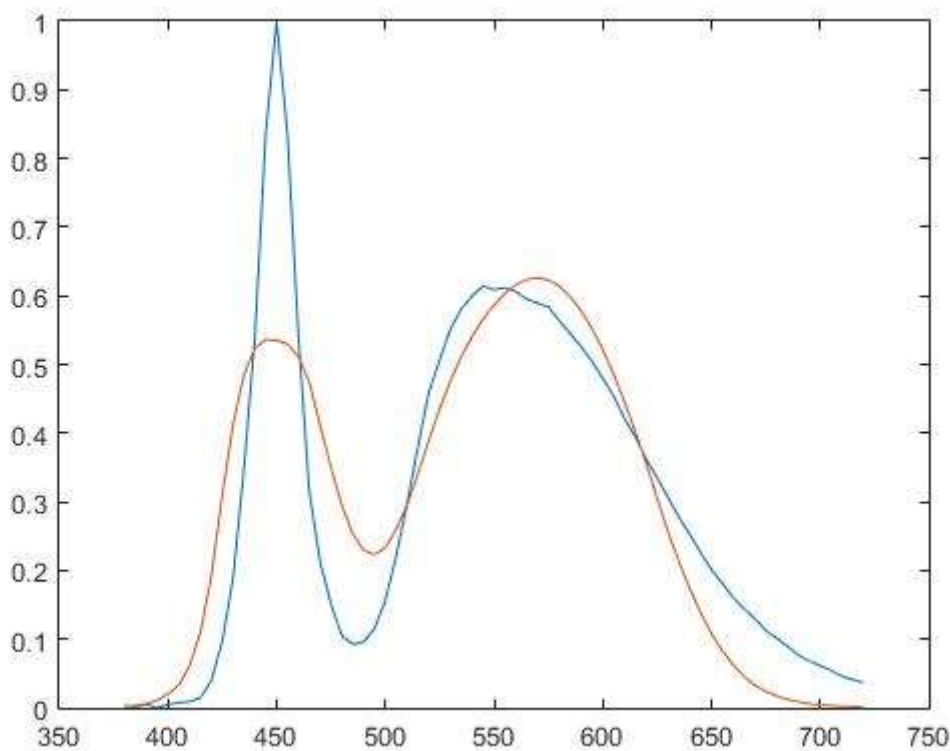


Figura 25: Espectro original e espectro invertido com dados não normalizados (LED branco)

Após o desenvolvimento desta experiência, chegou-se à conclusão de que se estava a tomar o rumo certo no aperfeiçoamento do método de inversão espectral. Portanto, com a meta de tentar aprimorar ainda mais o método, decidiram-se fazer mais duas novas experiências onde a totalidade do espectro (380nm a 720 nm) seria dividida em duas partes:

1. Divisão com 25 amostras, entre 380 nm e 500 nm, e 45 amostras, entre 500 nm e 720 nm;
2. Divisão com 35 amostras, entre 380 nm e 550 nm, e 35 amostras, entre 550 nm e 720 nm.

Para se calcular o valor do erro foi necessário somar os valores de RMSE de cada um dos dois blocos de amostras, sendo então necessário multiplicar cada um deles por uma constante, alfa e beta. A soma de alfa e beta tem de ser igual a 1 e inicialmente foram atribuídos os valores de 0.7 e 0.3 a estes dois coeficientes, respetivamente. Após a simulação de cada um dos dois testes, para o LED de iluminação do iPhone, registaram-se dois valores distintos para o erro quadrático médio, 0.2329 na hipótese com os conjuntos assimétricos e 0.1373 no cenário com conjuntos simétricos. É viável afirmar que quando se aplica uma divisão simétrica do conjunto total o valor do erro teria sempre de ser menor. Nas Figuras 26 e 27 estão representados os espectros originais e invertidos correspondentes a estes dois testes.

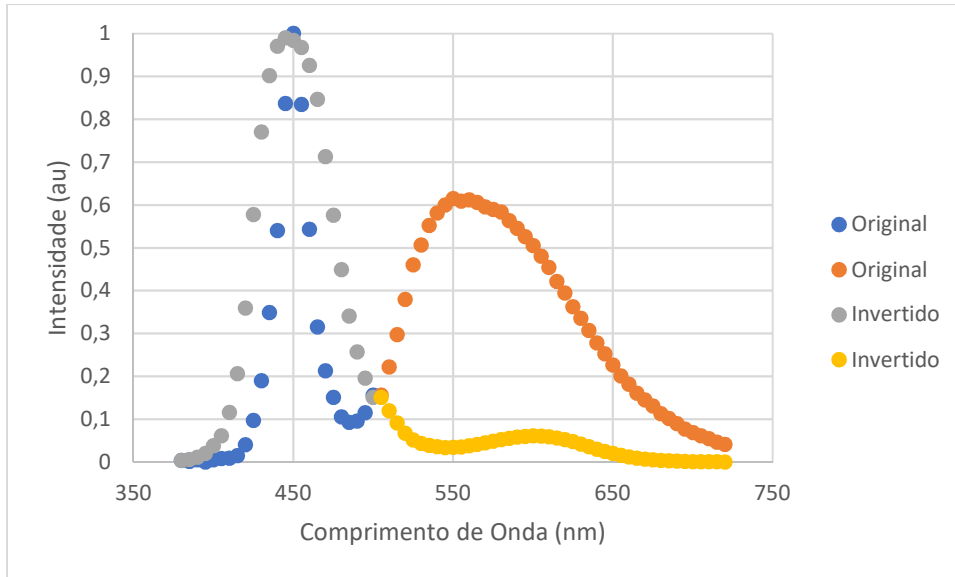


Figura 26: Espectro original e invertido para os conjuntos assimétricos (RMSE = 0.2329)

