

João Vitor Miranda Roma

Método Computacional para Medição Automática do Diâmetro Limbar

São Luís - MA

2020

João Vitor Miranda Roma

Método Computacional para Medição Automática do Diâmetro Limbar

Monografia apresentada ao curso de Engenharia da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação pela Universidade Federal do Maranhão.

Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Engenharia da Computação

Coordenação de Engenharia da Computação

Orientador: Prof. Dr. João Dallyson Sousa de Almeida

São Luís - MA

2020

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Roma, João Vitor Miranda.

Método Computacional para Medição Automática do
Diâmetro Limbar / João Vitor Miranda Roma. - 2020.
41 f.

Orientador(a): João Dallyson Sousa de Almeida.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia da
Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís -
MA, 2020.

1. Diâmetro Limbar. 2. Raspberry Pi. 3. Transformada
de Hough. I. Almeida, João Dallyson Sousa de. II. Título.

Aos meus pais, meus amigos, meus professores, e aos antigos.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação.”

-Leonardo da Vinci

Resumo

A medida em milímetros do diâmetro do limbo é útil para os médicos oftalmologistas em diversos exames, como os que possibilitam a detecção do glaucoma congênito. Alguns exames precisam que o paciente interaja com o médico, fornecendo informações durante a realização do exame. Os pacientes que não podem colaborar, como crianças de 0 a 3 anos, precisam ser sedados para permitir que o especialista verifique o diâmetro do limbo. Esta medida nem sempre é precisa, pois na prática, é comum a utilização de uma régua próxima ao olho para aferir o diâmetro do limbo. Neste contexto, faz-se oportuno o desenvolvimento de uma solução computacional que evite a utilização de técnicas invasivas nos pacientes, evitando também a necessidade de sedá-los para a realização de tais exames, assim como melhorando a precisão da medida. Neste trabalho, é proposto um método computacional para a detecção automática do limbo em imagens de pacientes e para o cálculo do seu diâmetro em milímetros. Os resultados obtidos através do método desenvolvido são compatíveis com os valores obtidos pelo método manual de medição. O desempenho obtido pela técnica desenvolvida indica que a metodologia proposta tem potencial de aplicação em consultórios oftalmológicos.

Palavras-chave: Diâmetro limbar. Transformada de Hough. Raspberry Pi.

Abstract

The measurement of the limbus diameter in millimeters is useful for ophthalmologists in various tests, such as those that enable the detection of congenital glaucoma. Some exams require the patient to interact with the doctor, providing information during the exam. Patients who cannot collaborate, such as children aged 0-3, need to be sedated to allow the specialist to check the diameter of the limbus. This measurement is not always accurate, because in practice it is common to use a ruler close to the eye to gauge the diameter of the limbus. In this context, it is appropriate to develop a computational solution that avoids the use of invasive techniques in patients, also avoiding the need to sedate them for such examinations, as well as improving the accuracy of the measurement. In this work, a computational method is proposed for the automatic detection of limbus in patient images and for the calculation of its diameter in millimeters. The results obtained by the developed method are compatible with the values obtained by the manual measurement method. The performance obtained by the developed technique indicates that the proposed methodology has potential for application in ophthalmic offices.

Keywords: Limbus Diameter. Hough Transform. Raspberry Pi.

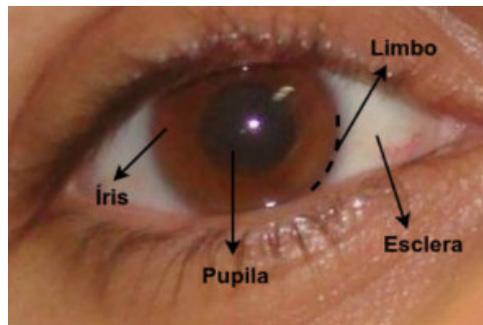
Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa	9
1.2	Trabalhos Relacionados	9
1.3	Objetivos	10
1.3.1	Objetivo Geral	10
1.3.2	Objetivos Específicos	11
1.4	Organização do Trabalho	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Imagem Digital	12
2.1.1	Câmera Digital	12
2.1.2	Histograma	12
2.2	Características de Haar	13
2.3	Suavização de Imagens	15
2.4	Limiarização	16
2.4.1	Limiar de Otsu	16
2.5	Detecção de Bordas	16
2.5.1	Detector de Bordas de Canny	17
2.6	Detector de círculos de Hough	17
2.7	Métricas de Avaliação	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Detecção do limbo	21
3.1.1	Modificações no Detector de Círculos de Hough	23
3.2	Medição do limbo	25
3.3	Dispositivo para detecção de patologias da visão	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Detecção do limbo em uma base de imagens	30
4.2	Medição do limbo em réplicas de olhos	32
4.3	Medição do limbo em pacientes reais	33
5	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIAS	38

