

LiDAR – Tudo na luz é informação

Nazar Romanyshyn¹, Moisés Duarte², Nelssom Cunha¹, Mário Rui Pereira^{1,3}, Mikhail Vasilevskiy^{1,3,4}

¹ Centro de Física – CF-UM-UP, Universidade do Minho, Braga & Guimarães

² Bosch Car Multimedia, Bosch - Portugal, Braga

³ Departamento de Física, Universidade do Minho, Braga

⁴ International Iberian Nano Laboratory, Braga

Resumo

O que têm em comum o caminho da lua no mar e a condução autónoma de veículos? A reflexão difusa da luz em superfícies rugosas e materiais heterogêneos é responsável pela visibilidade de objetos que não conseguiríamos ver de acordo com a lei de Snell. O mesmo fenómeno ótico também está na base do funcionamento de sensores remotos chamados LIDARs (abreviação de *Light Detection And Ranging*) que surgiram nos anos 60 do século XX nos Estados Unidos e na União Soviética com a finalidade de medir a distância a objetos, estudar superfícies inacessíveis (como a da Lua) e analisar a atmosfera. As aplicações atuais também incluem a geodesia, topografia e arqueologia, como um dos instrumentos de mapeamento, e a mobilidade, em sistemas de condução autónoma de veículos. Embora os LIDARs forneçam, mais diretamente, a distância e a velocidade relativa dum objeto, a distribuição angular e a polarização da luz espalhada pela sua superfície podem ser utilizadas para adquirir informações adicionais, tais como a escala da rugosidade típica da superfície e o tipo de material do objeto (metal ou isolador). Neste artigo, discutem-se os princípios de modelação da reflexão difusa e de medição experimental e análise da polarização da luz difundida.

1. Reflexão difusa por objetos do mundo real

1.1. Introdução

A maioria de objetos apenas reflete a radiação que incide sobre eles, sem atuar como fonte de luz. Todos os corpos não luminosos, quando iluminados por uma fonte da luz, tornam-se visíveis apenas porque espalham luz. Por exemplo, 85 % da luz branca é refletida numa superfície plana coberta da neve, 75 % do papel branco, 0,5 % do veludo preto. O fenómeno no qual a luz é refletida num ângulo diferente do ângulo de incidência é conhecido como reflexão difusa.

A reflexão difusa da luz acontece em qualquer superfície rugosa. Um exemplo natural e bonito deste fenómeno é o caminho da lua devido

a ondulação do mar (Figura 1a). Se a superfície da água fosse lisa, iríamos ver apenas uma imagem da lua (um círculo iluminado), refletida num espelho. A reflexão difusa também pode ser causada por uma variação espacial do índice de refração do material. Por exemplo, a mármore, um material compósito, tem um aspeto mate mesmo quando é bem polido. O leite é branco e mate devido às partículas suspensas na água, distribuídas aleatoriamente mesmo quando a sua superfície é perfeitamente plana.

A maioria dos objetos à nossa volta são visíveis devido à luz difusa (Figura 1). Se a sua superfície fosse óticamente lisa, só os conseguiríamos ver segundo num certo ângulo, determinado pela lei de reflexão

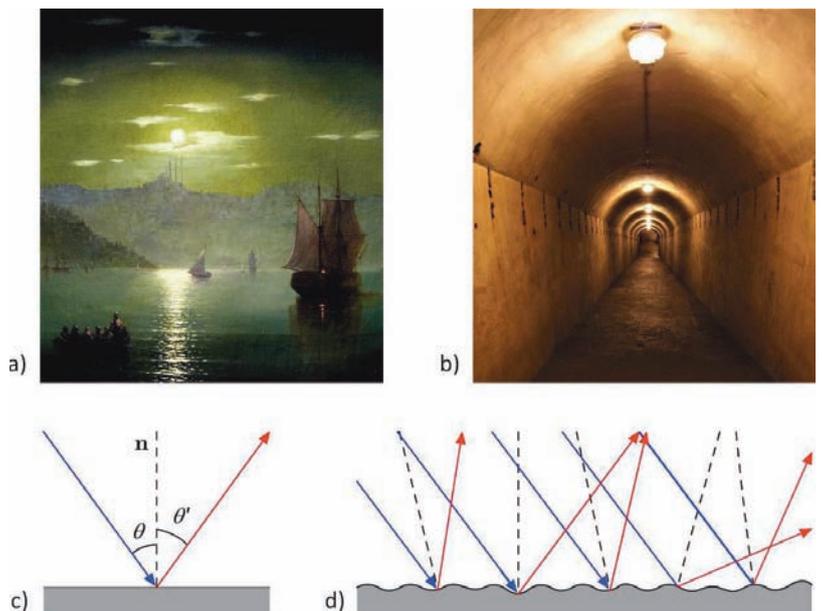


Figura 1 - a) Reflexão difusa do luar na superfície da água e nas nuvens em “Caminho da lua” (1886), pintura de I. K. Aivazóvski. b) Fotografia a mostrar reflexão difusa da luz nas paredes e no teto de um corredor. c) Esquema de reflexão da luz. O ângulo θ que o feixe incidente (a azul) forma com a normal ao plano (n) é igual ao ângulo de reflexão θ' que o feixe refletido (a vermelho) forma com a normal. d) Esquema de reflexão difusa. Ampliando a imagem é possível ver que a superfície é rugosa e muitos feixes são refletidos em diversas direções uma vez que a normal varia localmente.

no espelho (a lei de Snell). Um condutor, a conduzir o seu carro à noite, consegue ver a berma da estrada porque uma parte da luz dos faróis é retrorefletida pelo mecanismo de reflexão difusa. A reflexão torna-se difusa se as irregularidades da superfície são distribuídas aleatoriamente no espaço e a sua escala típica é da ordem do comprimento de onda da radiação incidente (ou o excedem). Outro exemplo de difusão da luz, muito frequente na natureza é o espalhamento de Rayleigh que resulta da interação da luz com pequenas partículas. Embora na derivação original de Lord Rayleigh (1881) fossem consideradas partículas esféricas de tamanho $\alpha < \lambda$ (onde λ é o comprimento de onda da luz), a distribuição angular da intensidade da luz espalhada,

$$\frac{dI(\theta)}{d\theta} = I_0(1 + \cos^2 \theta) \sin \theta$$

(onde θ é o ângulo de difusão e $I_0 = \text{const}$), é a mesma no caso de espalhamento por flutuações de densidade num gás ou num líquido e o termo “difusão de Rayleigh”, no sentido alargado, designa a difusão elástica da luz (sem alteração de λ) [1]. Neste sentido, a teoria mais abrangente de espalhamento por partículas esféricas cujo tamanho não é necessariamente inferior a λ , desenvolvida por G. Mie, da qual a fórmula acima é um caso limite, também descreve a difusão de Rayleigh. O céu azul, a cor vermelha do pôr do sol e a diminuição aparente do sol no inverno são os efeitos da difusão de Rayleigh da luz na atmosfera [2]. No contexto deste artigo, notemos que a difusão por partículas dispersas num material composto, com uma matriz não absorvente, origina uma distribuição angular larga da luz espalhada mesmo quando a sua superfície for bem polida.