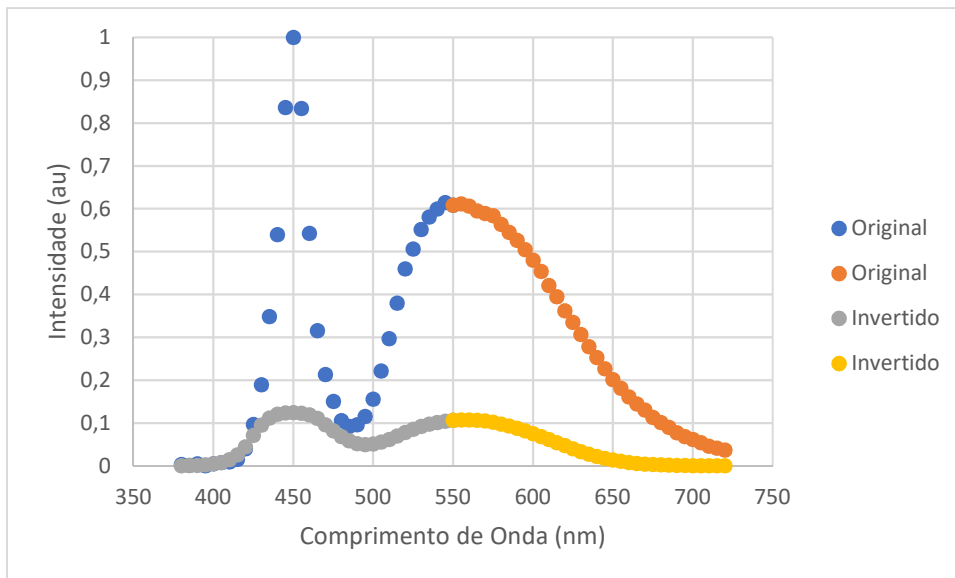


Figura 27: Espectro original e invertido para os conjuntos simétricos (RMSE = 0.1373)

Repetidamente, e como podemos comprovar pelas duas figuras patenteadas, os valores de RMSE não correspondem ao esperado graficamente. No caso da primeira divisão pode-se atentar que existe uma melhoria significativa no primeiro máximo, onde este apenas se apresenta um pouco mais largo que o original, enquanto no segundo máximo existe uma grande regressão. Para o segundo conjunto de amostras era de esperar que a representação espectral apresentasse uma ligeira melhoria, uma vez que o valor do erro diminui, mas novamente não se verificou tal ocorrência e a totalidade do gráfico do espectro invertido piorou, resultando no pior caso estudado até aqui.



Depois de utilizadas as duas ferramentas e de realizadas todas as experiências, chegou-se à conclusão que estavam reunidas as condições necessárias para testar todas estas hipóteses numa amostra de vinho.

## 4.4. Aplicação para a caracterização de uma amostra de Vinho

Após várias tentativas e testes, foi impossível colocar alfa como parâmetro a alterar e então optou-se por deixar o programa como estava e fazer o teste a uma amostra real. O vinho escolhido para esta amostra foi um tinto, *Grand' Arte Alicante Bouschet*, da região de Lisboa de 2014.

O primeiro passo desta experiência passa por recolher os dados necessários para desenvolver o método da inversão espectral. Assim sendo, e recorrendo novamente ao espectrómetro *Oceanview S09500*, foram recolhidas 1024 amostras representativas da intensidade do exemplar em estudo no espectro visível. Evocando mais uma vez a interpolação dos dados, chegou-se ao espectro ilustrado na Figura 28.

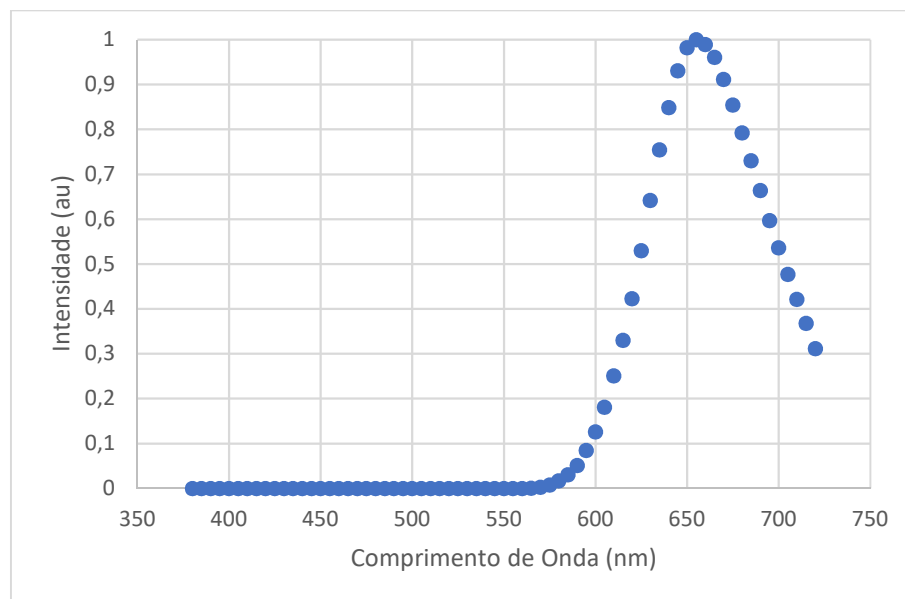


Figura 28: Espectro original da amostra de vinho

Como foi referido anteriormente, esta representação espectral apenas será utilizada como termo de avaliação da qualidade do método de inversão espectral. Portanto, tornou-se imperativo calcular os valores de XYZ correspondentes à cor do vinho tinto em estudo, quando iluminado com o LED de iluminação de um iPhone. Para isso, recolheram-se os valores de RGB inerentes a esta cor e através

do modelo matemático representado nas equações 11 a 14, foi possível obter os valores de XYZ que permitirão implementar todos os testes necessários [47].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.488718 & 0.31068 & 0.200602 \\ 0.176204 & 0.812985 & 0.010811 \\ 0 & 0.010205 & 0.989795 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$x = \frac{X}{x+Y+Z} \quad (12)$$

$$y = \frac{Y}{x+Y+Z} \quad (13)$$

$$z = 1 - x - y \quad (14)$$

Para o vinho estudado os valores de RGB foram [224;27;3], que uma vez aplicados ao método descrito nas quatro equações anteriores resultam nos valores de X=0.647, Y=0.336 e Z=0.017.

Aplicando os valores das três coordenadas de cor à primeira ferramenta, o valor do erro neste caso foi de 0.3179 e a comparação entre os gráficos antes e depois da aplicação do método pode ser feita com base na Figura 29.

