

Câmera escura estéreo: Construção e atividades experimentais⁺*

*Gilmário Barbosa Santos*¹

Departamento de Ciência da Computação – UDESC

Joinville – SC

*Sidney Pinto Cunha*²

CTI – Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

Campinas – SP

Resumo

Esse trabalho relata a construção de uma câmera escura estéreo (também conhecida como câmera de orifício ou câmera pinhole) voltada à captura de pares de imagens estereoscópicas e propõe atividades experimentais com a mesma. A câmera escura pode ser tão sofisticada quanto se queira, ou tão simples a ponto de poder ser construída artesanalmente, praticamente com materiais recicláveis. Esse trabalho descreve o uso prático desse tipo de câmera ao longo da história, bem como na atualidade. Aspectos da óptica e da geometria envolvidos na construção da câmera escura estéreo são apresentados de forma ilustrada. São propostos experimentos com a utilização das imagens obtidas pela câmera para a visualização em 3D por meio de par de óculos anaglifos, bem como é discutida a realização de estimativas de profundidade relativa por meio de triangulação.

Palavras-chave: Ótica; Visão estéreo; Câmera escura.

⁺ Stereo Pinhole Camera: Assembly and experimental activities

^{*} Recebido: julho de 2014.

Aceito: maio de 2015.

¹ E-mail: gilmariobs@gmail.com

² E-mail: sidney.cunha@cti.gov.br

Abstract

This work describes the assembling of a stereo pinhole camera for capturing stereo-pairs of images and proposes experimental activities with it. A pinhole camera can be as sophisticated as you want, or so simple that it could be handcrafted with practically recyclable materials. This paper describes the practical use of the pinhole camera throughout history and currently. Aspects of optics and geometry involved in the building of the stereo pinhole camera are presented with illustrations. Furthermore, experiments are proposed by using the images obtained by the camera for 3D visualization through a pair of anaglyph glasses, and the estimation of relative depth by triangulation is discussed.

Keywords: *Optics; Stereo vision; Pinhole camera.*

I. Introdução

A câmera escura, ou câmera de orifício de agulha, é um dispositivo de captura de imagens que não utiliza sistemas de lentes ópticas. Sem essas lentes a formação de imagens depende diretamente de um pequeno orifício milimétrico e do percurso de raios projetores refletidos ou produzidos por um cenário.

Para entender a câmera escura é preciso analisar a geometria envolvida na sua concepção. Utilizando a Fig. 1, imaginemos o espaço 3D dividido por um plano (π) infinito, formando dois semiespaços (esquerdo e direito). Esse plano possuiria um orifício (f) de diâmetro infinitesimal (ideal) através do qual os/as raios/retas projetantes ligariam os pontos de um dos lados às suas projeções do outro lado desse plano. Dessa forma, as coordenadas dos pontos pertencentes ao semiespaço esquerdo ficariam invertidas, tanto na horizontal como na vertical, quando suas respectivas projeções fossem observadas no semiespaço direito. Esse efeito é observado na Fig. 1A, onde a projeção da árvore está invertida devido ao percurso dos raios projetantes.

Por essa abstração e observando a Fig. 2A, a câmera escura seria uma caixa no semiespaço direito, cuja face frontal seria um semiplano (contido no plano π) apresentando um orifício correspondente ao orifício f (ponto focal), porém em dimensões reais (não infinitesimais). Ademais, haveria um semiplano p correspondente ao fundo da câmera (doravante designado como plano-de-imagem), o qual receberia as projeções vindas da cena localizada no semiespaço esquerdo.

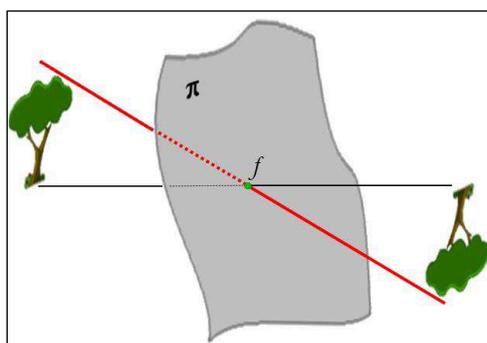


Fig. 1 – Um plano π dividindo o espaço em dois. Um orifício permite a passagem de raios/retas projetantes de um semiespaço para o outro. As coordenadas dos pontos são invertidas nas suas projeções. Fonte: próprios autores.

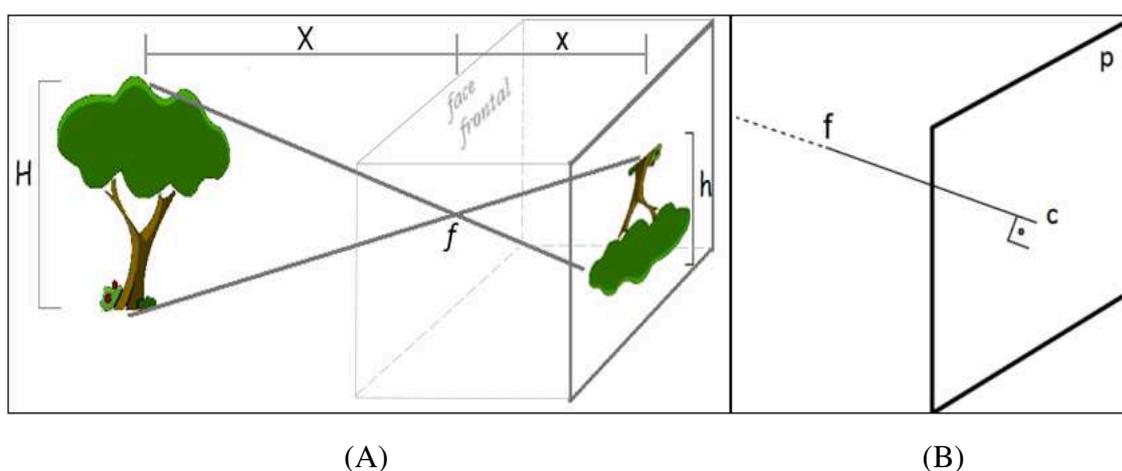


Fig. 2 –A) O percurso dos raios projetores produz uma projeção invertida dentro da câmera escura. A partir da renascença, até o advento da fotografia, a câmera escura era muito utilizada como recurso para reprodução de paisagens. B) Modelo constituído por um plano p , um centro c , e um ponto focal f localizado no orifício da câmera escura. Fonte: próprios autores.

Atendendo-se às considerações anteriores, o modelo mais simples de uma câmera escura pode ser definido (conforme a Fig. 2B) como o semiplano de projeção p , o eixo-focal cf e um ponto focal f . Onde cf é perpendicular ao plano p e f corresponde ao o orifício da câmera, por meio do qual devem passar todos os raios de luz. A distância entre o plano p e o ponto f , sobre o eixo-focal, é conhecida como distância focal.

Essa concepção primitiva viabiliza a construção artesanal da câmera escura utilizando materiais de baixo custo, constituindo-se basicamente por: uma caixa com paredes internas pintadas de cor preta e fosca (para não refletir a luz), um pequeno orifício e um anteparo no fundo, do lado oposto ao orifício. Sobre este anteparo, ou plano-de-imagem, a imagem da

cena é projetada de maneira invertida e, devido às dimensões da câmera escura, a altura (h) da projeção é menor que a altura (H) do objeto projetado (Fig. 2A).

Ainda na Fig. 2A, por semelhança de triângulos, se tem a relação exibida na Equação 1, a qual pode ser utilizada para estimar a altura (H) do objeto a partir da medição da altura da sua projeção (h), da distância focal (x) e distância do objeto até a câmera escura (X).

$$\frac{H}{X} = \frac{h}{x} \quad (1)$$

na qual:

H = altura do objeto;

h = altura da projeção do objeto;

X = distância do objeto até a parte frontal da câmera escura;

x = distância focal da câmera escura.

A parte frontal da câmera escura deve ser produzida em material opaco. Pode ser utilizada a madeira, mas preferencialmente opta-se por um material que apresente baixa resistência mecânica, para facilitar a realização da furação centralizada na face da câmera. Um material bastante utilizado é a cartolina e a perfuração normalmente é feita com o uso de uma agulha. O plano-de-imagem, por sua vez, pode ser uma tela branca de papel-manteiga, um vidro translúcido, ou material fotossensível (filme fotográfico ou papel fotográfico).