1.2. Análise e modelação da reflexão difusa

O problema da difusão de ondas eletromagnéticas por uma superfície real, rugosa é extremamente complexo. As ondas refletidas por diferentes partes da superfície (e também pelas superfícies internas, no caso dum material composto) podem interferir, pelo que o problema envolve a teoria de difração, a qual tem aspetos comuns independentemente da natureza física das ondas. O primeiro estudo matemático deste tipo de problema para uma superfície desigual provavelmente foi feito por Lord Rayleigh que considerou a difração de ondas sonoras numa superfície sinusoidal [3]. Usualmente a forma duma superfície real descreve-se por uma função aleatória das coordenadas do espaço (e possivelmente do tempo). A difração de ondas nestas superfícies deve ser considerada como um problema estatístico. Provavelmente a primeira abordagem deste tipo foi feita pelo físico soviético E. Feinberg, que analisou a propagação de ondas eletromagnéticas junto a uma superfície metálica, aleatoriamente irregular [4]. Ele notou que, apesar da aleatoriedade, existe uma componente coerente do campo, um facto conheci-

do para ondas de outra natureza, por exemplo, elétrões em cristais com desordem.

O trabalho acima referido foi baseado na teoria de perturbações, sendo que a altura típica das irregularidades da superfície foi considerada pequena. Logo a seguir surgiram publicações cujos autores recorreram ao método de “plano tangente”, também conhecido como a aproximação de Kirchhoff (cuja ideia encontra-se explicada em livros clássicos da Eletrodinâmica [2]). Nesta aproximação a escala “vertical” da rugosidade não é necessariamente pequena, mas as flutuações são consideradas suaves, ou seja, a escala “horizontal” é relativamente maior. Ambas as abordagens foram objeto de desenvolvimentos posteriores; uma discussão compreensiva pode ser encontrada no artigo de revisão [5].

Uma versão do método escalar de Kirchhoff é o modelo de (micro)facetas que foi desenvolvido, em particular, por P. Beckmann e A. Spizzochino [6]. Neste modelo considera-se que a superfície é constituída por fragmentos planos, inclinados relativamente ao plano médio da superfície segundo um ângulo aleatório. É assumido que cada uma dessas facetas é muito maior que λ e reflete de forma especular a luz incidente de acordo com as equações de Fresnel [2]. O conjunto de todas as reflexões especulares que ocorre em cada uma das *microfacetas* dá origem à reflexão difusa.

O desenvolvimento de novos materiais usados na indústria de bens de consumo e a crescente atenção ao seu aspeto visual resultou, nas últimas décadas, num interesse cada vez maior no uso de modelos de difusão da luz visível, sobretudo do modelo de microfacetas (MF), para simular a cor e a aparência (brilhante, mate ou “metálica”) destes materiais e produtos, mesmo com superfícies complexas, como o couro [7]. A versão mais popular do modelo MF nestes estudos de computação gráfica é o de Cock e Torrance [8], no qual se usa a ótica geométrica para a reflexão em cada faceta e o ingrediente principal é a função de distribuição do ângulo entre o vetor normal a uma microfaceta e a normal à superfície média. O desenvolvimento do modelo MF (por exemplo, introduzindo uma hierarquia de escalas das facetas) e a sua incorporação em *software* de simulação continua. Um exemplo disso é o programa multifuncional Geant4 que permite simular a interação de várias partículas, incluindo fótons, com a matéria [9], o qual discutiremos com mais detalhes em seguida.

Os métodos acima referidos não abrangem todas as situações que ocorrem em superfícies reais. Como sempre na ciência, ao lado das abordagens baseadas em “primeiros princípios” existem modelos fenomenológicos que funcionam à base de algumas ideias intuitivas ou factos empíricos e utilizam parâmetros (e, por vezes, funções) de ajuste que se determinam através de comparação com resultados experimentais. Um exemplo radical deste tipo de modelo é a denominada reflexão lambertiana, i.e., a reflexão difusa por uma superfície perfeitamente mate, descrita pela lei de Lambert. É aplicável à iluminação, por holofotes, de superfícies mate (como papel, giz) e amplamente usada em computação gráfica. Foi investigado por J.H. Lambert, que introduziu uma descrição desse fenómeno na sua obra *Photometria*, publicada em 1760. Superfícies lambertianas difundem a luz da mesma forma em todas as direções e, portanto, pare-

cem igualmente brilhantes, independentemente do ângulo de observação (α). Para qualquer ângulo de incidência, a intensidade da luz espalhada por uma superfície lambertiana é distribuída de acordo com a equação:

$$I = I_0 \cos \alpha$$

Obviamente, isto é uma idealização. O modelo MF, pelo menos nas suas versões mais utilizadas, não inclui reflexões múltiplas, as quais são particularmente importantes para a retrodifusão. No *software* Geant4 que utiliza o chamado modelo UNIFIED, estes efeitos também são incluídos numa forma fenomenológica. Em geral, a difusão da luz por uma superfície rugosa é composta por três componentes de reflexão principais (veja-se Figura 2): (i) o pico especular, (ii) o lóbulo especular e (iii) o lóbulo difuso. O Geant4 é um *software* gratuito, baseado em C++ e composto por várias bibliotecas que contêm ferramentas de simulação. Desenvolvido pelo CERN em 1998, inicialmente foi concebido para simulações de interações de partículas de alta energia com a matéria, com recurso ao método Monte Carlo (MC). Recentemente o consórcio internacional desenvolveu uma biblioteca chamada de “*Optical Physics*” [9], que permite a simulação de partículas de baixa energia, incluindo os fótons, e que também inclui o modelo de microfacetas. A biblioteca usa a lei de Fresnel para definir a interação com a matéria para cada um dos fótons. O material pode ser definido através do seu índice de refração complexo, $\bar{n} = (n + ik)$, ou usar valores experimentais de refletividade, transmitância e coeficiente de absorção do material considerado.