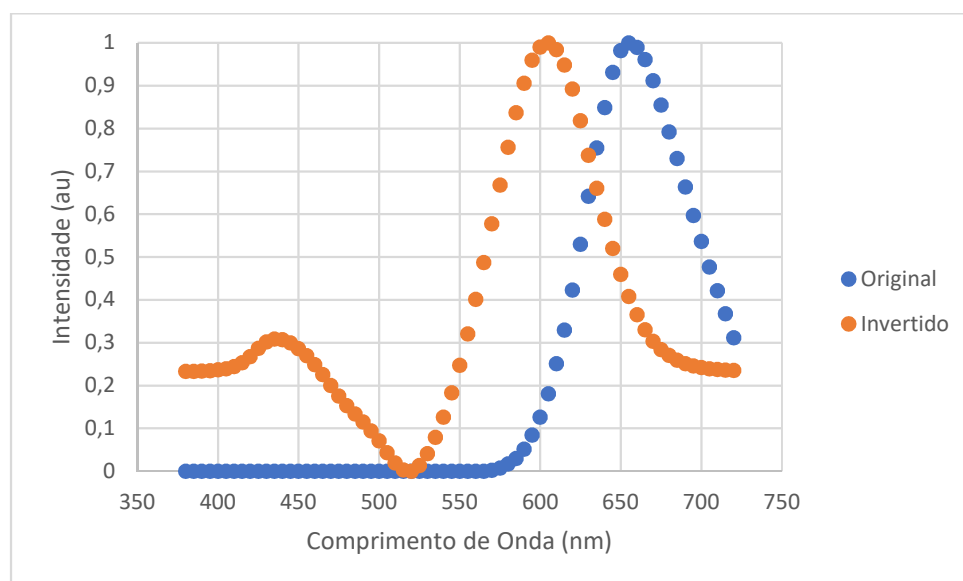


Figura 29: Espectro original e invertido utilizando o Excel (RMSE = 0.3179)

Como é possível confirmar pela figura ilustrada, a representação espectral tem ainda algumas imperfeições que necessitam aperfeiçoamento. Com esse objetivo em mente, em primeiro lugar recorreu-se à rotina de minimização *Solver* e os resultados desta minimização mostraram-se completamente fora do esperado, revelando resultados exatamente iguais aos obtidos utilizando apenas o LED de iluminação do iPhone. Por esta razão, decidiu-se omitir a representação espectral deste passo achando que a mesma não traria nenhum valor acrescentado a esta dissertação.

De seguida, e tendo em conta todo o desenvolvimento anterior, utilizou-se a segunda ferramenta para minimizar o valor do erro. Assim como na secção anterior deste relatório, foram testadas as 7 hipóteses apresentadas, embora apenas sejam apresentadas as duas onde se atingem os melhores resultados, Figuras 30 e 31, quando são tidos em conta os valores de RMSE e a semelhança espectral.

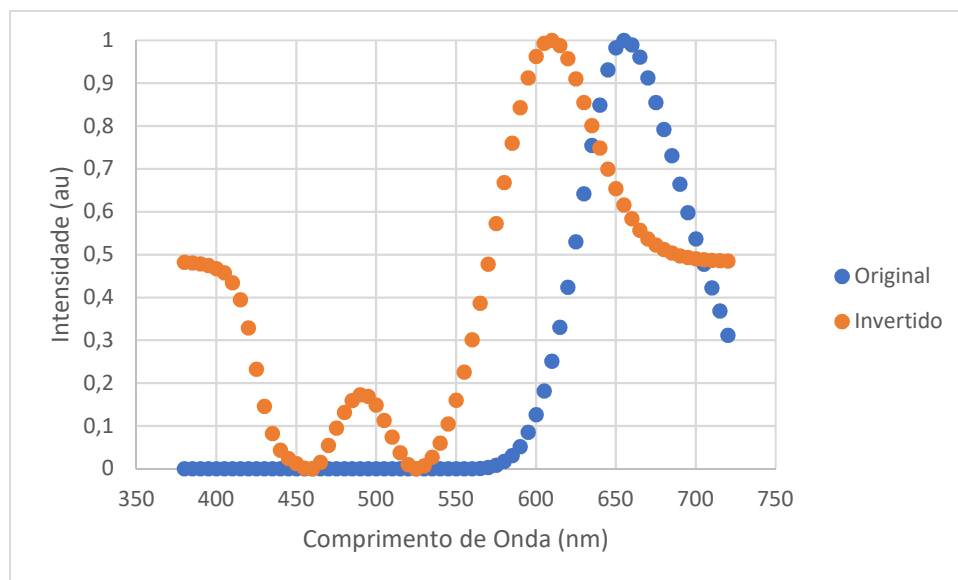


Figura 30: Espectro original e invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.3636)

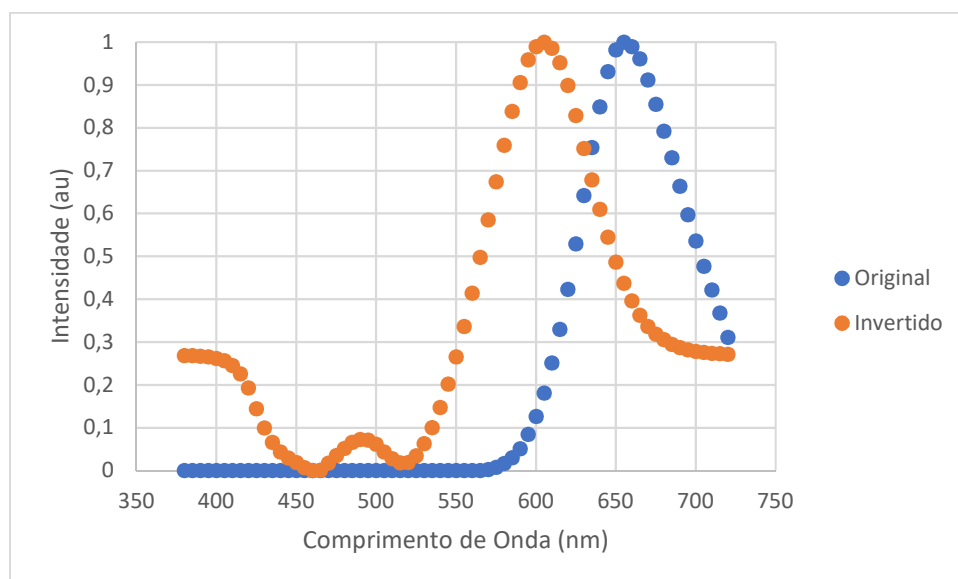


Figura 31: Espectro original e invertido (Minimização com Z, RMSE = 0.3838)

Depois de ensaiadas as 7 possibilidades, concluiu-se que as soluções obtidas a partir das experiências 1, 3, 4 e 7 apresentavam todas um erro quadrático médio idêntico, embora o menor valor atingido se tenha verificado na hipótese 1 (0.3636). Em relação aos testes 2, 5 e 6, também estes exibem valores

de RMSE similares, embora algo superiores aos restantes. Uma vez mais, e como é perfeitamente atingível pela comparação das duas anteriores figuras, o menor valor do erro quadrático médio não correspondeu à melhor ilustração gráfica, o que seria de esperar.