O mesmo conceito óptico que serve de base para a câmera escura, também é encontrado em sistemas de visão biológicos desenvolvidos naturalmente em certos animais. Um exemplo observado é o do *Nautilus Pompilius*, mostrado na Fig. 3A. Trata-se de um animal marinho cujo único olho se constitui de um orifício e células sensoriais, essencialmente um olho do tipo “câmera escura” (INSGRÓ *et al.* 1984).

A seguir, com base nos textos de Grepstad (2015), Wenczel (2007) e Rezende (2011), é feito um resumo histórico da evolução da captura de imagens por meio de câmeras escuras.

Ao longo do tempo as câmeras escuras foram utilizadas para várias finalidades. No quinto século a.C., o filósofo chinês, Mo Jing, já mencionava o efeito da inversão de imagens em câmeras de orifício. Quatro séculos a.C., os gregos imaginavam que os raios de luz fossem emitidos pelos olhos, conceito que, de certa forma, dificultou o entendimento dos fenômenos ópticos envolvidos. De fato, os raios de luz entram no olho humano, propagando-se em trajetória retilínea de forma semelhante ao que ocorre na câmera escura. A partir dessa abordagem as leis da geometria passaram a ser aplicadas aos estudos voltados à formação de imagens, propiciando a determinação de modelos matemáticos para descrever os fenômenos óticos observados e a própria formação da imagem.

Em 330 a.C Aristóteles chegou a comentar sobre a câmera escura analisando por que a luz do Sol, ao passar por um orifício retangular, projetar uma imagem circular. Na verdade, a observação segura de manchas e eclipses solares é tida como uso mais antigo de uma câme-

ra escura, remontando à Idade Antiga (período anterior à Idade Média). Fora do eixo europeu, no Egito, o astrônomo e matemático Ibn al-Haytham (Alhazen) publicou seu livro *Book of Optics*, em 1021 d.C., relatando detalhes sobre a construção de uma câmera. Ele interpretou corretamente o fenômeno envolvido, observando que quanto menor o orifício, mais nítida era a imagem e vice-versa.

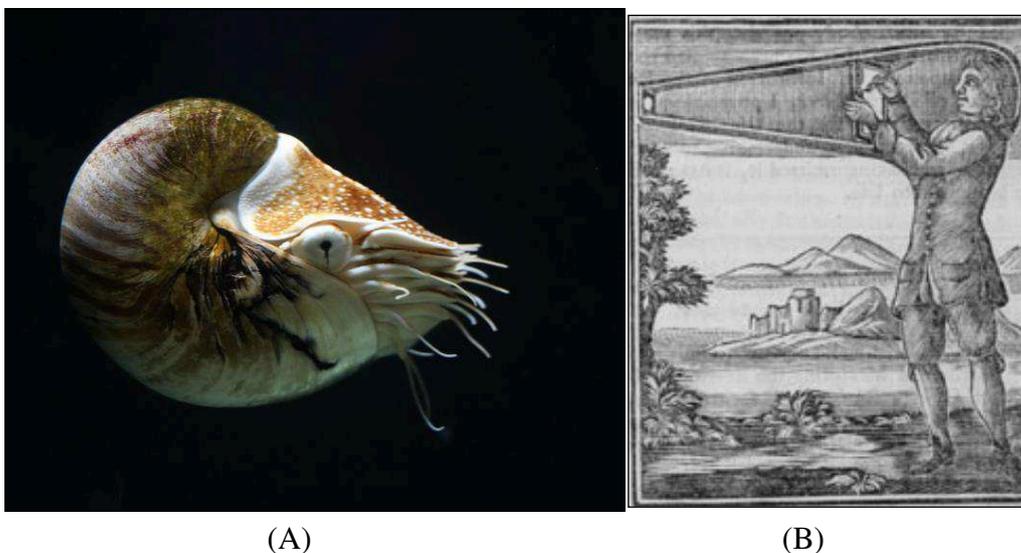


Fig. 3 – A) Cabeça do Nautilus Pompilius. Fonte: por Hans Hillewaert. Licença pública, commons.wikimedia.org/wiki/File:Nautilus_pompilius_3.jpg#/media/File:Nautilus_pompilius_3.jpgcommons.wikimedia.org. B) Ilustrador decalcando uma imagem na câmera escura portátil de Hooke, imagem datada de 1694. Fonte: Wenczel (2007).

No século XII, Robert Grosseteste e Roger Bacon comentaram sobre a câmera escura em seus escritos. Ao cientista napolitano Giovanni Battista della Porta (1538-1616) foi creditada a invenção da câmera escura, por sua descrição na obra *Magia Naturalis* de 1558. Ele foi reconhecido como um dos primeiros sábios que levaram a física do plano filosófico para o plano experimental.

Wenczel (2007) relata que Leonardo da Vinci (1452-1519) menciona a câmera escura no seu *Codex Atlanticus*, fornecendo detalhes sobre diagramas explicativos e observações dos efeitos obtidos. Não seria de estranhar que, além do mero interesse científico, da Vinci também tenha utilizado câmeras de orifício com finalidades artísticas. No período renascentista muitos artistas utilizaram os recursos da câmera escura como ferramenta para auxílio na pintura, a Figura 3B ilustra esse uso. De fato, o impacto do uso da câmera escura sobre a prática artística da pintura foi significativo. Segundo Wenczel (2007), certa vez um embaixador Holandês de nome Constantijn Huygens (1596-1687), que servia em Londres, enalteceu a câmera escura a ponto de declarar que todas as outras técnicas de pintura estariam mortas, se comparadas ao procedimento de pintura auxiliado pela câmera escura. Abaixo, em tradução livre, é reproduzida a carta a familiares onde Huygens relata seu entusiasmo.

Eu tenho em casa um outro instrumento de Drebbel [ele se refere a uma câmara escura adquirida de Cornelis Drebbel (1572-1633), um inventor], o qual certamente produz admiráveis efeitos na pintura de reflexão em uma sala escura; para mim é impossível revelar a beleza, para vocês, em palavras. Por comparação toda a pintura está morta, pois aqui está a própria vida ou algo mais elevado, se fosse possível articulá-lo. Como qualquer um pode ver, a figura e o contorno e os movimentos se unem naturalmente de forma extremamente agradável (C. Huygens in a letter to his parents of April 13, 1622).

Em 1850, Sir David Brewster capturou de fato a primeira fotografia com uma câmara escura. Sir William Crookes e William de Wiveleslie Abney também foram fotógrafos pioneiros com tais câmeras. Outras aplicações, como gravação de imagens com substâncias fotossensíveis, como as primeiras experiências em fotografia (ou heliografia como foi chamada inicialmente), foram então desenvolvidas. Utilizando-se como material de gravação, em primeiro lugar o betúmem da Judéia, depois os sais de prata, e por fim as emulsões fotográficas (haletos de prata), os protagonistas e pioneiros foram Joseph Niépce Nicephore (1765-1833) e Louis Mandé Daguerre (1787-1851). Porém, um inventor francês radicado no Brasil, residente em Campinas no interior de São Paulo, desenvolveu em 1832 um método fotográfico reconhecidamente mais eficiente do que o de Daguerre, tratava-se de Antoine Hercule Romuald Florence (Nice, França, 1804 – Campinas, SP, 1879) (REZENDE, 2011), o trabalho de Florence demorou um século para ser reconhecido internacionalmente.

Nessa linha do tempo, tivemos todo o desenvolvimento da fotografia analógica, os suportes de vidro e depois os de acetado, as emulsões fotográficas, em preto e branco, em seguida os filmes coloridos, e os sistemas opto-mecânicos, o cinema preto e branco, mudo, depois colorido e falado. Em tempos atuais, as câmeras escuras, ou por assim dizer, os seus princípios, ainda são amplamente aplicados em vigilância e espionagem, associadas com sensores CCD e CMOS de alta sensibilidade, em situações de iluminação específica ou por necessidade de miniaturização, nas quais outras possibilidades são inviáveis, como em aplicações onde não é possível se utilizar lentes, em comprimentos de onda muito curtos como no caso de luz ultravioleta, dos raios-X e raios-gama. E também em várias outras situações tais como uma instalação de câmara escura no espaço sideral.