1 Introdução

O olho humano é o órgão responsável pela visão humana. Caracterizado pelo formato globular, esse órgão está localizado em uma cavidade óssea na face e suas estruturas podem ser divididas em três camadas: externa, composta pela esclera, córnea e limbo; medial, onde está a íris, pupila, coroide e corpo ciliar; e interna, composta pela retina. A [Figura 1](#) apresenta os principais componentes da camada externa do olho, cujo conhecimento prévio é importante para a compreensão deste trabalho ([SILVA et al., 2019](#)).

Figura 1 – Estrutura externa do olho humano



Fonte: ([SILVA et al., 2019](#))

A medida em milímetros do diâmetro do limbo é útil para os médicos oftalmologistas em certos exames, como os que possibilitam a detecção do glaucoma congênito. Crianças com glaucoma congênito unilateral possuem um olho maior que o outro, e conseqüentemente, possuem um limbo maior que o outro. Crianças com glaucoma congênito bilateral possuem os dois olhos com o tamanho alterado, fora do normal. Assim, é possível detectar a presença ou ausência do glaucoma nesse grupo de pacientes por meio da mensuração do diâmetro limbar.

O Glaucoma é uma designação genérica a um grupo de doenças oculares distintas que provocam danos ao nervo óptico e perda da visão ([INSTITUTE, 2019](#)). O glaucoma congênito é a causa de 16% dos casos de crianças cegas e 15% dos casos de crianças com baixa visão no Brasil ([JUNIOR; OLIVEIRA, 2016](#)). Sendo assim, faz-se necessário o diagnóstico precoce de tal patologia.

No entanto, os exames para detectar o glaucoma geralmente necessitam da colaboração do paciente. Alguns exames exigem um posicionamento correto e estático do corpo e dos olhos durante sua realização, outros exames, precisam que o paciente interaja com o médico, fornecendo algumas informações durante o processo ([FRAZÃO, 2016](#)). Nesse contexto, existem dificuldades em aplicar os métodos usuais em crianças de 0 a 3 anos que não conseguem colaborar da maneira necessária durante os exames ([SILVEIRA et al., 2018](#)).

Na prática médica, os pacientes que não podem colaborar precisam ser sedados para permitir que o especialista verifique o tamanho do limbo. Esta medida nem sempre é precisa, pois o mesmo utiliza uma régua próxima ao olho para aferir o diâmetro limbar, como exibido na [Figura 2](#).

Figura 2 – Medição do limbo em paciente sedado



Fonte: O autor (2020)

1.1 Justificativa

A prática médica atual para a medida do diâmetro do limbo consiste em sedar o paciente e utilizar de técnicas invasivas e nem sempre precisas para o aferir este valor. Neste contexto, faz-se oportuno o desenvolvimento de uma solução computacional que evite a utilização de técnicas invasivas nos pacientes, evitando também a necessidade de sedá-los para a realização de tais exames, assim como melhorando a precisão na aferição da medida, uma vez que métodos computacionais tendem a ser mais precisos do que métodos manuais, pois estes são sensíveis a possíveis falhas humanas do especialista, devido a alta necessidade de coordenação motora e precisão visual na realização do exame.

1.2 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta pesquisas, equipamentos e trabalhos relacionados à localização dos olhos em imagens, detecção automática da íris ou do limbo e processamento de imagens

no *Raspberry Pi*. Tais estudos foram encontrados utilizando conceitos parciais da técnica de revisão sistemática da literatura em conjunto com o portal Google Acadêmico¹.