Seguindo o raciocínio tomado anteriormente neste relatório, utilizou-se a simulação dos valores de XYZ sem que esta normalizasse os valores do método da inversão espectral. Na Figura 32, está representada a solução que apresenta os resultados mais positivos em relação aos valores do erro quadrático médio e das parecenças entre o espectro original e invertido.

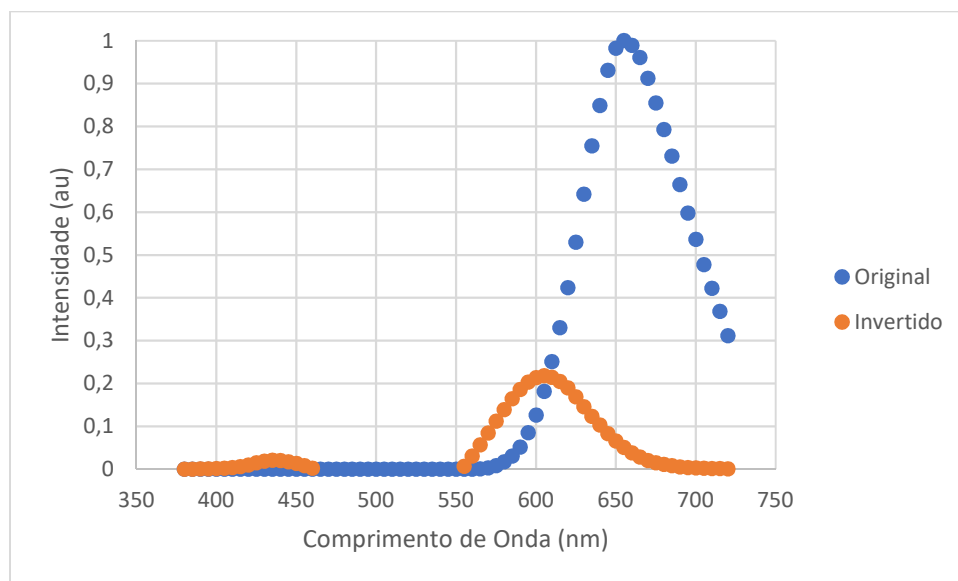


Figura 32: Espectro original e invertido (Minimização com XYZ, RMSE = 0.3749)

Neste caso apenas é ilustrada uma solução uma vez que, a hipótese que apresenta menor erro quadrático médio é também a solução com uma melhor representação gráfica. No entanto, como é possível conferir pela figura, nesta experiência a diferença entre os dois espectros é demasiado acentuada para o valor de 0.3749 correspondente ao erro. Sem a normalização dos dados finais, estes estão à mercê do seu valor real, e assim apresentam uma discrepância demasiado elevada e que não irá servir como termo de comparação.

Por último, fizeram-se as duas experiências finais, uma com conjuntos assimétricos e outra com conjuntos simétricos. Nestes dois casos, os valores das constantes alfa e beta mantiveram-se iguais aos utilizados anteriormente. Dentro de cada um destes conjuntos foram implementadas as mesmas 7 hipóteses das outras experiências, fazendo com que esta última simulação seja a mais extensa com 14 testes no total. Na Figura 33 está representada a solução com menor valor do erro quadrático médio e melhor representação espectral, uma vez que ambas são coincidentes.

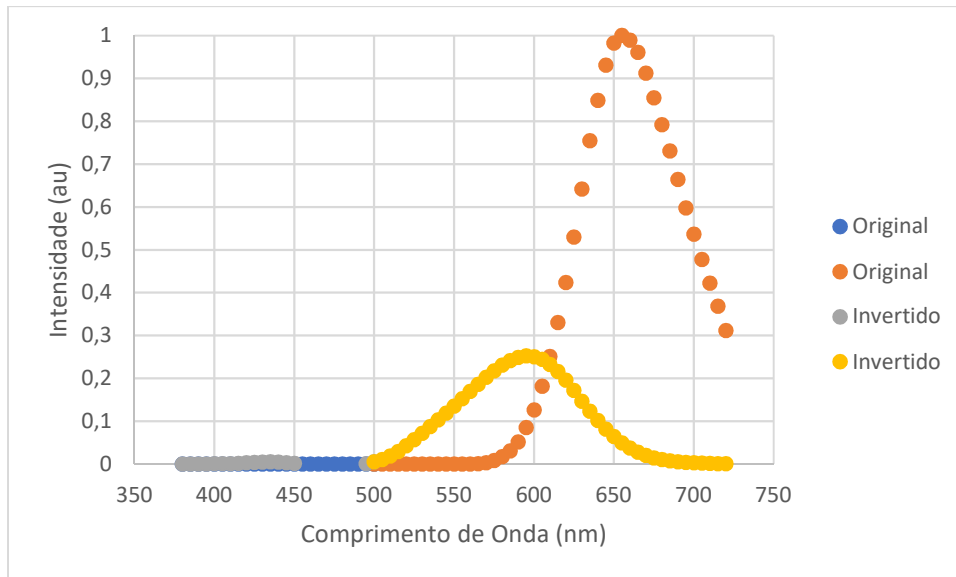


Figura 33: Espectro original e invertido para conjuntos assimétricos (Minimização com XYZ, RMSE = 0.1466)

Bem como na experiência dos dados não normalizados, a ilustração dos espectros original e invertido está desfasada do valor do erro. Nesta minimização, alterando os três valores das coordenadas XYZ, é atingido o menor valor de RMSE até aqui registrado, 0.1466, contudo, uma vez mais os espectros são muito distintos não servindo esta experiência como bom termo de avaliação da amostra de vinho. Avançou-se para a solução com os conjuntos simétricos na esperança de que, dividindo irremediavelmente a totalidade do espectro, se obtivessem melhores conclusões. A Figura 34 apresenta os resultados desta implementação, onde a solução que apresenta menor valor do erro e melhor representação gráfica é novamente a mesma.