As câmeras escuras têm sido utilizadas em astronomia ao longo da história, desde o século XV. Pode-se mencionar o desenho de uma câmara escura publicado pelo astrônomo Gemma Prisius em 1545 e utilizada para estudo de eclipses solares (GREPSTAD, 2015). Em tempos mais atuais temos o Projeto Ariel V, uma colaboração da NASA e Agência Espacial Britânica, para a observação de fonte de raios-X no espaço; bem como o projeto MOXE (*Monitoring X-ray Experiment*) da agência espacial russa em colaboração com a NASA e outras agências, o projeto PIXIE (*Polar Ionosphere X ray Imaging Experiment*), da NASA. Também em outro projeto da NASA para a localização de exo-planetás (Fig. 4) utilizando uma câmara

escura gigante com distância focal igual a 200.000 km e diâmetro de orifício de dez metros (TOLAND, 2005).

O modelamento de imagens em visão computacional utiliza primordialmente a mesma geometria da formação de imagem vista no modelo de câmera escura. Partindo desse modelo primitivo, ao se desenvolver e acrescentar lentes, sistemas ópticos, sistemas mecânicos, eletrônicos e outros aparatos tecnológicos, chegou-se ao atual estágio dos sistemas de imagem. E assim se passou dos sistemas analógicos para os digitais ao longo de um século e meio de desenvolvimentos. As câmeras digitais, as webcam, microcâmeras, telescópios terrestres e espaciais (e.g. Hubble, HST), as supercâmeras (com captura de milhares de quadros por segundo), os equipamentos de ultra-alta definição de imagem e outros dispositivos modernos de captura de imagens, esse é o universo atual do estado da arte em equipamentos de captura e processamento de imagens.

Os sistemas digitais de imagem possibilitaram a conexão do computador (e microprocessadores) com as câmeras, as imagens com o processamento digital e, por sua vez, os sistemas industriais puderam se beneficiar desses avanços e todas as mudanças que as imagens digitais estão proporcionando, como nas aplicações em visão computacional e na robótica.



Fig. 4 – Ilustração da câmera escura astronômica cujo anteparo possui centenas de metros apresentando orifício de 10 m, a distância focal é de 200.000 km. Fonte (TOLAND, 2005).

II. Câmera escura estéreo

O breve histórico feito acima demonstra a sobrevida do conceito simples e eficiente da câmera escura ao longo da história, apresentando-se como um recurso tecnológico impor-

tante mesmo em tempos atuais. Essa constatação motivou o trabalho ora relatado, no qual se propõe a construção de uma câmera escura estéreo (modelo visto na Fig. 5). Essa câmera apresenta dois dispositivos de orifício acoplados lado a lado, simetricamente, cujos planos-imagem são coplanares e os respectivos eixos ópticos são (aproximadamente) paralelos. Com essa câmera são possíveis várias atividades, tais como a captura de imagens estéreo em filme fotográfico, ou com o uso de sensores eletrônicos de imagem (CCD, CMOS), bem como a visualização de imagens em 3D por meio de par de óculos anaglifos.

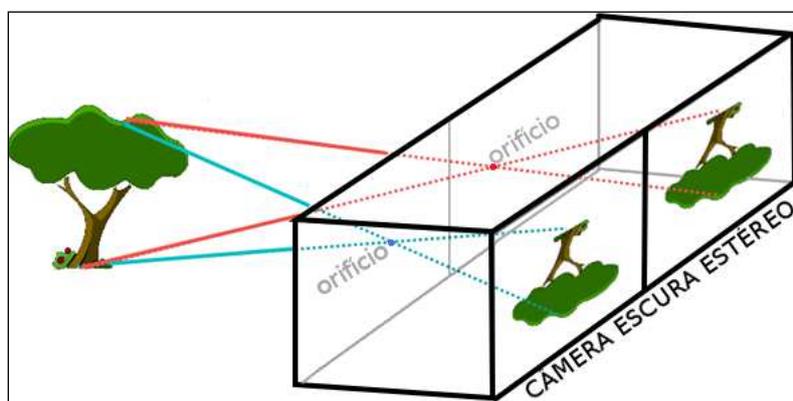


Fig. 5 – Ilustração de câmera escura estéreo, composta por duas câmeras simples alinhadas e independentes. Fonte: próprios autores.

A câmera escura estéreo se assemelha ao sistema binocular de visão humana. Uma cena 3D é projetada em um par de imagens 2D, chamado par-estéreo, as imagens direita e esquerda apresentam uma paralaxe que produz uma diferença entre as imagens. O sistema de visão humano também se baseia na formação do par de imagens em paralaxe, as imagens esquerda e direita são combinadas pelo cérebro (processo chamado de *estereopsia*) recuperando a percepção de profundidade (as coordenadas x , y e z) dos objetos na cena. Será discutido um experimento nesse campo utilizando a câmera escura aqui proposta.

III. Determinação do diâmetro do orifício da câmera escura

Uma questão fundamental para a construção da câmera escura é a usinagem dos seus orifícios. As Fig. 6a e 6b mostram pequenos orifícios feitos com uma agulha de costura e uma broca de furadeira, respectivamente. Nos orifícios é possível observar várias pequenas irregularidades nas bordas. Ocorre uma perda de qualidade na imagem, por causa dos efeitos de difração da luz, quando o tamanho dessas irregularidades for da ordem do comprimento de onda.

O caminho óptico é uma trajetória retilínea desde a fonte da radiação até um ponto pertencente ao plano-de-imagem. Apenas efeitos das bordas do orifício vão interferir na traje-

tória da onda luminosa. As diferentes intensidades de luz emitida ou refletida dos pontos da cena formam uma projeção da mesma sobre o plano-de-imagem.

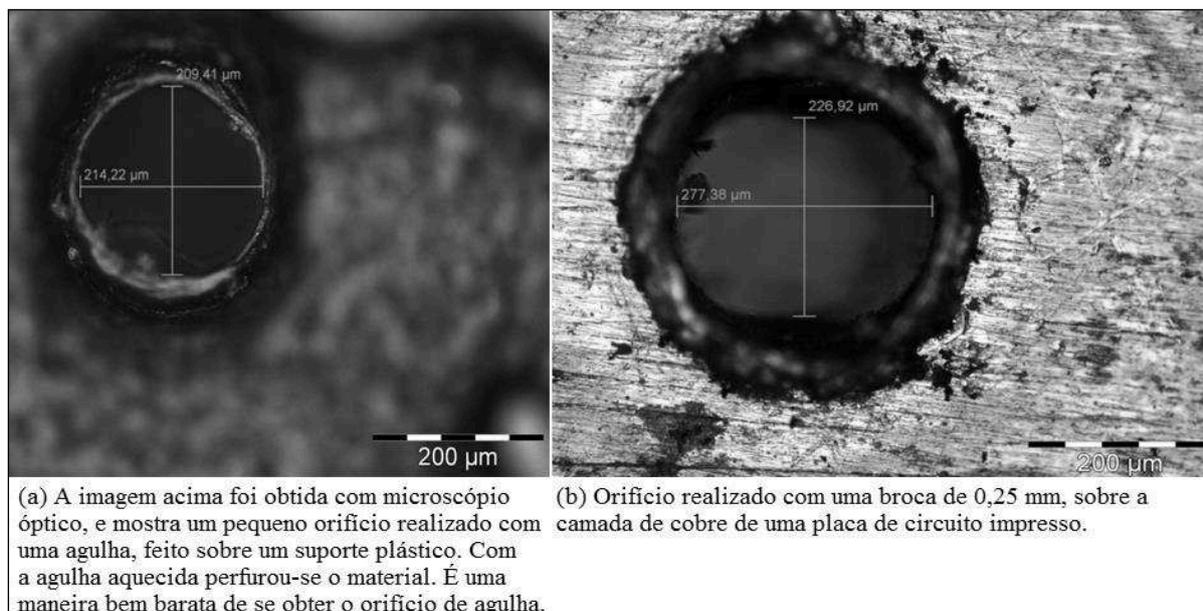


Fig. 4 – Visão microscópica do orifício da câmera, feito com a ponta de uma agulha na câmera escura. Fonte: próprios autores.

O ideal é que a normal ao plano-de-imagem passe pelo orifício, ou seja, o plano-de-imagem seja paralelo ao plano frontal à câmera (que contém o orifício) bem como não haja irregularidades no orifício. Esse ideal não é perseguido neste trabalho, pois exigiria o uso de equipamentos e um ambiente laboratorial que foge à proposta basicamente artesanal aqui defendida. Como um exemplo desse aspecto artesanal há o filme fotográfico, usado como substrato para captura da imagem, que é vendido em rolos e não permanece perfeitamente plano. Também é tarefa sofisticada construir uma câmera cujo plano-de-imagem seja precisamente paralelo ao plano da face frontal, ou com um orifício finamente polido.