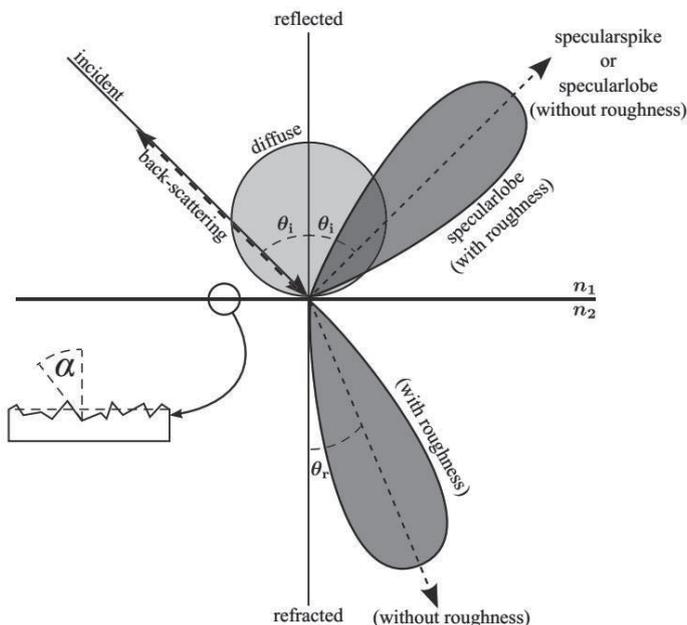


Figura 2 - Ilustração esquemática de uma superfície rugosa com o parâmetro de rugosidade (designado por σ_α) e as diferentes componentes que contribuem para a intensidade da luz espalhada: pico especular, lóbulo especular (devido à reflexão por microfacetas), lóbulo difuso (lambertiano), pico de retrodifusão, e lóbulo transmitido (refratado) para materiais transparentes [10].

O pico especular representa a reflexão semelhante a um espelho que é dominante no caso de superfícies lisas. O lóbulo especular é a parte descrita pelo modelo MF, que assume uma distribuição gaussiana dos ângulos de inclinação das microfacetas, com o desvio padrão desta distribuição como

um dos parâmetros de ajuste. O Geant4 utiliza o método MC no qual uma microfaceta é selecionada aleatoriamente a partir da distribuição gaussiana, para representar a superfície do alvo que irá interagir

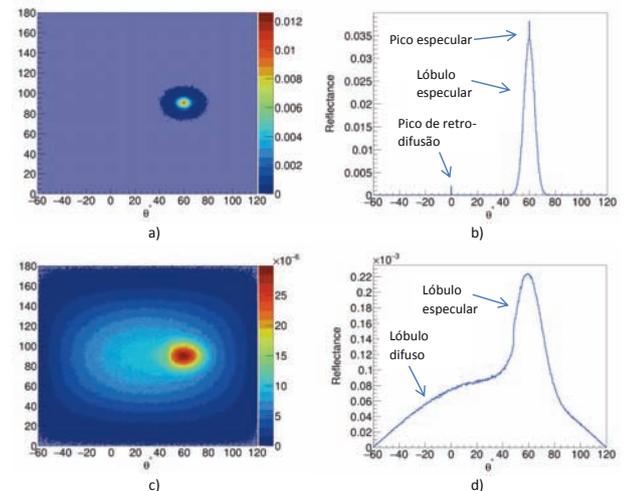


Figura 3 - Resultados de simulações de reflexão difusa da luz não polarizada para dois materiais diferentes com a superfícies rugosas (alumínio - a, b e TiO_2 - c, d). Os mapas de cor (a, c) representam o varrimento da intensidade da luz espalhada em ângulos esféricos, φ e θ , e os gráficos (b, d) representam uma secção destes mapas secção para $\varphi = 90^\circ \pm 10^\circ$. Os gráficos estão normalizados pelo número de eventos MC considerados na simulação.

com o fóton gerado. A parte lambertiana representa, fenomenologicamente, os mecanismos que resultam num espalhamento isotrópico. Os pesos relativos destes três lóbulos também são parâmetros de ajuste definidos pelo utilizador, aos quais é adicionado o quarto componente relativo ao pico de retrodifusão (também este fenomenológico).

Como exemplo, a Figura 3 mostra os resultados de simulação obtidos com Geant4 para dois materiais – um metal, alumínio polido, e um dielétrico, TiO_2 – com superfícies rugosas. Ambos os materiais simulados consistem em filmes de 15 μm de espessura que são iluminados com um feixe de radiação no infravermelho (comprimento de onda 1550 nm), com 1 mm de diâmetro e com um ângulo de incidência de 30° segundo a normal ao plano da superfície média (o que corresponde à reflexão especular a 60° em θ e 90° em φ). Foram gerados 1 milhão de fótons para o alumínio e 10 milhões para TiO_2 (porque este último material é transparente e tem uma refletividade de apenas 17 %). No caso do alumínio polido, a superfície rugosa foi simulada através de uma distribuição angular gaussiana das *microfacetas* com o desvio padrão $\sigma_\alpha = 2^\circ$. Na Figura 3b podemos observar o pico especular, o lóbulo especular e o pico da retrodifusão. No caso do TiO_2 foi considerada uma distribuição de *microfacetas* com $\sigma_\alpha = 5^\circ$. Como podemos ver na Figura 3d, isto resulta num lóbulo especular bastante mais largo do que no caso anterior; também foi incluído o efeito *lambertiano* que resulta no lóbulo difuso.

2. Sensores baseados na reflexão difusa da luz, os LIDAR

2.1. Contexto histórico, os LIDAR atmosféricos, aplicação na exploração da superfície da Terra e de outros planetas

Muitos dos instrumentos que nos permitem quer conhecer a superfície da Lua quer aterrar um avião em Lisboa são baseados no desenvolvimento de sensores que determinam distâncias através da deteção e análise da retrodifusão de radiação. Nesta categoria de sensores para a deteção remota, encontram-se diferentes tecnologias: o SONAR que utiliza a radiação sónica; o RADAR que processa a radiação rádio; e o LIDAR que manipula a radiação laser. As necessidades de caracterização de alvos com elevada resolução, exatidão e precisão encontram no sensor LIDAR (abreviação de *Light Detection And Ranging*), uma opção tecnológica viável e versátil. Este termo surgiu, provavelmente, pela primeira vez em 1953 numa monografia de Middleton e Spilhaus [11], bem antes da invenção do laser. Ainda antes disso, os estudos na atmosfera utilizando a luz retrorrefletida proveniente de holofotes foram publicados por E.H. Synge [12].

Com o aparecimento dos lasers, nos anos 60 do século XX, nos Estados Unidos e na União Soviética surgem os primeiros LIDAR baseados nas fontes da luz coerente, com a finalidade de medir distâncias, estudar superfícies inacessíveis e também monitorizar a atmosfera. Em particular, estes métodos foram implementados em 1961 no protótipo COLIDAR (*Coherent Light Detection And Ranging*) pelos engenheiros na *Hughes Aircraft Company* [13] com o objetivo de estudar a densidade da atmosfera. Usando a luz retrorrefletida, é possível computar o vetor de velocidade do vento tirando partido no desvio de fase da frequência emitida por LIDAR (efeito de Doppler) [14]. O desenvolvimento da tecnologia LIDAR para monitorização da atmosfera levou à criação de uma plataforma de LIDAR conhecida como EARLINET (European Aerosol Research LIDAR Network) [15].

Ao nível da investigação em Oceanografia, a tecnologia LIDAR é utilizada, entre outras, na deteção do plâncton nos oceanos, permitindo analisar a sua variação com as alterações climáticas [16].