Lorenzi (2014) implementou um *software* de detecção de estrabismo para dispositivos móveis, utilizando técnicas de processamento de imagem como o classificador em cascata de Haar e a transformada de Hough (HOUGH, 1962), aplicada a detecção de círculos. O classificador em cascata de Haar foi usado para detectar a região da face e dos olhos e a transformada teve como objetivo detectar a região do limbo e do brilho dos olhos.

Cruz et al. (2016) desenvolveram um dispositivo que utiliza um *Raspberry Pi* e que executa o reconhecimento de íris por meio de processamento de imagem. Realiza funções de pré-processamento antes de enviar as imagens à aplicação para contornar as limitações do *Raspberry Pi*. Já Kunik et al. (2017) apresentaram um sistema completo para reconhecimento de íris. O sistema proposto é baseado no computador de placa única *Raspberry Pi 3B*, com ênfase na funcionalidade do processo de reconhecimento como um todo, incluindo aspectos de hardware e software. Uma aquisição de dados por infravermelho permitiu uma segmentação e codificação eficiente da íris. Ambos os trabalhos utilizam a Transformada de Hough para detecção e localização da íris.

Almeida et al. (2015) propuseram um método para detectar estrabismo, utilizando SVM (do inglês: *support vector machine*, ou máquina de vetores de suporte) para detectar os olhos e a transformada de Hough para detectar a região circular do limbo. Silveira et al. (2018) propuseram um dispositivo portátil e de baixo custo baseado em uma placa *Raspberry Pi*, com funcionalidades semelhantes aos dispositivos *Photoscreeners*² disponíveis no mercado. Tem o propósito de incorporar diferentes métodos computacionais para detectar patologias da visão.

Utilizando técnicas semelhantes aos trabalhos citados, este trabalho apresenta um método para medir automaticamente o diâmetro do limbo em milímetros, com ferramentas simples e de baixo custo para tal aferição, problema ainda não abordado na literatura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A detecção do limbo em imagens possui diversas aplicações ligadas à segmentação da íris como região de interesse. Algumas dessas aplicações são: exames como o teste do reflexo vermelho e testes de detecção do estrabismo, rastreamento da posição da íris em vídeos e reconhecimento biométrico com base no padrão visual da íris.

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste estudo é propor um método

¹ <https://scholar.google.com.br/>

² Dispositivos que através da análise de imagens são capazes de detectar patologias da visão.

computacional para aferir automaticamente o diâmetro do limbo em milímetros, com base em fotos de pacientes, utilizando técnicas de processamento de imagens digitais, visando ser utilizado para que os médicos oftalmologistas consigam obter esta medida de forma menos invasiva e também para que possa facilitar a realização de exames onde esta medida seja necessária. A principal contribuição deste trabalho está na proposta de um método automático associada a um hardware de baixo custo aferir automaticamente o diâmetro limbar.

1.3.2 Objetivos Específicos

No sentido de alcançar o objetivo geral pretendido, foram necessários atingir os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e aplicar técnicas de processamento de imagens para a detecção da região dos olhos em imagens faciais e localização do limbo em imagens de olhos;
- Desenvolver um método de cálculo de medidas em milímetros com base em medidas em pixels em imagens;
- Projetar ou adaptar um dispositivo para a captura das imagens e outras informações necessárias para o método;
- Incorporar o método desenvolvido no dispositivo e realizar testes.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos. O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica sobre os conceitos que foram utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, a compreensão deles é importante para se ter um melhor entendimento do método desenvolvido.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta por este trabalho para a detecção do limbo em imagens de pacientes e para o cálculo da sua mensuração em milímetros, também há a descrição do material que foi utilizado neste trabalho para a aplicação do método.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados alcançados por meio da aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3 em uma base de imagens, em um experimento em ambiente controlado e em uma aplicação com pacientes reais, assim como uma análise sobre eles.

Por fim, no Capítulo 5 são expressadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho, em conjunto com uma descrição de possíveis melhorias que podem ser feitas em trabalhos que deem continuidade a este.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Imagem Digital

Uma imagem digital é uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x, y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x, y) é proporcional ao brilho da imagem naquele ponto. Também pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linha e colunas identificam um ponto na imagem. Este ponto é chamado de pixel (GONZALEZ; WOODS, 2009). Em ciência da computação, o processamento digital de imagens é o uso de algoritmos de computador para realizar o processamento em imagens digitais (CHAKRAVORTY, 2018).