No entanto, ainda que seja artesanal, a câmera precisa apresentar uma resolução que permita a distinção dos elementos na cena. No caso da câmera escura, a resolução é influenciada pelo padrão de difração da luz (resultante da sua natureza ondulatória) e pelo diâmetro do orifício. De fato, por meio da Equação 2 é possível determinar o valor da resolução (R) em função do comprimento de onda e do diâmetro do orifício. É preciso analisar essa relação para um melhor entendimento desse quesito.

$$R = \frac{0,61 \lambda}{d} \quad (2)$$

na qual:

d = diâmetro do orifício;

λ = comprimento de onda da luz.

As ilustrações na Fig. 7 exibem os padrões de difração na forma tridimensional e respectiva projeção sobre o plano-de-imagem da câmera escura. Para um orifício circular, essa projeção forma o padrão 2D conhecido como disco de Airy (homenagem a George Biddell Airy, 1835). A Fig. 7A-i mostra esse disco de Airy para uma fonte pontual. Ele é constituído por anéis concêntricos (2D) correspondentes a franjas (3D) formadas pela difração da luz ao passar pelo orifício da câmera. Na mesma Fig. 7A-i nota-se que a região de máximo de difração corresponde ao círculo central vermelho do disco de Airy. Além disso, o primeiro anel branco a partir do centro do disco corresponde ao primeiro mínimo no padrão 3D de difração, conforme indicam as setas verdes na Fig. 7A-i. Na Fig. 7A-ii, as duas fontes pontuais estão menos resolvidas (diferenciadas/separadas) do que na Fig. 7A-iii.

A resolução de detalhes na imagem ocorre a partir do ponto em que Critério de Rayleigh é obedecido, ou seja, quando o máximo da difração de uma das projeções coincide com o primeiro mínimo de difração da outra projeção, como é visto na Fig. 7A-ii e detalhado na Fig. 7B. No caso da Fig. 7A-iii a resolução já está bem determinada, os máximos de intensidades difração estão distantes mais do que o necessário, atendendo ao Critério de Rayleigh com folga. Uma maneira de atender o Critério de Rayleigh folgadoamente, obtendo imagens com maior resolução é utilizar um diâmetro de orifício de acordo com a Equação 3 (LAM-BRECHT, 2011):

$$d = \sqrt{3,66 f \lambda} \quad (3)$$

na qual:

d = diâmetro do orifício;

f = distância focal (distância entre o orifício e plano-de-imagem);

λ = comprimento de onda da luz.

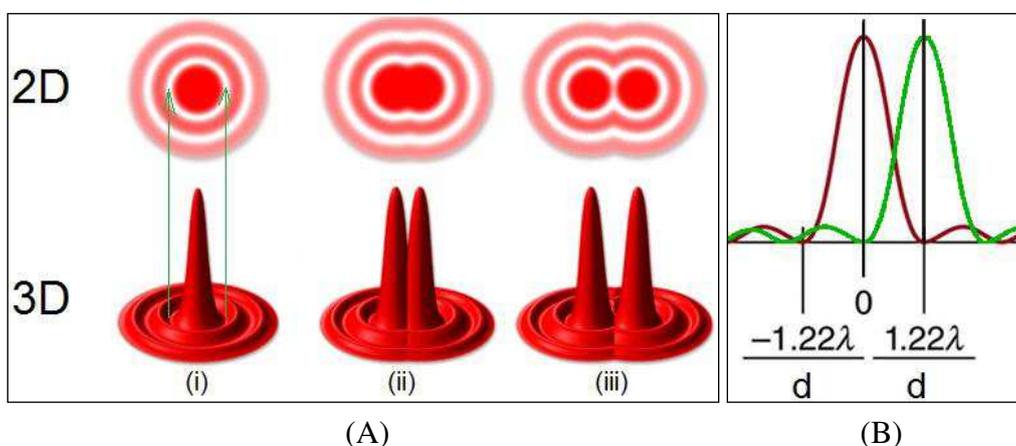


Fig. 7 – A) Padrões de difração em 2D e 3D para uma e duas fontes pontuais de luz. B) Detalhamento da imagem A-ii para duas fontes resolvidas sob critério de Rayleigh. Fontes: Rudi et al. [s.d.] e Boundless (2014).

Ainda de acordo com Lambrecht (2011), a Equação 3 provê um orifício cuja profundidade de campo (*Depth of Field* – DOF é ilustrado na Fig. 8) é praticamente infinito, esse tipo de câmera consegue imagens de boa qualidade tanto para objetos localizados a frações de metro de distância, quanto para aqueles localizados no “infinito” (Fig. 9). Nesse caso, o termo “infinito” se refere à posição dos objetos do fundo da imagem, localizados a uma distância extremamente grande se comparada à distância focal da câmera. De fato, o foco no “infinito” é uma característica das câmeras escuras em geral (GREPSTAD, 2015).

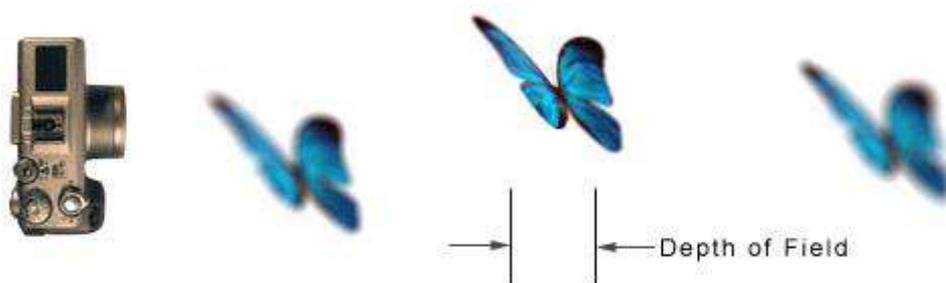


Fig. 8 – Profundidade de Campo (*Depth of Field* - DOF): distância entre o objeto mais próximo e o mais distante, em uma cena, os quais aparecem nítidos na imagem formada. Fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Depth_of_field_diagram.png



Fig. 5 – Imagem capturada por uma câmera de orifício: DOF no infinito. Fonte: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skravika.jpg?uselang=pt-br>.

IV. Construção da câmera escura estéreo

Neste trabalho foi utilizada uma caixa descartável para a construção da câmera escura estéreo, como mostra a Fig. 10A. No caso, a caixa é feita de madeira e servia de embalagem de charutos, mas poderia ser uma lata de aveia ou uma caixa de papelão, desde que a vedação à luz fosse realizada. As paredes internas foram pintadas de cor preta fosca para evitar reflexões no interior da câmera escura, na qual a luz penetra apenas pela parte frontal. As dimensões utilizadas constam no esquema exibido na Fig. 10B. As demais características construtivas são as seguintes:

1. As imagens formadas no lado direito e no lado esquerdo são devidamente separadas por uma divisão interna que isola as imagens do par-estéreo (par de imagens estereoscópicas), impedindo que as imagens de ambos os orifícios se misturem;

2. Instalou-se uma placa com dois orifícios separados por 65 mm de distância (valor equivalente à média da distância interocular humana), com a finalidade de se obter o par de imagens do par-estéreo;

3. Internamente a caixa deve ser isenta de vazamentos espúrios de luz, preferencialmente pintada de cor preta e fosca, para se evitar reflexões internas de luz.

4. Para o cálculo do tamanho do orifício da câmera:

a. Foi tomado o valor intermediário dos comprimentos de onda no espectro visível, ou seja, $\lambda = 550 \text{ nm}$;

b. Adotou-se a distância focal $f = 25 \text{ mm}$ (determinado pelas dimensões da câmera conforme projeto exibido na Fig. 10B);

c. Com esses parâmetros a Equação 3 forneceu um orifício de tamanho $d = 0,22 \text{ mm}$. Esse orifício pode ser feito facilmente com: a ponta de uma agulha de máquina de costura, número 60 (veja descrição na seção de anexos) ou uma agulha de acupuntura na espessura mais próxima à do valor calculado³. Para o caso de materiais mais rígidos (ex. madeira) deve-se adquirir uma broca de dentista (nesse caso existem diâmetros a partir de 0,1 mm, essas brocas são encontradas em estabelecimentos comerciais especializados em equipamentos para odontologia). Deve-se sempre ter o cuidado de fazer dois orifícios alinhados e de qualidade, numa placa de pouca espessura, preferencialmente de espessura pouco maior ou igual ao diâmetro dos orifícios.