A exploração do espaço, desde o seu início, tornou-se outra das áreas importantes de aplicação de LIDAR. Em 1962, L. Smullin e F. Fiocco usaram a tecnologia LIDAR para estudar os ecos na Lua. [17]. Em 1963, experiências dedicadas à exploração da superfície da Lua com um feixe laser começaram na União Soviética e, a partir de 1973, foram realizadas observações sistemáticas de cinco refletores especiais colocados na Lua naquela época (missões Lunokhod 1, Lunokhod 2, Apollo 11, Apollo 14 e Apollo 15). A superfície da Lua agora é conhecida com a exatidão de 1 metro [18].

Para além da utilidade em investigações científicas e aplicações civis (mas também militares), tais como a

geodesia, topografia e arqueologia, o LiDAR é cada vez mais empregue na construção de soluções comerciais no futuro da mobilidade. Desde a produção dos altímetros para a medição da distância do avião à pista quando este aterra, à implementação das funcionalidades de estacionamento e condução automática. Estas últimas serão discutidas de forma breve de seguida.

2.2. Os LIDAR no contexto de condução de veículos

Para falarmos de condução automatizada/autónoma, temos de referir os níveis que são definidos pela Sociedade de Engenheiros Automóveis (SAE): Nível 0 – é um ser humano a controlar sempre o veículo; Nível 1 – há sistemas de automatização que auxiliam o condutor na direção, aceleração, travagem, mas nunca duas ao mesmo tempo (por exemplo, o *Cruise Control* adaptativo); Nível 2 – O carro incorpora sistemas de automatização que podem auxiliar o condutor na direção, aceleração e travagem (por exemplo, o *Traffic Jam Assist*); Nível 3 – O automóvel é dotado da automação necessária para controlar o veículo em situações de trânsito intenso. Em casos pontuais pode solicitar a ação do condutor humano; Nível 4 – O automóvel incorpora automação necessária para fazer o trajeto de A a B sem a intervenção humana. Terminando o percurso, solicita a ação humana. Nível 5 – O automóvel é automatizado de forma a que não exista espaço para input humano.

Os diferentes níveis de condução autónoma são aplicados de região para região conforme as necessidades humanas requerem e a legislação e desenvolvimento tecnológico permitem [19]. Em 2021, os Níveis 1 e 2 são os mais comuns nas nossas cidades uma vez que temos sistemas de automatização nos nossos carros como auxílio ao estacionamento e na condução em caso de “pára-arranca”. Estes sistemas de automatização surgiram porque os humanos apresentam dificuldades em estacionar e em manter a correta atenção em situações de trânsito em que durante horas é necessário executar as tarefas de travar, estimar a distância ao próximo carro, acelerar, estimar a distância, parar, etc. Nestes casos o objetivo dos primeiros três níveis de automatização é facilitar a condução diminuindo principalmente o número de estragos materiais. Nos níveis acima (4 e 5), pretende-se automatizar o carro de forma a diminuirmos os números de danos humanos. Substituindo decisões humanas por decisões automáticas processadas por computador. Neste campo, há uma junção de esforços no desenvolvimento dos sensores: SONAR, RADAR e LIDAR. Ao nível da precisão, exatidão e resolução o LIDAR é o sensor que promete tornar viável a condução autónoma em ambiente ur-



Figura 4 - Uma visão artística de um veículo de condução autónoma, guiado por vários sensores incluindo o LIDAR. Imagem: cortesia da Antena 1.

bano, onde existe muito trânsito e situações delicadas na interação de circulação humana e automóvel. A tecnologia LIDAR torna-se importante nas situações de visibilidade reduzida, em particular à noite (Figura 4), e, comparando com as de SONAR e RADAR, permite uma melhor resolução espaço-temporal.

Embora estejamos muito aquém do nível 5, tanto por limites no desenvolvimento tecnológico quanto na inexistência de legislação, já existem serviços de mobilidade a serem comercializados que tem por base tecnologia LIDAR. Na corrida para a construção da primeira plataforma de serviço de mobilidade automática, onde se encontram, entre outras, a Apple e Uber, a empresa que mais se destaca neste segmento é a WAYMO, uma subsidiária da Alphabet. A WAYMO operou mais de 1000 viagens para mais de 1000 clientes que foram transportados em monovolumes automatizados. Estes foram dotados de tecnologia LIDAR para atingir o Nível 4 de condução autónoma [20]. O resultado da aplicação da tecnologia LIDAR no ambiente automotivo é a virtualização de tudo o que rodeia o carro numa nuvem de pontos. Tirando partido das propriedades físicas da radiação que sofre retrodifusão, detetada pelo LIDAR, é possível automatizar os automóveis de forma a que estes conduzam imperativamente melhor que os humanos. Da mesma forma que conhecemos a Lua também podemos dar a conhecer o nosso mundo aos automóveis usando a tecnologia LIDAR. Contudo, o mais provável é que esta tecnologia seja no futuro apenas uma das incluídas num leque de sensores e técnicas de monitorização usados nos carros de condução autónoma.

3. Luz polarizada

3.1. Polarização da luz

A polarização é uma propriedade característica das ondas transversais (em particular, das eletromagnéticas) que descreve a orientação da oscilação. No caso da luz, a oscilação contida dentro do plano perpendicular/transversal à propagação da onda descreve a direção do campo elétrico, \vec{E} (veja-se Figura 5).

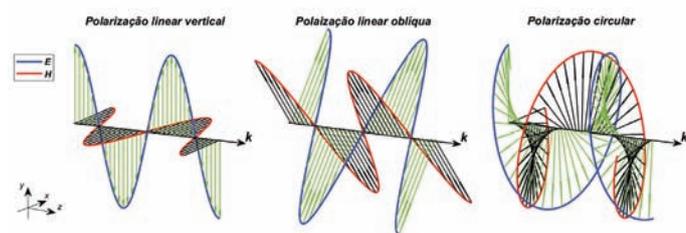


Figura 5 - Campos elétrico (vermelho) e magnético (azul) para luz linearmente polarizada a 0° (lado esquerdo), a 45° (ao centro) e luz circularmente polarizada à esquerda (lado direito). A direção de propagação da onda é determinada pelo vetor de onda.

A polarização da luz recebe diferentes nomes em função de como é visualizada a oscilação da componente elétrica do campo eletromagnético. Quando a oscilação de \vec{E} está orientada numa única direção ao longo da propagação (ortogonal a \vec{k}), é chamada de polarização linear; quando a direção da oscilação roda ao longo da propagação, tem-se polarização circular ou elíptica. Além disso, as polarizações circular e elíptica podem rodar para a esquerda ou para a direita. Na Figura 5 apresentam-se três exemplos de ondas eletromagnéticas com diferentes polarizações lineares (0° e 45°) e circular à esquerda.

A polarização de uma onda eletromagnética, elíptica em geral, depende da relação de fase e das amplitudes das suas componentes segundo duas direções ortogonais (entre si e ao vetor \vec{k}) que podem ser escolhidas de forma arbitrária, consoante a conveniência, sendo muitas vezes designadas pelo termo “base”.