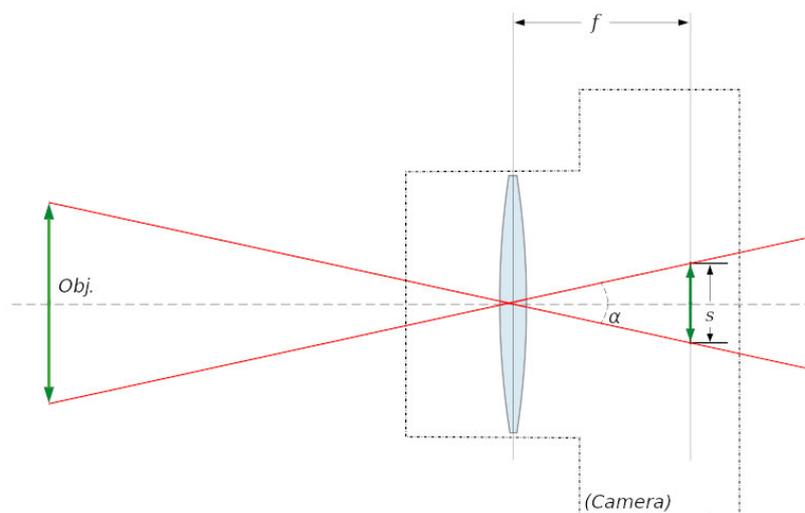
2.1.1 Câmera Digital

Tal como nas câmeras convencionais analógicas, a câmera digital contém uma série de lentes, que conduzem a luz para o local onde a imagem será registrada, mas em vez de expor a um filme fotográfico, utiliza um sensor de imagem, um aparelho semicondutor que converte a luz em elétrons. Ele lê o valor (a carga acumulada) em cada célula da imagem e armazena digitalmente os dados, registrando assim as imagens em arquivos digitais. Na Figura 3 é ilustrado o esquema básico do funcionamento de uma câmera digital, onde a luz captada é conduzida pela lente até o sensor digital no interior da câmera. As dimensões do sensor, assim como a sua concentração de receptores, determinam as dimensões e a qualidade final da imagem. O tipo de lente e a distância entre ela e o sensor, chamada de distância focal (f), determinam o ângulo do campo de visão da câmera α .

2.1.2 Histograma

A representação gráfica da distribuição dos valores de tonalidade dos pixels em uma imagem digital é chamada de histograma da imagem. Ele mostra o número de pixels para cada valor de tom, ou seja, o eixo horizontal do gráfico representa a variação de tons, enquanto o eixo vertical representa o número total de pixels nesse tom específico, em outras palavras, o lado esquerdo do eixo horizontal representa as regiões mais escuras da imagem e o lado direito representa as regiões mais claras, o eixo vertical representa o número total de pixels (tamanho da área) localizada em cada uma dessas regiões.

Figura 3 – Esquema básico do funcionamento de uma câmera digital



Fonte: (WIKIPEDIA, 2019a)

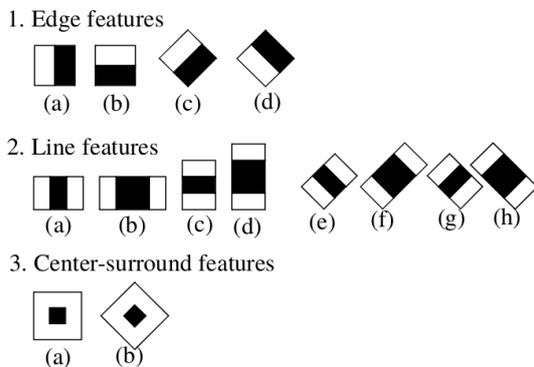
2.2 Características de Haar

Viola, Jones et al. (2001) propuseram uma abordagem de aprendizagem de máquina para detecção de objetos visuais em imagens. Nos estágios iniciais do algoritmo, são utilizadas características chamadas de *Haar-like features*, descritas previamente no trabalho de (PAPAGEORGIOU; OREN; POGGIO, 1998), que possuem esse nome pois são baseadas na Transformada de Haar (HAAR, 1911).