5. Por sua vez, o plano-de-imagem, onde estará o filme fotográfico ou sensor de imagem, deve estar paralelo à reta determinada pelos dois orifícios. No caso, utilizou-se filme comum 35 mm, colorido, ISO 100, facilmente encontrados em *sites* de compras.

³ Em *sites* especializados, encontra-se uma ampla variedade de diâmetros de agulhas de acupuntura de 0,16 a 0,3 mm.

V. Estimativa do tempo de exposição do filme

O par-estéreo é formado por dois quadros (em verde na Fig. 10B) de um rolo de filme fotográfico, o qual é utilizado como anteparo de projeção da câmera escura estéreo. Como não possui dispositivo obturador automático, o próprio operador da câmera deve controlar o tempo de exposição do filme à cena capturada. Esse controle pode ser feito por um objeto opaco que obstrua a passagem de luz pelo par de orifícios, a habilidade do operador é importante nesse processo.

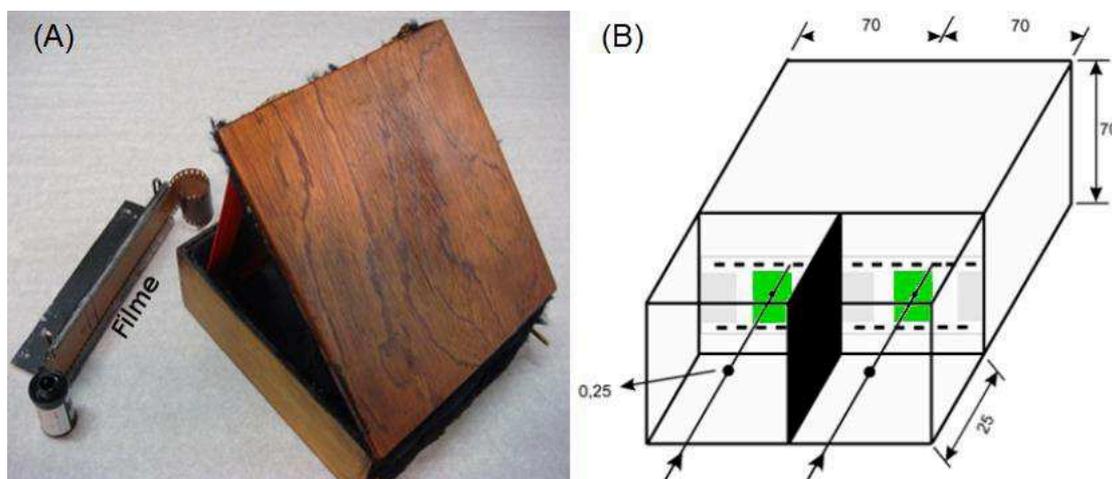


Fig. 10 – A) a câmera escura-estéreo construída com uma caixa de madeira e rolo de filme sobre o qual é projetada a cena. B) Desenho esquemático da câmera escura estéreo construída (dimensões em mm). Os dois quadros que servem de par-estéreo estão destacados em verde. Fonte: próprios autores.

É um ponto central a determinação do tempo durante o qual o filme deve ser exposto. Esse intervalo depende de diferentes fatores: o tipo de filme utilizado, parâmetros internos à câmera e a iluminação no ambiente da cena capturada. Os fatores internos são a distância focal e o diâmetro do orifício, de fato, a razão entre esses parâmetros (Equação 4) determina o chamado *f-number*⁴ da câmera. O tempo de exposição do filme pode ser estimado com o uso de um fotômetro ou com o auxílio da bula do fabricante do filme, independentemente do caso, haverá sempre uma dose de empirismo a ser aplicada.

Devido ao orifício apresentar diâmetro significativamente menor do que a distância focal, a câmera escura normalmente apresenta *f-number* muito alto, tão alto que os fotômetros mais comuns não representam esse valor na sua escala (BALIHAR, 2013). No entanto, considerando que o orifício da câmera escura não varia, pode-se aplicar o seguinte procedimento

⁴ O ajuste da quantidade de luz que deve penetrar na câmera é caracterizado pelo parâmetro *f-number* da câmera, o qual depende da relação entre a distância focal e o diâmetro do orifício da câmera.

para estimar o tempo de exposição. Imagina-se uma configuração com determinado filme, por exemplo, um ISO100, supondo uma câmera escura com f-number igual a 22.

Utiliza-se o fotômetro para esse f-number na cena a ser capturada, determinando o tempo de exposição τ que seria utilizado, caso esta fosse a situação real. Em seguida, divide-se o f-number real da sua câmera escura (determinado pela Equação 4) pelo f-number hipotético igual a 22 e se eleva o resultado ao quadrado, obtendo um fator multiplicativo a ser aplicado sobre o τ medido pelo fotômetro. O resultado dessa última operação determina a estimativa do tempo de exposição para a câmera escura construída.

$$f_{number} = \frac{f}{d} \quad (4)$$

sendo:

f = distância focal (distância entre o orifício e plano-de-imagem);

d = diâmetro do orifício.

No caso, a distância focal é da ordem de 25 mm enquanto o diâmetro do orifício é de aproximadamente 0,25 mm. Dessa forma o f-number correspondente será igual a $25/0,25 = 100$.

Realizando a operação indicada, o fator multiplicativo resultante será $(100/22)^2 \approx 21$, ou seja, de 21 vezes. O par de imagens apresentado na Fig. 11 foi realizado num ambiente em que a medida utilizando o fotômetro foi de 0,5 segundo para f/22, filme ISO 100; o tempo de exposição da câmera escura foi de $21 * 0,5 \approx 10$ segundos (BALIHAR, 2013). Em (BALIHAR, 2013B) se encontra disponível um software de apoio para os cálculos dos parâmetros intrínsecos de construção da câmera escura.

Essa é uma base para os tempos de exposição, e que devem ser ajustados com certo empirismo. Para tempos de exposição muito longos (ordem de minutos), é necessário aumentar esse fator, pois ocorre uma falha na lei de reciprocidade das emulsões fotográficas. A bula do filme apresenta indicações desses acréscimos de tempo (BALIHAR, 2013).

A alternativa, à estimativa proposta anteriormente, consiste em consultar a bula do fabricante do filme e utilizar filmes de longa exposição, realizando ajustes de tempos de exposição a partir de testes de casos na prática. A bula desse tipo de filme apresenta uma tabela para tempos de exposição.

VI. Captura dos pares de imagens

As Fig. 11 e 12 exibem as imagens obtidas com a utilização da câmera escura mostrada na Fig. 10, cujos parâmetros de construção foram descritos nas seções anteriores. A captura das imagens foi realizada num filme de emulsão fotográfico, 35 mm, ISO 100. Por se tratar de uma construção artesanal, os orifícios da câmera não são exatamente iguais, gerando

diferenças na quantidade de luz que atinge o filme, isso fica evidenciado na Fig. 12A, onde a entrada de luz foi mais intensa em uma das imagens.

Para a mesma função de plano-de-imagem também pode ser usado papel fotográfico, lembrando que a sensibilidade do papel fotográfico (à luz) está entre ISO 2 a 10. Outra solução mais cara e complexa seria utilizar recursos sensores de imagem do tipo CCD ou CMOS, de uso comum nas câmeras digitais.



Fig. 11 – Par estéreo de imagens obtidas com a câmera escura. Fonte: próprios autores.

VII. Atividades propostas

A própria construção e utilização da câmera escura já incorporariam diversos tópicos curriculares incluindo o campo da física (óptica e ondas: comportamento da luz, comprimento de onda, espectro eletromagnético, difração, reflexão), a matemática (geometria euclidiana, geometria epipolar, homografia) e a química (a química das emulsões fotográficas envolvem reações fotoquímicas, discussões sobre a revelação do filme e outros processos úmidos) em uma ampla discussão multidisciplinar.