Embora a luz natural usualmente não seja polarizada, os efeitos de polarização surgem no espalhamento da luz na atmosfera e mesmo em reflexões especulares, como, por exemplo, na superfície dum lago. Existe também um fenómeno de reflexão simples que muda a polarização da luz no fundo do mar, resultando em luz polarizada elíptica. Alguns animais desenvolveram a sua visão para a deteção de luz polarizada usando-a para orientação [22]. Várias aplicações, tais como fotografia ou microscopia, utilizam a luz polarizada para aumentar o contraste, enquanto que o cinema 3D usa a polarização para criar efeitos visuais especiais.

Sempre que um feixe ótico interage com a matéria, o estado de polarização refletido ou transmitido vai depender das propriedades da matéria e da superfície sobre a qual o feixe incide, das características do próprio feixe (comprimento de onda, estado de polarização, etc.) e do ângulo de incidência. Assim, diferentes materiais podem refletir ou transmitir diferentemente o mesmo feixe incidente polarizado. O que acontece à polarização quando a luz é refletida ou defletida por um obstáculo? A reflexão especular numa superfície plana sob incidência oblíqua depende do estado de polarização da luz incidente, um facto bem conhecido. As equações de Fresnel determinam os coeficientes de reflexão da luz para os casos de polarização s e p [2],

$$r_s = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}; \quad r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)},$$

onde θ_i e θ_t são os ângulos de incidência e de transmissão que obedecem à relação:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{n_2}{n_1},$$

em que n_2 e n_1 são os índices de refração dos meios onde se propagam a onda incidente e a onda transmitida, respetivamente. Naturalmente, a polarização também influencia a reflexão difusa. Podemos verificar isto usando o modelo de microfacetetas, discutido na seção 1.2.

A biblioteca “Optical Physics” do programa Geant4 permite definir uma polarização linear de entrada, $\vec{e} = (e_x, e_y, 0)$, com as componentes reais, sendo a direção de propagação da luz incidente. A polarização de cada fóton gerado pelo método MC é monitorizada até à sua chegada ao detetor. Usando os mesmos parâmetros da seção 1.2, simulamos a reflexão difusa da luz polarizada por uma camada de TiO_2 . Os resultados, tendo em atenção as alterações do estado de polarização, são mostrados na Figura 6.

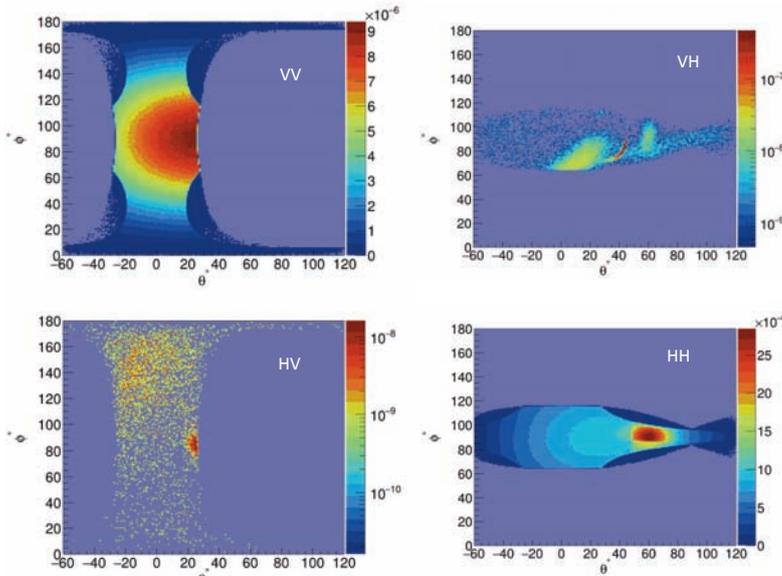


Figura 6 - Resultados de simulações de reflexão difusa da luz linearmente polarizada por uma camada espessa de TiO_2 com a superfície rugosa, para duas polarizações ortogonais designadas por "vertical" (V) e "horizontal" (H). A polarização da luz incidente esta indicada pela primeira letra e a da luz refletida pela segunda letra. O ângulo de incidência é de 30° .

Nesta figura podemos verificar que a reflexão é diferente para as duas polarizações (V e H), por causa da incidência oblíqua. Embora no modelo de microfasetas, implementado no Geant4, as reflexões múltiplas sejam consideradas, estes eventos são raros e não produzem um sinal suficientemente intenso para as polarizações cruzadas da luz incidente e espalhada (HV e VH). Este efeito, tal como alterações mais complexas do estado de polarização da luz refletida, surge apenas quando, devido a grandes relevos na superfície, as reflexões múltiplas são frequentes. Por exemplo, retrorrefletores cuja superfície é composta por facetas planas, regulares que fazem ângulos suficientemente grandes entre si para facilitar a reflexão consecutiva da luz em mais do que uma delas, chamados refletores diédricos, triédricos, etc., já provocam alterações "não diagonais" da polarização linear [23]. Com superfícies esféricas, a alteração do estado de polarização da luz retrorrefletida também requer mais do que uma reflexão.

3.2. Luz parcialmente polarizada

Uma onda eletromagnética monocromática, $\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[i(kx - \omega t)]$, com $\vec{E}_0 = \text{const.}$, é polarizada por definição. No entanto, na prática as ondas nunca são exatamente monocromáticas, com a variação temporal do campo elétrico dada por $\vec{E} = \vec{E}_0(t) \exp(-i\omega t)$, onde ω é uma frequência média. A variação temporal, aperiódica, da direção do campo elétrico significa que a luz não é completamente polarizada. Matematicamente, isto significa que a fase da onda deixa de ser bem definida. A luz parcialmente polarizada pode ser descrita com base nas intensidades, i.e., combinações bilineares das diferentes componentes do campo elétrico.

Um método usado para analisar alterações de polarização produzidas por diferentes materiais baseia-se

na medição do vetor de Stokes, \vec{S} , que comporta uma descrição completa das propriedades polarimétricas de um feixe ótico, mesmo não coerente (i.e., composto por ondas fisicamente independentes que não interferem entre si) [23]. Os quatro parâmetros que formam o vetor de Stokes podem ser calculados a partir de uma série de medidas de intensidade assim como a partir do campo elétrico:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_p E_p^* + E_s E_s^* \rangle \\ \langle E_p E_p^* - E_s E_s^* \rangle \\ \langle E_p E_s^* + E_s E_p^* \rangle \\ i \langle E_p E_s^* - E_s E_p^* \rangle \end{pmatrix},$$

onde E_p e E_s são as componentes paralela e perpendicular do vetor campo elétrico relativamente ao plano de incidência. A interpretação física das componentes do vetor de Stokes é: S_0 é a intensidade total do feixe; S_1 descreve a quantidade de luz com polarização linear, horizontal ou vertical; S_2 descreve a quantidade de luz linearmente polarizada a $+45^\circ$ ou -45° ; e S_3 descreve a quantidade de luz circularmente polarizada (à direita ou à esquerda). Em termos, dos parâmetros de Stokes, o grau de polarização do feixe é dado por:

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad 0 \leq P \leq 1.$$

Por exemplo, o vetor de Stokes $\vec{S}_{\text{np}} = (1, 0, 0, 0)$ (normalizado por S_0) representa uma luz não polarizada (natural) e o vetor $\vec{S}_1 = (0, 0, 0, -1)$ corresponde a uma luz com a polarização circular à esquerda. Um feixe parcialmente polarizado pode ser representado por um vetor de Stokes $\vec{S} = S_0[(1 - P)\vec{S}_{\text{np}} + P\vec{S}_p]$, onde \vec{S}_p , um vetor com norma 1 e com 0 na primeira entrada, representa a parte polarizada.