Uma *Haar-like feature* simples pode ser definida como a diferença entre os somatórios dos valores dos pixels nas áreas dentro de retângulos na imagem. Estes retângulos podem ter qualquer tamanho e estarem em qualquer posição dentro da imagem. Podem ser utilizados conjuntos de dois, três ou quatro retângulos. Os valores encontrados indicam certas características de uma área específica da imagem. Cada tipo de característica pode indicar a existência (ou ausência) de algo na imagem, como bordas ou mudanças na textura. Um conjunto de dois retângulos pode detectar uma borda entre uma região escura e uma região clara na imagem, por exemplo. O detector de objetos foi aperfeiçoado por Lienhart e Maydt (2002), adicionando a detecção de *Haar-like features* rotacionadas em 45° (Figura 4), melhorando a detecção das características.

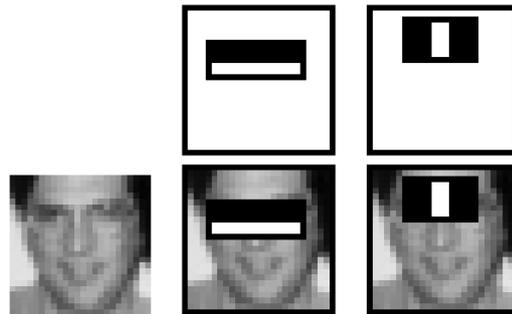
Para a tarefa de detecção de faces, a primeira característica selecionada se concentra na região dos olhos, que muitas das vezes é mais escura do que a região do nariz e bochechas (Figura 5). A segunda característica selecionada se baseia no fato dos olhos serem mais escuros do que o nariz. A primeira característica mede a diferença de intensidade entre a região dos olhos e a região superior das bochechas. A segunda característica compara as intensidades nas regiões dos olhos com a intensidade no nariz (VIOLA; JONES et al., 2001).

Figura 4 – Features utilizadas na detecção de formas



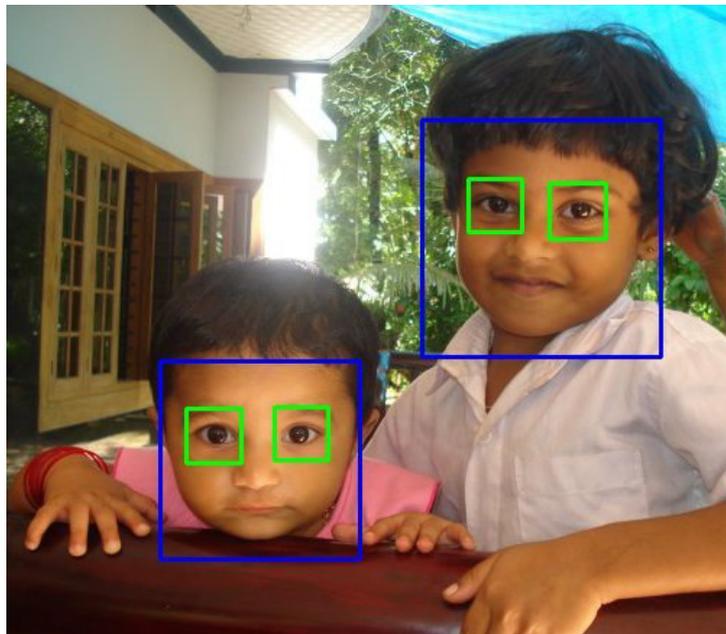
Fonte: (LIENHART; MAYDT, 2002)

Figura 5 – Comparações de intensidade de brilho entre regiões



Fonte: (VIOLA; JONES et al., 2001)

Figura 6 – Resultado da aplicação do Detector de Características de Haar



Fonte: (OPENCV, 2019a)

O OpenCV¹ contém classificadores pré-treinados para rosto, olhos, sorrisos, etc., no formato de arquivos XML (*Extensible Markup Language*). Neste trabalho, o detector de características de Haar implementado no OpenCV foi utilizado para detectar as regiões dos olhos nas imagens dos pacientes. Um exemplo de resultado da aplicação do detector em uma imagem de teste pode ser visto na Figura 6, onde foram utilizados classificadores de rosto e de olhos.