Além disso, a atividade multidisciplinar de construção da câmera poderia ser bastante enriquecida se viesse acompanhada de uma discussão comparativa com as câmeras não artesanais, profissionais ou amadoras encontradas no mercado. Por esta abordagem poderia ser incluída uma análise sobre a utilidade das lentes ópticas, suas diferentes configurações e funções, por exemplo. Outra atividade interessante consiste em utilizar o par-estéreo de imagens para visualização 3D por meio do uso de óculos para a observação de anaglifos, esta opção e seus desdobramentos são discutidos a seguir.

Além disso, a atividade multidisciplinar de construção da câmera poderia ser bastante enriquecida se viesse acompanhada de uma discussão comparativa com as câmeras não artesanais, profissionais ou amadoras encontradas no mercado. Por esta abordagem poderia

ser incluída uma análise sobre a utilidade das lentes ópticas, suas diferentes configurações e funções, por exemplo. Outra atividade interessante consiste em utilizar o par-estéreo de imagens para visualização 3D por meio do uso de óculos para a observação de anaglifos, esta opção e seus desdobramentos são discutidos a seguir.

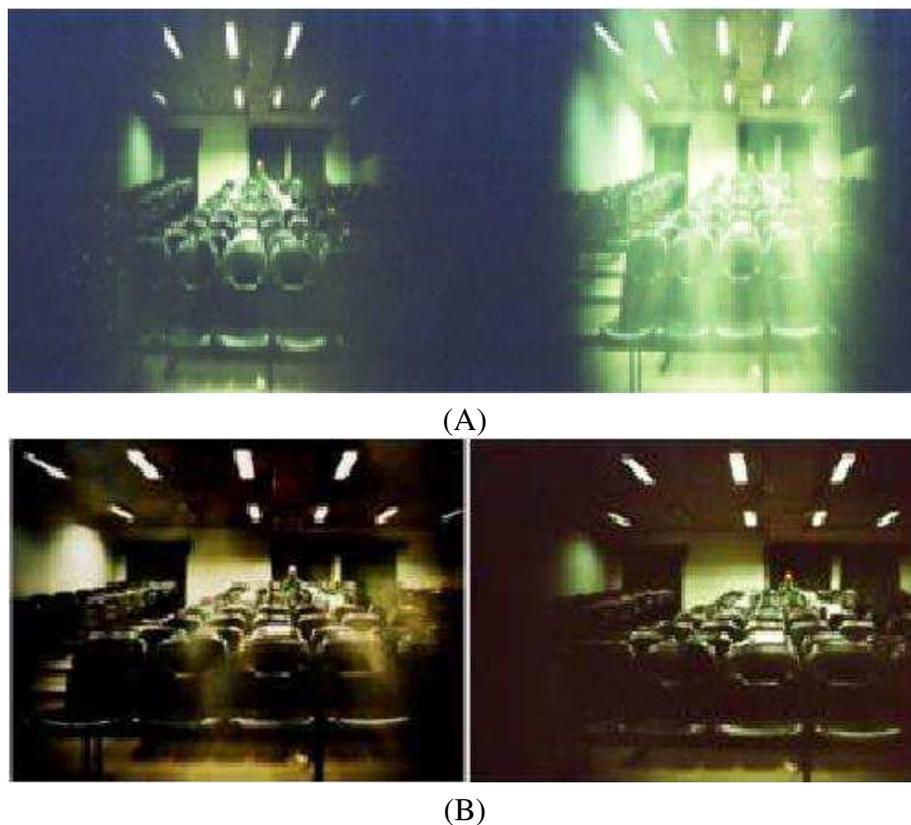


Fig. 12 – A) Par-estéreo, gravado sobre filme 35 mm, sem cortes, digitalizado. Nota-se que a imagem direita do par sofreu maior incidência de luz devido a estar mais próxima à luminária. B) A figura mostra o mesmo par, com cortes e alguns ajustes no brilho das imagens⁵. Fonte: próprios autores.

Visualização com anaglifos

Situadas abaixo dos predadores na cadeia alimentar, uma presa vive constantemente sob o risco de um ataque iminente do seu predador. Uma vez atacada, resta à presa executar uma manobra evasiva. Esse comportamento defensivo-evasivo condiz com o equipamento ocular que a natureza proveu para esses animais. As presas apresentam um sistema visual que maximiza a cobertura visual do ambiente, aumentando as chances de detecção de um ataque e, caso este ocorra, a escolha de uma rota de fuga. Para tanto, a natureza geralmente “instala” os olhos da presa nas laterais da sua cabeça ampliando seu campo visual, essa estratégia evo-

⁵ Ajuste feito por meio de editor de imagem, pode-se utilizar o freeware Irfanview <<http://www.irfanview.com/>> para essa finalidade.

lucionária é dita monocular. A Fig.13 serve de ilustração, onde é exibida a imagem de um coelho e seu campo de visão monocular (A e B), nota-se que este campo é bem mais amplo do que campo monocular do seu predador felino.

Por sua vez, a eficiência do predador está na sua capacidade de realizar ataques bem-sucedidos dispendendo um mínimo de gasto energético, para tanto ele precisa de um sistema visual que permita avaliar muito bem a distância até a presa. Nesse sentido a evolução natural, em geral, deu aos predadores um par de olhos alinhados horizontalmente e localizados no plano frontal da sua face, esse é o sistema binocular. As regiões amarelas na Fig. 13 correspondem ao campo de visão binocular, observa-se que o predador possui um campo de visão binocular expressivamente maior em relação ao campo binocular apresentado pela presa.

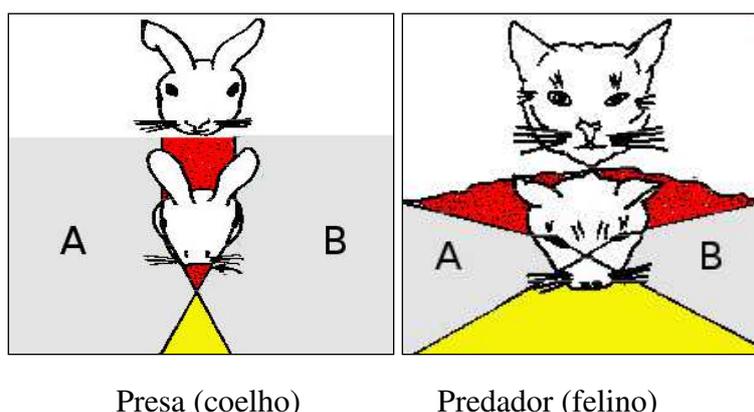


Fig. 13 – Comparativo entre campos de visão de um coelho (presa) e um felino (predador). Em cinza (A e B): visão monocular, amarelo: visão binocular, vermelho: região cega. Fonte: Adaptado respectivamente de commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_and_physiology_of_animals_Panaoramic_monocular_vision.jpg?uselang=pt-br e commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_and_physiology_of_animals_Well_developed_binocular_vision.jpg?uselang=pt-br.

Pelo fato histórico-evolucionário de ser um predador, o ser humano também apresenta uma eficiente visão binocular e dela se prevalece para avaliar distâncias formando uma percepção 3D do mundo. A distância entre os olhos (distância interocular) faz com que a projeção de uma cena sobre a retina do olho esquerdo seja levemente deslocada em relação à projeção da mesma cena sobre a retina do olho direito. Há, portanto, um par de projeções levemente deslocadas uma da outra, resultante da paralaxe.

Comandados pelo cérebro humano, músculos atuam modificando a forma dos olhos, trabalhando principalmente o cristalino e envergando os olhos na tentativa, usualmente bem-sucedida, de fundir o par de imagens formando uma resultante única e bem-focada. Enquanto a imagem resultante corresponde à nossa visão da cena, o envergamento dos olhos permite ao cérebro

bro estimar a distância dos objetos (da cena) em relação ao observador. Quanto mais se envesgar os olhos, mais próximo estará o objeto e vice-versa. A constatação disso pode ser facilmente realizada, basta fechar todos os dedos da mão exceto o polegar, esticar o braço e diminuir suavemente a distância entre o polegar e a face (dobrando o braço) mantendo fixo o olhar no polegar. Nesse processo se nota um gradativo envesgar dos olhos à medida que o polegar se aproxima do rosto do observador.

Em analogia à visão estereográfica descrita anteriormente, o par de imagens formadas nos olhos humanos pode ser simulado por meio de um par-estéreo de fotografias, tal como aquele obtido pela câmera escura. Nesse caso, o problema da percepção 3D estaria na realização da fusão desse par-estéreo, pelo observador. Algumas pessoas conseguem fixar cada olho em uma imagem do par-estéreo e envesgar os olhos ao ponto de vislumbrar a cena 3D, mas se trata de uma habilidade que exige esforço físico e concentração.