A reflexão numa superfície, tal como a passagem por um elemento ótico, altera o vetor de Stokes do feixe, $\vec{S} \rightarrow \vec{S}'$. Esta alteração pode ser descrita por uma matriz 4×4 , chamada a matriz de Mueller:

$$\vec{S}' = \hat{M} \cdot \vec{S}.$$

Os 16 elementos reais desta matriz, m_{ij} , que obedecem a certas relações de compatibilidade e, por isso, não são todos independentes [23], descrevem as propriedades polarimétricas dos materiais. A medição destes elementos discute-se em seguida.

4. Polarimetria, uma técnica laboratorial

4.1. Implementação experimental

Um polarímetro é composto por um gerador de polarização (PSG) e por um analisador de polarização (PSA), veja-se Figura 7. O PSG consiste numa fonte de luz (laser) e por elementos óticos (lâminas de atraso, cristais líquidos, etc.) que polarizam a luz emitida pela fonte da forma desejada. Este módulo experimental permite ilu-

minar a superfície da amostra com luz cujo estado de polarização é controlado. No PSG, o polarizador linear é montado antes do modulador de fase. Depois da interação da luz com a superfície do material, o estado da polarização da luz refletida/transmitida é medido pelo PSA. De forma análoga ao PSG, o PSA é composto por um modulador de fase, por um polarizador, montado depois do modulador, e por um detetor.

A geometria da montagem experimental foi desenvolvida para poder fazer os estudos de polarização na amostra em função do ângulo de incidência e de reflexão, como é exemplificado na Figura 8. No caso dos estudos de polarização de luz refletida, o controlo dos dois ângulos referidos de forma independente permite estudar a polarização de luz refletida na direção especular e nas direções (em princípio, arbitrárias) da reflexão difusa.

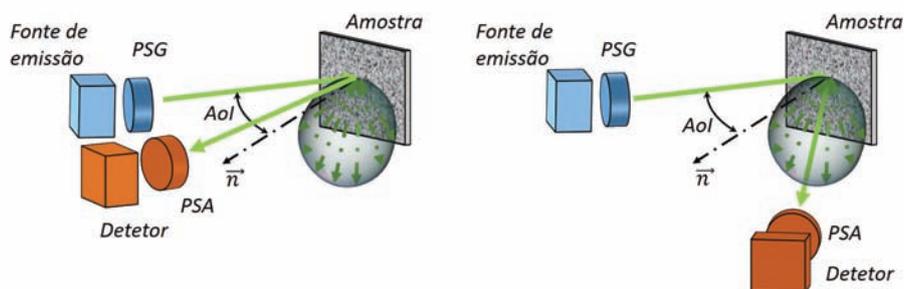


Figura 7 - Ilustração esquemática de um polarímetro Mueller de imagem medindo: a) luz refletida pela amostra; b) luz espalhada pela amostra, para um determinado ângulo de incidência (AoI). Imagem: cortesia de Irene Estevez.

Uma forma convencional de fazer a aquisição completa da resposta de polarimétrica de uma amostra, consiste em fixar os polarizadores lineares e alterar as fases no PSG e no PSA, nos respetivos moduladores com uma

frequência de 5:1. Essa razão permite codificar a informação dos 16 elementos da matriz de Mueller na respetiva transformada de Fourier. A descrição mais detalhada pode ser encontrada, por exemplo, na referência [24].

A título de exemplo, a Figura 8 apresenta as 16 componentes da matriz de Mueller (MM) medidas em função do ângulo de reflexão (θ) a incidência normal para uma superfície metálica comum [25]. A reflexão especular de luz está centrada em ângulo de reflexão de 0° . Os elementos da matriz de Mueller que estão representados nesta figura, exceto o elemento m_{00} , estão normalizados por elemento m_{00} . O elemento m_{00} representa a intensidade de luz (em unidades arbitrárias).

A largura da curva de variação angular do elemento m_{00} , mostra que a superfície da amostra é bastante rugosa, no entanto, está longe de ser lambertiana (compare com a Figura 3). Os elementos diagonais ($m_{11}, i = 1, 2, 3$) representam o grau de polarização linear, vertical e oblíqua, e de polarização circular, respetivamente. Podemos ver que o grau de polarização de luz refletida é máximo para a reflexão especular e diminui com o aumento do ângulo de reflexão. Os elementos da matriz m_{10} e m_{01} mostram que a diatenuação da polarização linear aumenta à medida que o ângulo de reflexão aumenta. No entanto, a polarização linear da luz incidente é preservada, em grande parte, mesmo para os ângulos

(observe-se a variação dos elementos m_{11} $\theta \approx 15^\circ$ e m_{22} . Este efeito (chamado “retenção da polarização”) também foi observado em estudos de tintas metalizadas [26].

4.2. Aplicações da polarimetria

Polarimetria é uma técnica laboratorial que consiste em medir os estados de polarização, sendo útil em diferentes áreas de investigação e de desenvolvimento. Complementar às técnicas de espectroscopia, ela é útil para caracterização e classificação de diversos materiais. Consideremos brevemente algumas das suas aplicações principais.

Aplicações biomédicas

A interpretação das matrizes de Mueller facilita a compreensão das características fundamentais dos tecidos, através de polarização, e também permite estabelecer uma relação entre as imagens polarimétricas e os exames médicos. Na técnica de imagiologia conhecida pela abreviação OCT (*Optical Coherence Tomography*), a aplicação