¹ <https://opencv.org/>

2.3 Suavização de Imagens

Vários filtros utilizados em processamento de sinais, como filtros passa-alta, passa-baixa, etc., podem ser aplicados à imagens. Filtros passa-baixa ajudam a remover ruídos da imagem, desfocá-la, enquanto filtros passa-alta ajudam a encontrar bordas nas imagens. O desfoque (suavização) da imagem é obtido pela convolução da imagem com um *kernel* de filtro passa-baixa (OPENCV, 2019c).

A saída de um filtro espacial linear de suavização é simplesmente a média dos pixels contidos na vizinhança da máscara do filtro. Esses filtros são chamados de filtros de média. Os filtros de suavização substituem o valor de cada pixel em uma imagem pela média dos níveis de cinza na vizinhança definida pela máscara de filtro. Esse processo resulta em uma imagem com as transições suavizadas. Como o ruído aleatório consiste tipicamente em transições bruscas nos níveis de cinza, a aplicação mais óbvia de suavização é a redução de ruído (GONZALEZ; WOODS, 2009).

O procedimento consiste em percorrer uma matriz de convolução sobre a imagem. Acima de cada pixel, no exemplo de uma matriz 5×5 , são adicionados todos os 25 pixels abaixo desta matriz, é calculado sua média e é substituído o valor do pixel central pelo novo valor médio. A operação é repetida para todos os pixels na imagem (OPENCV, 2019c).

$$K = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Neste trabalho, o filtro da média implementado no OpenCV é utilizado visando a redução do ruído como parte do tratamento realizado nas imagens processadas. O resultado do procedimento pode ser entendido observando a Figura 7, onde a aplicação da função em uma imagem de teste (lado esquerdo) resulta na imagem suavizada (lado direito).

Figura 7 – Imagem Suavizada



Fonte: (OPENCV, 2019c)

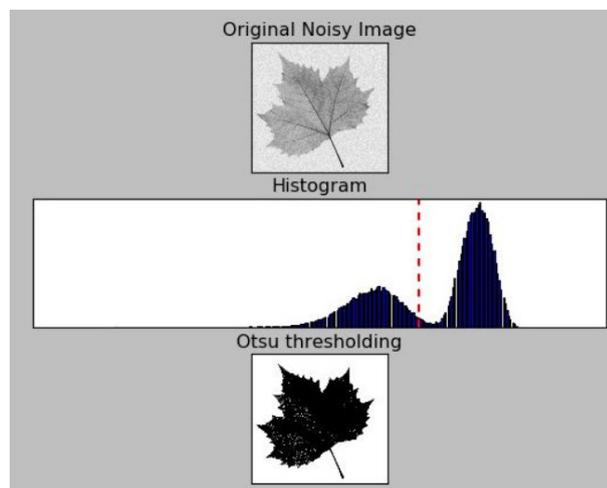
2.4 Limiarização

Limiarização (*threshold*) é a técnica mais simples de segmentação de imagem. A partir de uma imagem em escala de cinza, o limite pode ser usado para criar imagens binárias (SHAPIRO; LINDA, 2002). O método de limiarização mais simples substitui cada pixel em uma imagem por um pixel preto, se a intensidade da imagem na posição $I_{i,j}$ for menor que alguma constante fixa T (*threshold*), ou seja, se $I_{i,j} < T$, ou por um pixel branco, se a intensidade da imagem for maior que essa constante.

2.4.1 Limiar de Otsu

O método de Otsu (OTSU, 1979) é usado para encontrar automaticamente um valor para o limiar (*threshold*). O algoritmo assume que a imagem contém duas classes de pixels, seguindo o histograma bimodal (pixels de primeiro plano e pixels de fundo), então tenta encontrar um valor que minimize a variância ponderada entre as classes. Ou seja, ele encontra um valor de t que fica entre os dois picos das classes no histograma, de modo que as variações para ambas as classes são mínimas. A aplicação pode ser melhor compreendida observando a Figura 8. Neste trabalho, o Limiar de Otsu implementado no OpenCV será aplicado para segmentar de forma otimizada as regiões da íris e da esclera nas imagens de olhos.