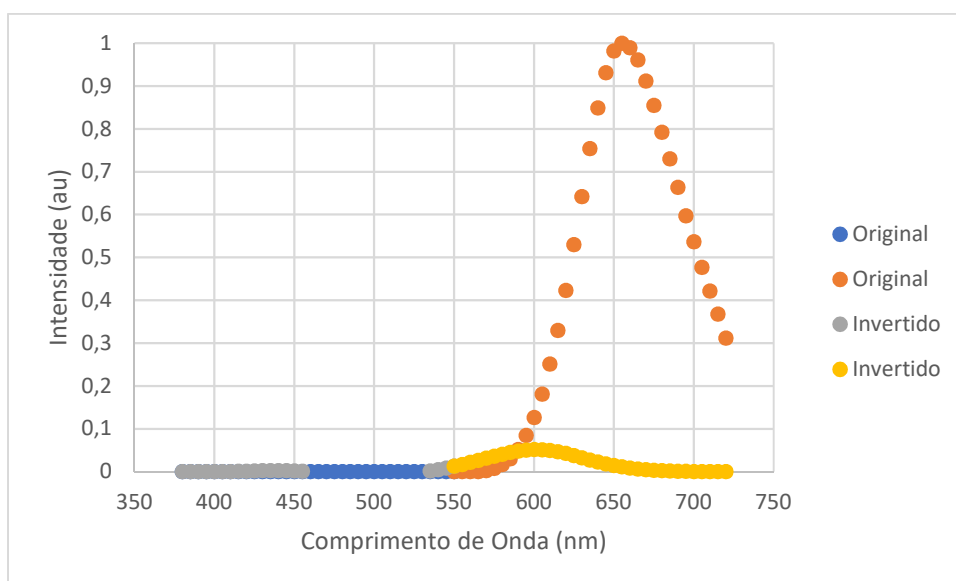


Figura 34: Espectro original e invertido para conjuntos simétricos (Minimização com XYZ, RMSE = 0.1723)

Pela avaliação da imagem, facilmente se percebe que a representação do espectro invertido cada vez mais, apresenta resultados inconcebíveis e que em nada contribuem para a avaliação da amostra de vinho em estudo. Embora os menores valores do erro quadrático médio sejam alcançados quando existe uma divisão espectral, os seus gráficos correspondentes são claramente antagónicos a estes resultados. Obviamente que para estes dois casos foram testados vários valores para as constantes alfa e beta, sendo os previamente documentados os mais fidedignos.

# 5.

## Conclusões

Após os dois semestres dedicados a este projeto, podem-se tirar algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

Primeiramente, é possível concluir que o método de inversão espectral utilizado é um processo relativamente simples. Este recorre à manipulação da matriz CMF CIE 1931 e aplicando algumas fórmulas bastantes simples e intuitivas, é possível atingir a solução final.

Depois de estarem consolidados todos os cálculos referentes ao método, implementou-se o mesmo para estudar o LED de iluminação de um iPhone. O método foi implementado com uma ligeira alteração, apenas se recorreu aos valores das três coordenadas de cor para calcular o espectro invertido (a constante de proporcionalidade não foi calculada por se tratar de um passo que traria redundância à experiência). Os resultados obtidos não foram os desejados uma vez que apresentavam demasiadas incoerências devido à complexidade do espectro da luz branca. Com o objetivo de estudar as discrepâncias registadas, calculou-se o erro quadrático médio e ao longo de todo o projeto o valor do mesmo, para as diferentes experiências, foi sempre utilizado como termo de avaliação e comparação.

Uma vez que os resultados não iam ao encontro do pretendido, mesmo após se diminuir o passo espectral para suprimir a perda de informação, decidiu-se que era necessário melhorar o método da inversão espectral através da minimização do erro quadrático médio utilizando apenas os valores que representam uma cor, XYZ, como parâmetros a alterar. O primeiro passo dado na otimização deste processo fez-se recorrendo à ferramenta *Solver* do Excel, por se tratar de um programa simples e de fácil utilização. Cedo se percebeu que esta ferramenta fazia poucas iterações e que pouco, ou nada, melhorava a representação espectral, mesmo existindo uma ligeira melhoria quando as amostras utilizadas eram alteradas, diminuindo assim a quantidade de informação contida em cada amostra estudada. Foi então necessário recorrer ao MatLab, mais especificamente à função *fminsearch*, para tentar mitigar o valor do erro e assim melhorar a representação do espectro invertido em relação ao original.

Depois de executadas as três experiências, normalização dos valores finais do método de inversão espectral, utilização não normalizada dos mesmos valores e divisão do espectro em dois conjuntos, chegou-se à conclusão que o método continuava a apresentar falhas. Em cada um destes testes realizaram-se as sete combinações possíveis para os valores de XYZ a alterar, obtendo assim vinte e oito soluções distintas para analisar. No caso do LED de iluminação do iPhone existem algumas diferenças, nomeadamente em relação à posição dos máximos em termos de comprimento de onda, uma vez que a luz branca é a que tem mais informação e recorre à utilização total do espectro eletromagnético na região do visível. Nos casos em que se recorreu ao uso de cores pontuais, os espectros apenas têm um pico de absorção e contêm muito menos informação, portanto, a sua representação espectral foi mais fiável, mas não ideal. Estas imperfeições devem-se a erros na aquisição do espectro original das cores em laboratório, recipiente que contem a amostra mal vedado, fibra ótica descentrada, excesso de luz solar na sala, etc., onde a maior parte delas ocorre por falha humana. Estas anomalias advêm também da perda de informação durante todo o processo de cálculo do método de inversão espectral e da mitigação do erro.