Uma alternativa menos desgastante que o envesgamento forçado consiste em criar uma única imagem a partir da fusão das duas imagens I_1 e I_2 do par-estéreo. Nesse processo a imagem I_1 estaria em azul (ou ciano) enquanto I_2 estaria na cor vermelha. Esse arranjo é chamado anaglifo. Caso o observador utilize um óculos anaglifo para visualizar essa imagem-anaglifo ele verá a cena em 3D.

Os óculos anaglifos apresentam uma lente de cor azul (ou ciano) e a outra de cor vermelha e são essenciais para o funcionamento dessa estratégia. Utilizando esses óculos, com alguma prática, cada olho receberá um campo visual diferente (filtrado pela respectiva lente azul ou vermelha) e o cérebro processará naturalmente a formação da visão 3D, apesar de existir apenas uma única imagem-anaglifo.

A fabricação de óculos anaglifos é bastante simples e demanda apenas retalhos de material plástico nas cores azul (ou ciano) e vermelha, bem como uma folha de cartolina. Deve-se recortar a estrutura de cartolina na forma de óculos (Fig. 14A), recortar os materiais plásticos na forma de lentes e fixa-las nas aberturas dos óculos.

Quanto à preparação das imagens de anaglifo, após a revelação das fotos é feita uma digitalização por meio de equipamento comum do tipo *scanner*. De posse dos arquivos digitais, deve-se criar a imagem anaglífica correspondente⁶ e, novamente com o uso dos óculos anaglifos, visualizar o efeito 3D. Na Fig. 14B é exibida a imagem anaglífica resultante das imagens mostradas na Fig. 11.

Cálculo de profundidade

A partir do par-estéreo também é possível a recuperação da distância de objetos na cena, em relação à câmera. Nesse caso se exige uma série de características não necessariamente atendidas pela construção artesanal aqui proposta, essas características incluem planos-

⁶ Existem diversos softwares gratuitos para tal fim, por exemplo, o *Stereo PhotoMaker* disponível em stereo.jp.org/eng/stphmkr/

de-imagem rigorosamente coplanares, eixos ópticos perpendiculares aos respectivos planos-de-imagem e determinação acurada dos respectivos centros das imagens. Todo esse rigor deve ser cumprido para que sejam determinados os sistemas (confiáveis) de coordenadas das imagens.

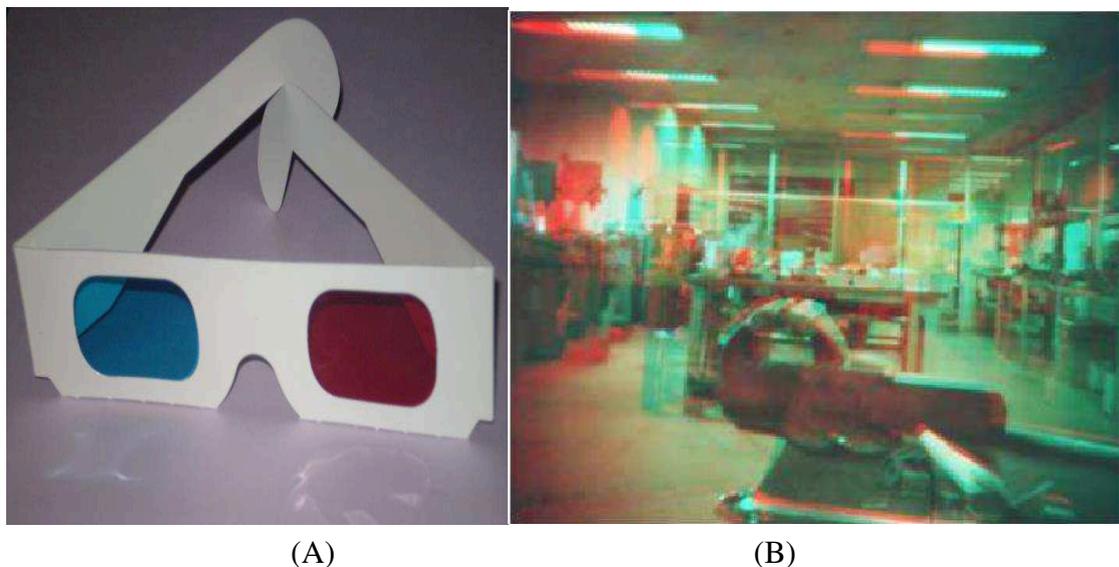


Fig. 14 – A) Óculos anaglifos. Fonte: B) Imagem em anaglifo correspondente ao par exibido na Fig. 11, obtido com o programa (gratuito) Stereo PhotoMaker (<http://stereo.jpn.org/eng/stphmkr/>). Deve ser visualizado com óculos anaglifos, com filtros vermelho/cian. Fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Anaglyph_glasses#/media/File:Anaglyph_glasses.png

Com esses requisitos respeitados, é possível estimar a profundidade (coordenada z) dos pontos na cena utilizando a Equação 5, mediante a medição da disparidade nas imagens (devido à paralaxe). A disparidade é a diferença entre as abscissas (x) das projeções de um mesmo ponto, na imagem esquerda e direita. Na Fig. 15, P_e e P_d são projeções de um mesmo ponto P . É importante que as câmeras estejam perfeitamente alinhadas para a formação de imagens e bem retificadas (com os planos-imagem coplanares, as retas epipolares paralelas). Também é necessário identificar a posição dos centros de imagem das câmeras direita e esquerda. O centro de uma imagem pode ser obtido por vários métodos, entre esses, com os pontos de fuga, de três conjuntos de retas paralelas mutuamente perpendiculares, como mostra o trabalho de Wilson *et al.* (1994), e também de Wang e Tsai (1990), ou, de forma simples, fazer uma estimativa geometricamente.

O cálculo da coordenada Z (profundidade) é realizado por triangulação, como é mostrado em Ayache (1991), bem como no esquema apresentado na Fig. 15, que mostra as relações geométricas retratadas nas equações 5, 6 e 7, abaixo.

$$Z = \frac{\Delta \cdot f}{(x_e - x_d)} \quad (5)$$

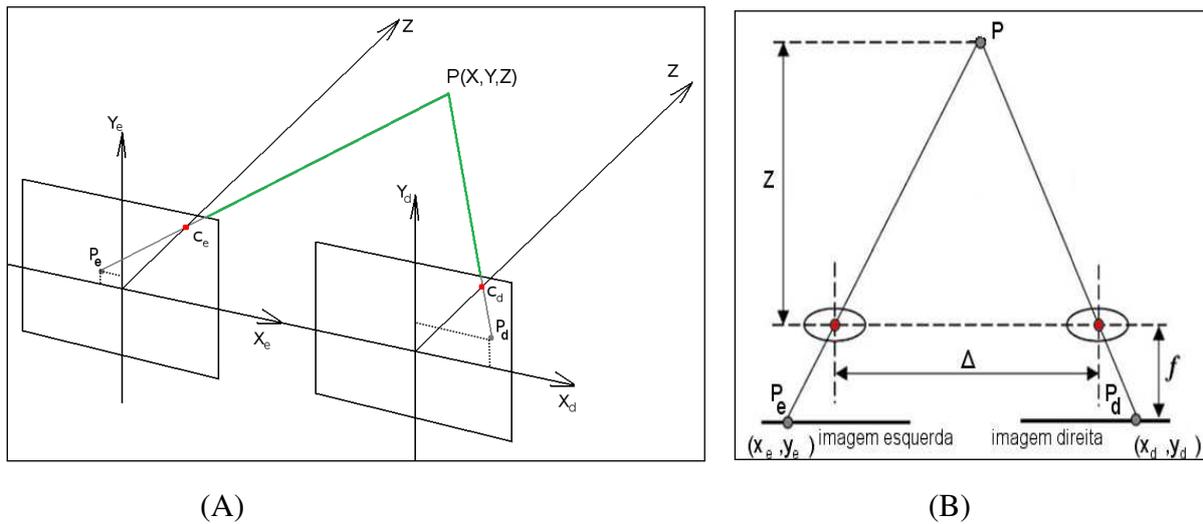


Fig. 15 – Aspectos da formação do par-estéreo nas câmeras esquerda e direita. Essa geometria permite o cálculo da profundidade (Z) de um ponto P , obtida por triangulação, a partir das posições das câmeras e seus centros ópticos. Fontes: A) próprios autores e B) autor desconhecido.

$$X = \frac{\Delta \cdot x_e}{(x_e - x_d)} \quad (6)$$

$$Y = \frac{\Delta \cdot y_e}{(x_e - x_d)} \quad (7)$$

sendo:

Δ : distância de base;

f : distância focal;

(x_e, y_e) : coordenadas na imagem esquerda;

(x_d, y_d) : coordenadas na imagem direita.