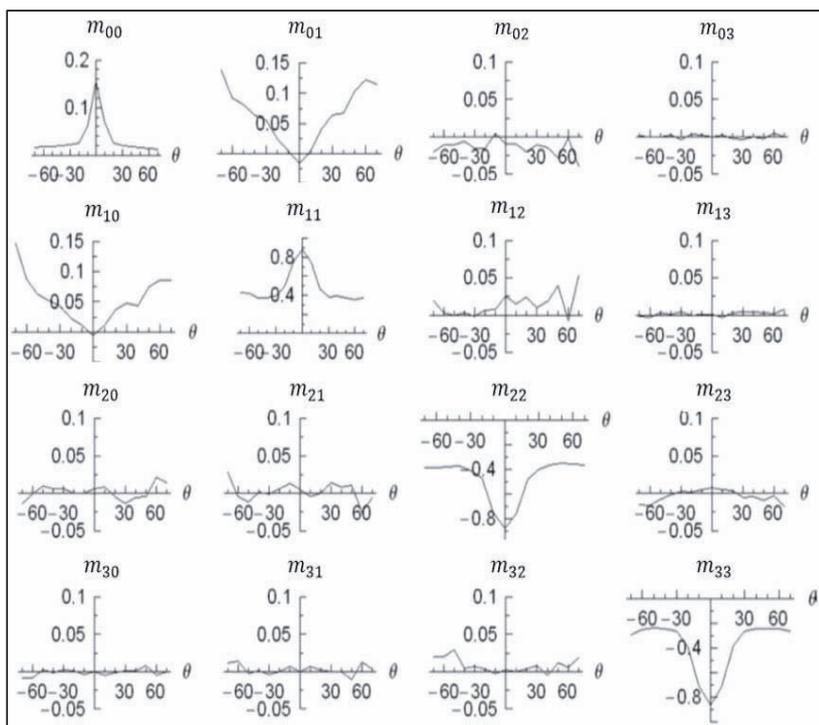


Figura 8 - Representação dos elementos da matriz de Mueller de superfície de uma caixa metálica [25].

de polarização permitiu aumentar o contraste nas imagens. Uma discussão mais detalhada sobre o uso de polarização em OCT pode ser encontrada em [27]. Para além de OCT, podemos encontrar o uso de polarimetria nos estudos de tecidos biológicos [28] e do esqueleto muscular [29], bem como na monitorização da população das bactérias [30].

Em particular, foi demonstrado que o valor absoluto dos elementos da matriz de Mueller m_{11} , m_{22} e m_{33} da luz retrorrefletida nas células cancerígenas é superior ao valor relativo às células não cancerígenas. Nos estudos de polarimetria feitos com vários tipos de tecidos (gordura, tendão, parede arterial) [31], foi observado que:

$$|m_{11}| = |m_{22}| > |m_{33}|,$$

e apenas para o sangue foi observada a relação inversa. Estas conclusões são importantes para o avanço no diagnóstico dos tecidos e na cirurgia.

Outras aplicações

A polarimetria também é usada nas aplicações relacionadas com os estudos da vegetação e do terreno. Por exemplo, foram feitos estudos da resposta de polarização de diferentes árvores e determinou-se que a orientação das folhas afeta o estado de polarização linear da luz refletida na sua superfície [32]. Também foi demonstrado que existem diferenças entre a vegetação seca e a vegetação húmida, em termos da polarização da luz retrorrefletida. É de notar que estes estudos normalmente são feitos com radiação de comprimentos de onda mais longos, da ordem de 1 mm (tratando-se, deste modo, de uma tecnologia intermédia entre o LIDAR e o RADAR).

Uma aplicação interessante de polarização nos estudos urbanos surge no âmbito da tecnologia SAR (*Synthetic-Aperture* RADAR). A quantificação de danos provocados nos edifícios, por exemplo, por um sismo baseia-se na diferença da resposta a incidência de polarização antes e depois da catástrofe. Em particular, a deteção de espalhamento duplo (em duas paredes que fazem um ângulo de 90° e formam um retrorrefletor) da radiação incidente em estruturas não danificadas é facilitada pela polarimetria [33]. A presença de reflexão dupla é característica não apenas nos estudos relacionados com os danos provocados aos edifícios, mas também foi observada antes e depois da construção da ponte "Great Belt Bridge", na Dinamarca. Nesse caso foi possível de detetar as reflexões múltiplas entre as partes da ponte e a superfície de água [34].

5. Conclusões e perspetivas

Esta breve revisão de efeitos associados à reflexão difusa da luz por objetos do mundo real per-

mite concluir que há muita informação na luz difundida sobre o objeto "responsável" pela reflexão, mesmo quando o processo é praticamente elástico (sem alteração do comprimento de onda) e a medição do valor absoluto da refletividade é dificultada. Uma análise detalhada do estado de polarização do feixe refletido, auxiliada por simulações, pode permitir extrair uma parte desta informação. Por exemplo, concluir se o objeto despolariza (o parâmetro fica menor após reflexão) ou apenas altera o tipo (linear ou circular) e/ou a direção da polarização.

A polarimetria possivelmente é uma técnica subaproveitada na caracterização de materiais em laboratório. Pode ser complementar às mais usadas, tais como a espectroscopia de transmissão/reflexão, elipsometria e espectroscopia de Raman, no estudo de materiais.

Fora de laboratório, o potencial da polarimetria até pode ser superior comparando com essas porque as medições são mais robustas em relação a perturbações introduzidas pelo meio ambiente. Vários artigos publicados recentemente [26, 35, 36] analisam a utilidade da polarimetria para identificação de materiais usando imagens de métricas de polarização em comparação com as de radiometria convencional, e também a otimização da sua medição. Usando os algoritmos de "*machine learning*", pode ser possível reconhecer muitos materiais do mundo real pelas suas matrizes de Mueller, o que promete aplicações em mapeamento e caracterização de objetos remotos e na tecnologia LIDAR.

Agradecimentos

Este trabalho é suportado pelo: Fundo Europeu Estrutural e de Investimento para a Componente Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) [Projeto nº 037902 – Sensible Car, Referência do Fundo: POCI-01-0247-FEDER-037902].

Bibliografia

- [1] C. F. Bohren, D. R. Huffman (1998), "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", Wiley & Sons, New York.
- [2] J. D. Jackson (1975), "Classical Electrodynamics", Wiley & Sons, New York.
- [3] J. W. Strutt, J. W. S. B. Rayleigh (1877), "The theory of sound", Macmillan, Cambridge.
- [4] E. Feinberg (1944), "On the propagation of radiowaves along an imperfect surface", J. Phys. (USSR), 8:317-330.
- [5] J.A. Ogilvy (1987), "Wave scattering from rough surfaces", Rep. Prog. Phys., 50:1553-1608.
- [6] P. Beckmann, A. Spizzichino (1963), "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Pergamon, New York.
- [7] L. Belcour, P. Barla (2017), "A practical extension to microfacet theory for the modeling of varying iridescence", ACM Transactions on Graphics (TOG), 36:1-14.
- [8] R. L. Cook, K. E. Torrance (1982), "A reflectance model for computer graphics", ACM Transactions on Graphics (ToG), 1:7-24.