A experiência final feita a uma amostra de vinho veio corroborar todos os resultados concluídos até então e confirmou o que era esperado, o vinho tinto apresentou um comportamento idêntico ao da cor vermelha. O menor valor de RMSE alcançado com esta amostra foi de 0.1466 e foi obtido através da utilização dos três parâmetros para minimizar o erro, na experiência onde o espectro foi dividido em dois conjuntos assimétricos, um com 25 amostras e outro com 45 amostras. Quanto à representação gráfica, e embora fosse de esperar que também para esta solução se apresentasse o melhor resultado do método de inversão espectral, tal não se veio a confirmar. A maior semelhança entre o espectro original e o invertido foi conseguida utilizando apenas o parâmetro Z para mitigar o erro quadrático médio, sendo esta protagonizada aquando da utilização dos valores normalizados resultantes do método de inversão espectral.

É possível concluir que ao não serem utilizados os valores normalizados, as experiências sofrem um enorme revés. Isto porque, mesmo atingindo os menores valores para o erro quadrático médio, a não normalização dos resultados provoca grandes alterações que levam à inviabilização do seu uso como ferramenta de avaliação. Com a utilização dos valores normalizados, sem utilizar divisões espectrais, conseguem-se alcançar as melhores representações espectrais. É então possível concluir que, em nenhuma das experiências protagonizadas, a melhor representação espectral correspondeu ao menor valor de RMSE.

# Referências

- [1] W. Chmielarz, "Study of Smartphones Usage from the Customer's Point of View," *Procedia Computer Science* 65, p. 1085 – 1094, 2015.
- [2] M. Fairchild e R. Berns, *Image Color-Appearance Specification Through Extension of CIELAB*, John Wiley & Sons, Ltd., 1993.
- [3] SIBS, "Comércio Digital," em *SIBS Market Report*, 2016, pp. 19-20.
- [4] G. Marktest, "Barómetro Telecomunicações," 30 Janeiro 2018. [Online]. Available: <http://www.marktest.com/wap/a/n/id~2350.aspx>. [Acedido em 28 Novembro 2018].
- [5] J. Andrade, "O uso de Câmaras Digitais e a Imaginação Cinematográfica Um Novo Cinema na Era das Câmaras Fotográficas Digitais DSLR e dos Smartphones," 2014.
- [6] NASA, "NODE+ Platform Integrates Sensors with Smartphones," *Consumer Goods, SPINOFF 2016*, 2016.
- [7] S. Go, "Strategic analysis of Samsung's smartphone product portfolio: Countering the challenge from Chinese competitors," MIT, 2015, pp. 19-22.
- [8] B. News, "World's first 'smartphone' celebrates 20 years," 15 Agosto 2014. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/technology-28802053>. [Acedido em 25 Novembro 2018].
- [9] A. Karlson, S. Iqbal, B. Meyers, G. Ramos, K. Lee e T. J., "Mobile Taskflow in Context: A Screenshot Study of Smartphone Usage," *CHI 2010: On the Phone*, 10-15 Abril 2010.
- [10] Q. Xu, J. Erman, A. Gerber, Z. Mao, J. Pang e S. Venkataraman, "Identifying Diverse Usage Behaviors of Smartphone Apps," *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, pp. 329-344, 2-4 Novembro 2011.
- [11] SHARP, "Industry's First Camera-Equipped Mobile Phone <J-SH04>," 2 Setembro 2014.
- [12] N. Lane, E. Miluzzo, D. Peeble, D. Lu, T. Choudhury e A. Campbell, "A Survey of Mobile Phone Sensing," em *Ad Hoc and Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, 2010, pp. 140-150.
- [13] Pplware, "Cat S60: O primeiro smartphone com câmara térmica," Sapo, 25 Julho 2016. [Online]. Available: <https://pplware.sapo.pt/smartphones-tablets/cat-s60-o-primeiro-smartphone-com-cmara-trmica/>. [Acedido em 30 Novembro 2018].
- [14] J. Walker, "Smartphones with Sensor Technology Enhances our Daily Operations," Vensi, Inc., 15 Junho 2017. [Online]. Available: <http://www.vensi.com/smartphones-with-sensor-technology-enhances-our-daily-operations/>. [Acedido em 1 Dezembro 2018].
- [15] E. Stankevich, I. Paramonov e I. Timofeev, "Mobile Phone Sensors in Health Application," em *Proceeding of the 12th conference of fruct association*, P. G. Demidv Yaroslavl State University, IEEE Communications Society, 2012, pp. 136-141.

- [16] W. Khan, Y. Xiang, M. Aalsalem e Q. Arshad, "Mobile Phone Sensing Systems: A Survey," em *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, VOL. 15, NO. 1, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, pp. 402-427.
- [17] F. Leu, C. Ko, I. You, K. Choo e C. Ho, "A smartphone-based wearable sensores for monitoring real-time physiological data," em *Computers & Electrical Engineering*, VOL. 65, Elsevier, 2018, pp. 376-392.
- [18] B. Chen, "The Smartphone's Future: It's All About the Camera," *Tech Fix, NY Times*, 30 Agosto 2017.
- [19] L. Pei, R. Guinness, R. Chen, J. Liu, H. Kuusniemi, Y. Chen, L. Chen e J. Kaistinen, "Human Behavior Cognition Using Smartphone Sensors," em *Sensors*, Basileia, MDPI, 2013, pp. 1402-1424.
- [20] S. Kothari e H. Channe, "Detection of Nutrients and chemicals in food products using sensores in smart phones," *International Journal of Engineering And Computer Science*, pp. 11651-11652, 2015.
- [21] J. Simpson, *Wine: a short history*, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [22] M. Cruz e C. Brito, *Vinhos e Aguardentes de Portugal*, IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2003/2004.
- [23] V. Caballero, M. Sánchez, M. López e D. Marín, "First steps towards the development of non-destructive technique for the quality control of wine grapes during on-vine ripening and on-arrival at the winery," em *Journal of Food Engineering*, VOL. 101, Issue 2, Elsevier, 2010, pp. 158-165.
- [24] I. Noiseux, W. Long, A. Cournoyer e M. Vernon, "Simple Fiber-Optic-Based Sensors for Process Monitoring: An Application in Wine Quality Control Monitoring," *Applied Spectroscopy*, 1 Agosto 2004.
- [25] Inovwine, "Iwsense," [Online]. Available: <http://www.inovwine.com/>. [Acedido em 1 Dezembro 2018].
- [26] R. G., P. Dario e F. Cavallo, "Smartphone-Based Food Diagnostic Technologies: A Review," *Sensors*, 20 Junho 2017.
- [27] J. Ballester, H. bdi e J. Langlois, "The Odor of Colors: Can Wine Experts and Novices Distinguish the Odors of White, Red, and Rosé Wines?," *Chemosensory Perception*, 20 Outubro 2009.
- [28] J. Bakker, P. Bridle e C. Timberlake, "Tristimulus measurements (CIELAB 76) of port wine colour," *Journal of Grapevine Research*, vol. 25, nº 2, pp. 67-78, 1986.
- [29] CIE, Central Bureau of CIE - Commission International de Eclairage, "Colorimetry," Vienna, 1986.
- [30] C. Oliveira e M. Clemente, "Port wine spectronephelometry," em *Optics & Laser Technology*, Porto, Elsevier, 2003, pp. 491-496.