Figura 8 – Exemplo da utilização do Limiar de Otsu



Fonte: O autor (2020)

2.5 Detecção de Bordas

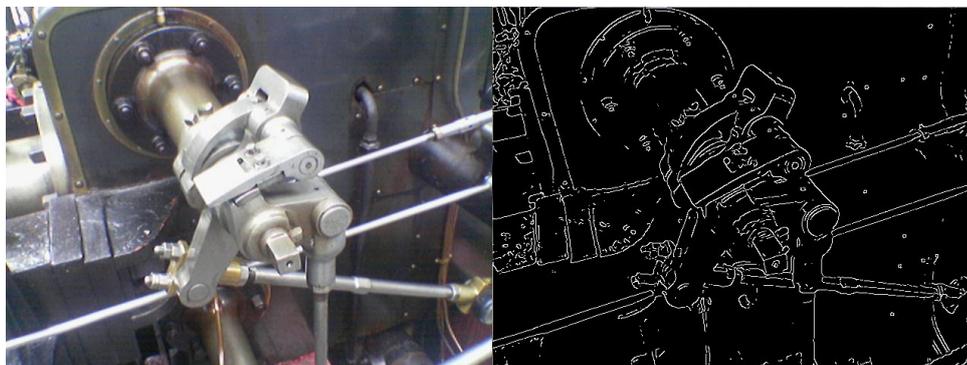
Os pontos nos quais o brilho de uma imagem muda drasticamente, acentuadamente ou tem descontinuidades, são tipicamente organizados em um conjunto de segmentos de linhas curvas chamados de bordas. A detecção de bordas inclui uma variedade de métodos

matemáticos que visam identificar tais mudanças. É uma ferramenta fundamental no processamento de imagens, visão de máquina e visão computacional, particularmente nas áreas de detecção e extração de características (UMBAUGH, 2010).

2.5.1 Detector de Bordas de Canny

Dentre as técnicas de detecção de bordas, o detector de bordas de Canny é um algoritmo de detecção de borda desenvolvido por Canny (1986), baseado no Filtro de Sobel (SOBEL; FELDMAN, 1968). Basicamente utiliza dois limites diferentes no Filtro de Sobel, um baixo e um alto, o limite mais baixo permite passar mais bordas, portanto, mais bordas do que o necessário são detectadas. Ao passar a imagem por um segundo limiar maior, apenas as arestas que pertencem aos contornos mais importantes são detectadas. O algoritmo de Canny combina esses dois mapas de borda para produzir contornos "ótimos". Ele opera mantendo apenas os pontos das bordas do limite baixo, para o qual existe um caminho contínuo de bordas, vinculando esses pontos a uma borda pertencente ao limite alto (LAGANIÈRE, 2014). O OpenCV possui uma função que executa o algoritmo de Canny. O resultado da aplicação do detector de bordas de Canny é exibido na Figura 9. Neste trabalho, o detector de bordas de Canny implementado no OpenCV será utilizado para encontrar os contornos que compõem os olhos nas imagens processadas, em busca de realçar a região do limbo.

Figura 9 – Resultado da aplicação do detector de bordas de Canny



Fonte: (WIKIPEDIA, 2019b)

2.6 Detector de círculos de Hough

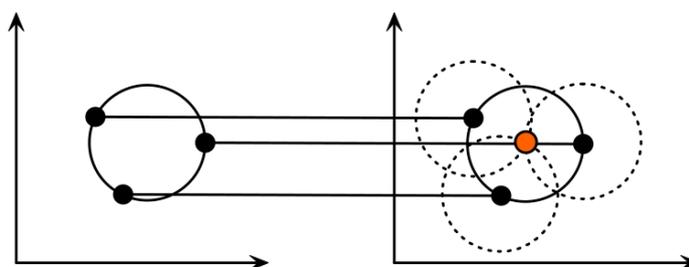
A detecção de objetos circulares é uma tarefa de extração de características fundamentais no reconhecimento de padrões, que foi continuamente desenvolvida para obter melhor desempenho e precisão computacional. Diversas aplicações dentro dos campos de; visão computacional, física e biologia, dependem da detecção de padrões circulares, por exemplo, detecção de íris, contagem de células, identificação de formas de células e rastreamento de partículas (ZHANG; WIKLUND; ANDERSSON, 2015).