- [9] Geant4 Collaboration, "Introduction to Geant4" (<http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4userdoc/UsersGuides/IntroductionToGeant4/fo/IntroductionToGeant4.pdf>).
- [10] E. Dietz-Laursonn (2016), "Peculiarities in the Simulation of Optical Physics with Geant4", arXiv preprint arXiv:1612.05162.
- [11] W. E. K. Middleton (1953), A. F. Spilhaus, "Meteorological instruments", University of Toronto Press, xi-263.
- [12] E. H. Synge (1930), "XCI. A method of investigating the higher atmosphere", The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 9:1014-1020.
- [13] J. L. Bromberg (1991), "The laser in America, 1950-1970", MIT press.
- [14] I. Smalikhov (2003), "Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20:276-291.
- [15] "A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology: EARLINET" (https://www.earlinet.org/index.php?id=earlinet_homepage).
- [16] J. H. Churnside, R. D. Marchbanks, S. Vagle, S. W. Bell, P. J. Staben (2020), "Stratification, plankton layers, and mixing measured by airborne lidar in the Chukchi and Beaufort seas", Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 177:104742.
- [17] L. D. Smullin, G. Fiocco (1962), "Optical echoes from the moon." Nature G., 194:1267-1267.
- [18] M. K. Barker, "High-resolution Lunar Topography (SDEM2015)" (<https://pgda.gsfc.nasa.gov/products/54>).
- [19] J. Shuttleworth, "SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update" (<https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>).
- [20] E. Ackerman, "What Full Autonomy Means for the Waymo Driver" (<https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/full-autonomy-waymo-driver>).
- [21] R. A. Chipman, W. S. T. Lam, and G. Young (2018), "Polarized light and optical systems", CRC Press, New York.
- [22] L. M. Bernardo (2010), "Histórias da luz e das cores", Universidade do Porto, Porto.
- [23] S. Cloude (2009), "Polarisation: Applications in Remote Sensing", Oxford University Press, New York.
- [24] M. H. Smith (2002), "Optimization of a dual-rotating-retarder Mueller matrix polarimeter" Applied Optics, 41:2488-2493.
- [25] B. J. DeBoo, J. M. Sasian, R. A. Chipman (2005), "Depolarization of diffusely reflecting man-made objects", Applied Optics, 44:5434-5445.
- [26] E. J. Nunes-Pereira, H. Peixoto, J. Teixeira and J. Santos (2020), "Polarization-coded material classification in automotive LIDAR aiming at safer autonomous driving implementations". Applied Optics, 59:2530-2540.
- [27] J. F. de Boer, C. K. Hitzenberger, Y. Yasuno (2017), "Polarization sensitive optical coherence tomography - a review", Biomedical Optics Express, 8:1838-1873.
- [28] J. Qi, D. S. Elson (2016), "A high definition Mueller polarimetric endoscope for tissue characterisation", Scientific Reports, 6:1-11.
- [29] H. He, N. Zeng, R. Liao, T. Yun, W. Li, Y. He, H. Ma (2010), "Application of sphere-cylinder scattering model to skeletal muscle, Optics Express, 18:15104-15112.
- [30] P. Banerjee, J. Soni, H. Purwar, N. Ghosh, T. K. Sengupta (2013), "Probing the fractal pattern and organization of Bacillus thuringiensis bacteria colonies growing under different conditions using quantitative spectral light scattering polarimetry", Journal of Biomedical Optics, 18:035003.

- [31] M. R. Antonelli, A. Pierangelo, T. Novikova (2010), "Mueller matrix imaging of human colon tissue for cancer diagnostics: how Monte Carlo modeling can help in the interpretation of experimental data", Optics Express, 18:10200-10208.
- [32] C. C. Borel, R. E. McIntosh (1990), "Millimeter wave backscatter from deciduous trees", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 38:1391-1398.
- [33] S. Chen, X. Wang, M. Sato (2016), "Urban Damage Level Mapping Based on Scattering Mechanism Investigation Using Fully Polarimetric SAR Data for the 3.11 East Japan Earth-quake", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54:6919-6929.
- [34] J. S. Lee, E. Krogager, T. L. Ainsworth, W. M. Boerner (2006), "Polarimetric analysis of radar signature of a manmade structure", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 3:555-559.
- [35] M. Kupinski, L. Li (2020), "Evaluating the Utility of Mueller Matrix Imaging for Diffuse Material Classification", Journal of Imaging Science and Technology, 64(6):60409-1-60409-7.
- [36] J. Brown, C. Saludez, D. Card, R. Roberts (2020), "Polarimetric Lidar Feature Selection for Material Classification," 2020 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), 1-3.



Nazar Romanyshyn, é Mestre em Engenharia Física pela Universidade de Aveiro, com experiência de investigação, como bolseiro, no âmbito de projetos "EasyPET" e "Sensible Car". No projeto easyPET desenvolveu detetores de radiação gama para o protótipo, sendo co-autor de um artigo publicado. Atualmente está a trabalhar no Centro de Física da Universidade do Minho, projeto "Sensible Car", sobre novos conceitos e o desenvolvimento do sensor LiDAR.



Moisés A.S. Duarte, concluiu o Mestrado Integrado em Engenharia Física, com especialização em Física da Informação, pela Universidade do Minho. Na sua tese explorou técnicas de light-field para a implantação de um processo de testes para a inspeção de sistemas AR-HUD (Augmented Reality Head-Up Display) que resultou em duas publicações. No momento encontra-se associado à Bosch Car Multimédia trabalhando no desenvolvimento de processos de teste para a inspeção de sistemas LiDAR. Parte do seu trabalho também inclui a gestão e colaboração na linha de inovação para o desenvolvimento da tecnologia LiDAR.



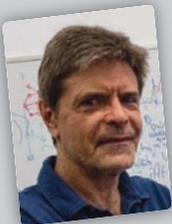
Nelsson Fernandez Cunha, é Mestre em Física pela Universidade do Minho, com especialização em Física Aplicada e atualmente estudante de Doutoramento no Programa Doutoral MAP-Fis. A sua experiência de investigação inclui

a participação, como bolseiro do Centro de Física da Universidade do Minho, no projeto “Functional and smart materials for advanced applications” (desenvolvimento de filtros óticos à base de filmes finos para arrefecimento radiativo passivo) e, atualmente, no “Sensible Car” (no desenvolvimento de estação de testes de fim de linha, auto-calibração e alinhamento).



Mário Rui Cunha Pereira, é Doutorado em Física em 2004, é Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade do Minho e membro efetivo do Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto. Estuda a incorporação

de moléculas orgânicas e biologicamente ativas em estruturas Sol-Gel e a aplicação de técnicas de espectroscopia de fluorescência, em estado estacionário e transiente, no estudo de materiais. Também desenvolve investigação na aplicação de métodos de deteção de objetos e caracterização de materiais usando a tecnologia LiDAR.



Mikhail Vasilevskiy, obteve os seus graus de Mestre em Física e de Doutor em Ciências Físicas e Matemáticas pela Universidade N. I. Lobachevsky na cidade de Gorky, União Soviética, em 1981 e 1985, respetivamente. Desde 1999 é professor no

Departamento de Física da Universidade do Minho (Professor Catedrático desde 2006) e investigador no Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto, onde desempenhou as funções do Diretor. Os seus interesses científicos são focados na Física e Ótica de materiais semicondutores e plasmónicos incluindo nanoestruturas e na interação luz-matéria (teoria e modelação). É autor ou coautor de um livro, vários capítulos de livro e mais de 170 artigos publicados em revistas com avaliação por pares.