- [31] IPQ, “NP 4375-2000-1, 2 e 3, Cor de Vinhos - Determinação Espectrocolorimétrica,” Caparica, 2000.
- [32] L. Almela, S. Javaloy, J. Fernández-López e J. López-Roca, “Comparison between the tristimulus measurements  $Y_{xy}$  and  $L^* a^* b^*$  to evaluate the colour -of young red wines,” *Food Chemistry*, vol. 53, nº 3, pp. 321-327, 1995.
- [33] N. Ohta e A. Robertson, *Colorimetry: Fundamentals and Application*, John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [34] C. Matarasu, “Mobile Phone Camera Possibilities for Spectral Imaging,” University of Eastern Finland, 2014.
- [35] “Estrutura do Olho Humano,” NEOVISÃO, Oftalmologia, [Online]. Available: <http://www.neovisao.com/saude-ocular/o-olho-humano/>. [Acedido em 15 Dezembro 2018].
- [36] D. Huizi, “Charge Coupled Devices - Digital Cameras”.
- [37] E. Boster e T. Behm, “CCD Camera Operation and Theory: A Basic Introduction,” Maio 2010.
- [38] C. Peterson, *How It Works: The Charged-Coupled Device, or CCD*, Georgetown University: The Journal of Young Investigators, Inc, 2000.
- [39] Toshiba, “Application Notes and Technical Articles,” em *CCD Linear Image Sensor*, pp. 15-73.
- [40] I. Ashdown, “Photometry and Radiometry,” *A Tour Guide for Computer Graphics Enthusiasts*, 2002.
- [41] C. Duda, “Radiometric and Photometric Concepts Based on Measurement Techniques,” em *Application Note No. 6*, Culver City, United Detector Technology, 1982.
- [42] G. Arnaoutakis, “Chromaticity Coordinates of Microcrystallines Phosphors,” em *Technical Note*, Edinburgh, Edinburgh Instruments, 2016.
- [43] “Color: from XYZ to spectrum,” 8 Março 2010. [Online]. Available: <https://rip94550.wordpress.com/2010/03/08/color-from-xyz-to-spectrum/>. [Acedido em 25 Setembro 2018].
- [44] S. Jachner, K. Boogaart e T. Petzoldt, “Statistical Methods for the Qualitative Assessment of Dynamic Models with Time Delay (R Package qualV),” *Journal of Statistical Software*, vol. 22, nº 8, 2007.
- [45] Microsoft, “Define and solve a problem by using Solver,” [Online]. Available: <https://support.office.com/en-us/article/define-and-solve-a-problem-by-using-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. [Acedido em 15 Outubro 2018].
- [46] MathWorks, “fminsearch,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>. [Acedido em 25 Outubro 2018].

[47] D. Pascale, A Review of RGB Color Spaces...from xyY to R'G'B', Quebec: The BabelColor Company, 2002-2003.

[48] S. Chaudhuri, Light and Color, Stanford University, 2010.

# Anexos

# Anexo A

Tabela 1: Matriz CMF CIE 1931

$\lambda$ (nm)	x	y	z
380	0,0014	0	0,0065
385	0,0022	0,0001	0,0105
390	0,0042	0,0001	0,0201
395	0,0077	0,0002	0,0362
400	0,0143	0,0004	0,0679
405	0,0232	0,0006	0,1102
410	0,0435	0,0012	0,2074
415	0,0776	0,0022	0,3713
420	0,1344	0,004	0,6456
425	0,2148	0,0073	1,0391
430	0,2839	0,0116	1,3856
435	0,3285	0,0168	1,623
440	0,3483	0,023	1,7471
445	0,3481	0,0298	1,7826
450	0,3362	0,038	1,7721
455	0,3187	0,048	1,7441
460	0,2908	0,06	1,6692
465	0,2511	0,0739	1,5281
470	0,1954	0,091	1,2876
475	0,1421	0,1126	1,0419
480	0,0956	0,139	0,813
485	0,058	0,1693	0,6162
490	0,032	0,208	0,4652
495	0,0147	0,2586	0,3533
500	0,0049	0,323	0,272
505	0,0024	0,4073	0,2123
510	0,0093	0,503	0,1582
515	0,0291	0,6082	0,1117
520	0,0633	0,71	0,0782
525	0,1096	0,7932	0,0573
530	0,1655	0,862	0,0422
535	0,2257	0,9149	0,0298
540	0,2904	0,954	0,0203
545	0,3597	0,9803	0,0134
550	0,4334	0,995	0,0087
555	0,5121	1	0,0057
560	0,5945	0,995	0,0039
565	0,6784	0,9786	0,0027
570	0,7621	0,952	0,0021
575	0,8425	0,9154	0,0018
580	0,9163	0,87	0,0017
585	0,9786	0,8163	0,0014
590	1,0263	0,757	0,0011
595	1,0567	0,6949	0,001
600	1,0622	0,631	0,0008
605	1,0456	0,5668	0,0006
610	1,0026	0,503	0,0003



615	0,9384	0,4412	0,0002
620	0,8544	0,381	0,0002
625	0,7514	0,321	0,0001
630	0,6424	0,265	0
635	0,5419	0,217	0
640	0,4479	0,175	0
645	0,3608	0,1382	0
650	0,2835	0,107	0
655	0,2187	0,0816	0
660	0,1649	0,061	0
665	0,1212	0,0446	0
670	0,0874	0,032	0
675	0,0636	0,0232	0
680	0,0468	0,017	0
685	0,0329	0,0119	0
690	0,0227	0,0082	0
695	0,0158	0,0057	0
700	0,0114	0,0041	0
705	0,0081	0,0029	0
710	0,0058	0,0021	0
715	0,0041	0,0015	0
720	0,0029	0,001	0