VIII. Conclusão

Foi discutido o uso da câmera escura em diferentes contextos históricos, artísticos e tecnológicos, ressaltando-se que a câmera escura pode ser tão simples quanto se deseje ou tão sofisticada quanto possível. Ademais, esse trabalho relatou as especificações para a construção de uma câmera escura estéreo apresentando os fundamentos da óptica associados. Também foram sugeridas atividades curriculares multidisciplinares que poderiam ser desenvolvidas com base na câmera proposta e descritos os princípios físicos básicos associados à câme-

ra. Espera-se estimular o leitor, especialmente os estudantes de primeiro e segundo graus, que eles próprios construam suas câmeras e possivelmente outros artefatos, e tenham iniciativa em relação à ciência experimental, do próprio fazer. A câmera escura estéreo torna-se um bom exemplo, com um custo baixo pode ser aplicada para obtenção de imagens 3D em películas, como mostrado, possibilita realizar visualização 3D com anaglifos. Também pode servir de base para discussões acerca da formação da visão e estimativa de profundidade baseada no paralaxe da visão binocular. Dessa forma, instiga-se os jovens à criatividade e talvez à descoberta de aplicações inusitadas direcionadas à inovação.

Referências

GREPSTAD, J. **Pinhole Photography**: History, Images, Cameras, Formulas, 2015. Disponível em: <<http://home.online.no/~gjon/pinhole.htm>>. Acesso em: mar. 2015.

INSGRÓ, F.; TRUCCO, E.; KAUFF, P.; SCHEER, O. On the visual System of the Nautilus Pompilius. **The Journal of Experimental Biology**, v. 109, p. 253-263, 1984.

WENCZEL, N. Part I - Introducing an Instrument. In: LEFÈVRE, W. **The Optical Camera Obscura II Images and Texts. Inside the Camera Obscura – Optics and Art under the Spell of the Projected Image (Max Planck Institute for the History of Science)**. 2007. p. 13–30. Disponível em: <<http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P333.PDF>>. Acesso em: abr. 2015.

REZENDE, M. Original Creators: Hércules Florence, The Forgotten Father Of Photography, 2011. Disponível em: <<http://thecreatorsproject.vice.com/blog/original-creators-h%C3%A9rcules-florence-the-forgotten-father-of-photography>>. Acesso em: abr. 2015.

LAMBRECHT, R.; WOODHOUSE, C. **Pinhole Photography**: The fascinating world of lensless imaging. Way Beyond Monochrome. Advanced Techniques for Traditional Black & White Photography including digital negatives and hybrid printing. 2. ed. Elsevier. 2011. p. 149-156.

TOLAND, R. Alien Planets to Pose for Giant Pinhole Camera in Space, 2005. Disponível em: <http://www.nasa.gov/vision/universe/newworlds/new_worlds_imager.html>. Acesso em: mar. 2015.

WILSON, R. G.; SHAFER, S. A. What is the center of the image? **Journal Optical Society of America A**, v. 11, n. 11, p. 2946-2955, nov. 1994.

WANG, L. L.; TSAI, W. H. Computing camera parameter using vanishing-line information from a rectangular parallelepiped. **Machine Vision and Applications**, v. 3, p. 129-141, 1990.

AYACHE, N. **Artificial Vision for Mobile Robots**. Cambridge: The MIT Press, 1991. 362 p.

BOUNDLESS. The Rayleigh Criterion. Boundless Physics. Boundless, 03 Jul. 2014. Disponível em: <<https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/wave-optics-26/diffraction-175/the-rayleigh-criterion-640-6036/>>. Acesso em: 14 Apr. 2015.

RUDI, R. R.; WILSON, E. E.; DAVIDSON, M. W. Image Formation in the Microscope, [data desconhecida]. Disponível em: <<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/print/basics/imageformation-print.html>>. Acesso em: mar. 2015.

AIRY, G. B. On the diffraction of an object-glass with circular aperture. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 5, p. 283-291, 1835. Disponível em: <<https://archive.org/details/transactionsofca05camb>>. Acesso em: mar. 2015.

BALIHAR, D. Determining exposure times for Pinhole Cameras, 2013. Disponível em: <http://www.pinhole.cz/en/pinholecameras/exposure_01.html>. Acesso em: mar. 2015.

Anexo A – Identificando as agulhas de máquinas de costura

As agulhas de máquinas de costura são identificadas por meio de dois padrões, o europeu e o americano. As embalagens exibem ambos os padrões, aqui é apresentado o padrão europeu. Nesse caso a identificação da agulha vem na forma de dezenas (60, 65, 70, 75, 80, 90, 100, 110) conforme a Fig.16 mostra na coluna “European Size”. Para conhecer o diâmetro do corpo da agulha no padrão europeu basta aplicar a Equação 8.

$$diâmetro_{\text{corpodaagulha}} = \frac{\text{padrãoEuropeu}}{100} \text{ mm} \quad (8)$$

Como a ponta da agulha apresenta dimensão da ordem de 20% do diâmetro do seu corpo e o orifício da câmera escura normalmente é menor do que o diâmetro do corpo da agulha escolhida, utiliza-se a ponta da agulha para perfurar a câmera. Ocorre que as pontas de agulhas de máquina de costura variam de formato e agudeza, para obter orifícios mais regulares deve-se optar por pontas mais afiadas (sharp) e arredondadas. A Fig. 17 exhibe os desenhos de pontas mais usuais.

American Size	European Size	Needle thickness	Fabric Weight	Fabric examples	
8	60	Very thin ↓ Very Thick	Very thin	Fine tricot or lace, thin linen, silk, organza, chiffon	
9	65			Lightweight	Voile, taffeta, synthetics, silk, batiste
10	70		Medium weight (the most common one)		Cotton, gingham, poplin, percale, pique, satin, velvet, lightweight wool, fine corduroy, suitings, linen, muslin Ball point 14: Single knit, double knit, jersey, tricot
11	75				Heavy weight
12	80		Very very heavyweight		
14	90				
16	100				
18	110				

Fig. 16 – Tabela de diâmetros de corpos de agulhas de máquina.
 Fonte: <<http://lubasewing.com/singer-sewing-needle-chart/>>.

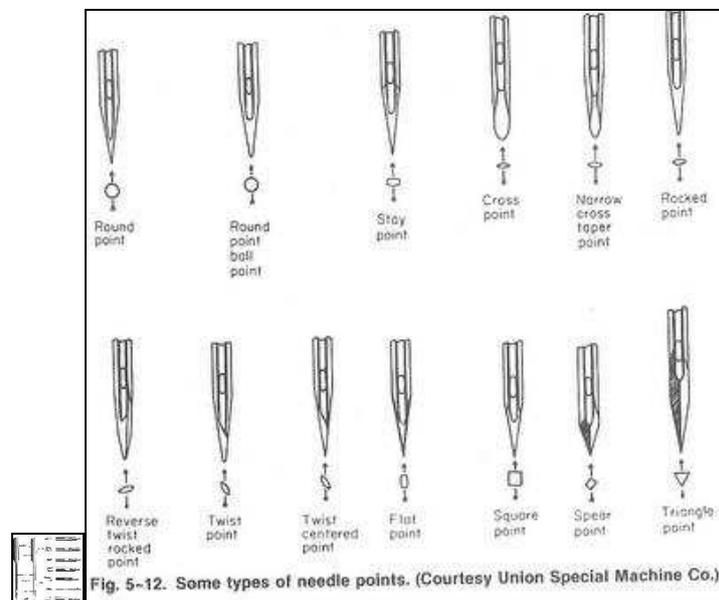


Fig. 6 – Desenhos de pontas e respectivas formas, para agulhas de máquina de costura. Fonte: <<http://lubasewing.com/singer-sewing-needle-chart/>>.