## Anexo B

Tabela 2: Matriz E

$\lambda$ (nm)	x	y	z
380	8,96822E-05	-9,01209E-05	0,000220586
385	0,00012078	-0,000121747	0,000359284
390	0,00024101	-0,000246064	0,000686772
395	0,000456002	-0,000457633	0,001233744
400	0,000826302	-0,000835905	0,002318057
405	0,001345908	-0,001363338	0,00376167
410	0,002494394	-0,002533457	0,007084678
415	0,004409005	-0,004491496	0,012691082
420	0,007548257	-0,007713475	0,022082391
425	0,011762966	-0,012081302	0,035592089
430	0,014986888	-0,015486286	0,047550407
435	0,016407865	-0,017106031	0,05584409
440	0,016064154	-0,016944926	0,060316839
445	0,014254554	-0,015341331	0,061814298
450	0,011304924	-0,012645508	0,061815394
455	0,007549629	-0,009184229	0,06129391
460	0,002833789	-0,004717035	0,05921648
465	-0,002598041	0,000650031	0,054857529
470	-0,008839768	0,007200335	0,047034625
475	-0,015101572	0,014078998	0,039010299
480	-0,021179969	0,021072458	0,03154387
485	-0,026962931	0,027981103	0,025171888
490	-0,032890721	0,035360607	0,020428966
495	-0,039773102	0,044047558	0,017173603
500	-0,047860021	0,054379023	0,015128276
505	-0,05775335	0,067220791	0,014029858
510	-0,067569174	0,080728004	0,013076425
515	-0,076479055	0,09417354	0,012232051
520	-0,082673516	0,105394644	0,011489811
525	-0,08458525	0,112275551	0,010677566
530	-0,083040122	0,11571045	0,009649703
535	-0,078722773	0,116105798	0,008396152
540	-0,071874638	0,113771227	0,006949345
545	-0,062599906	0,108847994	0,005309057
550	-0,051080388	0,101546575	0,003481476
555	-0,03744176	0,092083137	0,001458638
560	-0,021867302	0,080571808	-0,000750728
565	-0,00455756	0,0670678	-0,003134731
570	0,014024736	0,051981889	-0,0056338
575	0,033301339	0,035743851	-0,008179114

580	0,052523088	0,018970697	-0,010674879
585	0,070750256	0,002371933	-0,013006804
590	0,087067602	-0,013219467	-0,015051181
595	0,100619146	-0,027006592	-0,01669293
600	0,109910175	-0,037848899	-0,017739019
605	0,115249158	-0,045870663	-0,018234658
610	0,115771235	-0,050404327	-0,018065997
615	0,112200287	-0,051866967	-0,017329206
620	0,104843557	-0,050505065	-0,016068991
625	0,094032222	-0,046647109	-0,014333023
630	0,081618254	-0,04137664	-0,012390114
635	0,069698549	-0,035940176	-0,01054391
640	0,058173996	-0,030396494	-0,008776321
645	0,047220653	-0,024924274	-0,007108658
650	0,037310311	-0,019836488	-0,005608071
655	0,028904602	-0,01545184	-0,004339509
660	0,021862421	-0,011734128	-0,00327941
665	0,016099106	-0,008661628	-0,002413639
670	0,011630451	-0,006271769	-0,001742812
675	0,008474515	-0,004577531	-0,001269437
680	0,006245269	-0,003379733	-0,000935124
685	0,00439697	-0,002383982	-0,0006581
690	0,003035157	-0,001646561	-0,000454219
695	0,002113548	-0,001147251	-0,000316258
700	0,001526608	-0,000829769	-0,000228364
705	0,001086402	-0,000591658	-0,000162444
710	0,000774874	-0,000419939	-0,000115988
715	0,000545742	-0,000294395	-8,17727E-05
720	0,000393926	-0,000217893	-5,86982E-05

## Anexo C

```
function [rmse]=rmse(par)
global h
%Gama de Comprimentos de onda
load('lambda.dat')
Lambda=lambda(1:end,2);

%Intensidades correspondentes ao comprimentos de onda
load('norm_I.dat')
norm_i=norm_I(1:end,2);

%Matriz CIE 1931 XYZ
load('matrix_a.dat')
A=matrix_a(1:end,2);
TN=transpose(norm_i);

%fe = TN*A;

coef=par;
x=coef(1);%+fe;
y=coef(2);%+fe;
z=coef(3);%+fe;

XYZ = [x y z]';
size(XYZ);

%(1/(A'+A))+A')'
E = transpose(inv(transpose(matrix_a)+matrix_a)+transpose(matrix_a));
size(E);

%Valor Fundamental
F = E*XYZ;

m = min(F);
M = max(F);

Final = (F-m)/(M-m);
rmse = sqrt(mean((Final-(norm_i)).^2));

rmse

plot(Lambda,norm_i);
hold on;
plot(Lambda,Final);
hold off;
set(h);
drawnow update
```

Figura 35: Cálculo do RMSE

## Anexo D

```
clear all
close all

global h
load('lambda.dat');

load('norm_I.dat');
load('matrix_a.dat')
Lambda=lambda(1:end,2);
norm_i=norm_I(1:end,2);
A=matrix_a(1:end,2);
E = transpose(inv(transpose(matrix_a)+matrix_a)+transpose(matrix_a));

figure(1)
plot(Lambda,norm_i);
hold on;
pause;

option=optimset('MaxFunEvals',10000, 'Display','iter','TolFun',1e-10,'TolX',1e-10,'MaxIter',1000);

coef=[0.3250 0.3560 0.3090];
[par]=fminsearch('xmse',coef,option);
coef=par;
x=coef(1);
y=coef(2);
z=coef(3);

XYZ = [x y z]';
F = E*XYZ;
m = min(F);
M = max(F);
Final = (F-m)/(M-m);

h=plot(Lambda,Final);

figure(1)
plot(Lambda,norm_i,Lambda,Final);
%plot(Lambda,Final);
```

Figura 36: Minimização do erro