A transformada de Hough (HOUGH, 1962) foi elaborada para detectar características analiticamente representáveis em imagens, como linhas, círculos e elipses. Para realizar uma análise baseada em conteúdo de uma imagem, é necessário extrair recursos significativos da coleção de pixels que constituem a imagem. Contornos, linhas, regiões e assim por diante são elementos de imagem fundamentais que definem o conteúdo de uma imagem (LAGANIÈRE, 2014). A transformada é aplicada após a detecção das bordas, por exemplo, pelo detector de bordas de Canny (LORENZI, 2014). A equação paramétrica, usada pela transformada de Hough para detecção de círculos é apresentada a seguir.

$$x = a + r \cdot \cos(\theta)$$
$$y = b + r \cdot \sin(\theta)$$

A equação paramétrica do círculo possui três parâmetros, a e b representando o centro do círculo e r representando o raio. Quando o ângulo θ passar por todos os 360 graus, os pontos (x, y) traçam o perímetro de um círculo. O trabalho da transformada de Hough é desenhar o perímetro de um círculo para cada ponto de borda encontrado, no espaço de Hough, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Esquematisação do funcionamento da transformada de Hough



Fonte: (RHODY, 2005)

Na Figura 10, cada ponto de borda no espaço geométrico (lado esquerdo) gera o traço de um círculo no espaço de Hough (lado direito). Os traços de círculos gerados no espaço de Hough tem um ponto de intersecção que representam a coordenada (a, b) , que por sua vez, representa o centro de um círculo na imagem original, com raio igual ao dos círculos traçados no espaço de Hough (LORENZI, 2014). O resultado de executar o algoritmo em uma imagem de teste é mostrado na Figura 11. Neste trabalho, todo o processo do detector de círculos de Hough será implementado na linguagem de programação Python, incluindo a manipulação da imagem, a transformada de Hough para círculos, a localização dos pontos de acumulação no espaço de Hough e a demarcação dos círculos encontrados na imagem. Optou-se por implementar o detector em vez de utilizar uma função já implementada para que modificações em seu funcionamento pudessem ser realizadas. As modificações são descritas na subseção 3.1.1.

Figura 11 – Resultado da aplicação do Detector de Círculos de Hough



Fonte: (OPENCV, 2019b)

2.7 Métricas de Avaliação

Na análise estatística de conjuntos binários, algumas métricas são utilizadas para avaliar um classificador. Em particular, tratando-se de segmentação de imagens, é possível utilizar tais métricas para medir o desempenho de um algoritmo de segmentação, utilizando-as para comparar a segmentação encontrada pelo algoritmo e uma imagem de referência que indique a segmentação correta que está se tentando alcançar.

Classificando as duas classes dos conjuntos binários como positivos e negativos, no contexto da segmentação de imagens, um pixel que está na região que se quer segmentar pode ser classificado como parte dos positivos, e um pixel que está fora desta região é classificado como parte dos negativos.

Na imagem resultante do método de segmentação que está sendo avaliado, um pixel classificado como negativo, é classificado como um verdadeiro negativo (VN) caso, na imagem de referência, o pixel na mesma posição seja classificado como negativo, e é classificado como um falso negativo (FN) caso, na imagem de referência, conste que o pixel naquela posição seja classificado como positivo.

Analogamente, se um pixel da imagem resultante foi classificado como positivo pelo algoritmo de segmentação, é classificado como um verdadeiro positivo (VP) caso, na imagem de referência, o pixel nesta mesma posição seja classificado como positivo, e é classificado como um falso positivo (FP) caso, na imagem de referência, o pixel naquela posição seja classificado como negativo.

As métricas comumente utilizadas para validar resultados de classificação são: a Sensibilidade (S), a Especificidade (E), a Precisão (P) e a Acurácia (A). A Sensibilidade corresponde à proporção de itens do conjunto classificados corretamente como positivos (verdadeiros positivos) em relação aos itens de fato positivos (verdadeiros positivos e falsos negativos).

$$S = \frac{VP}{VP + FN}$$

A Especificidade trata-se do análogo da sensibilidade, corresponde à proporção de itens classificados corretamente como negativos (verdadeiros negativos) para os todos os itens classificados como negativos (verdadeiros negativos e falsos positivos).

$$E = \frac{VN}{VN + FP}$$

A Precisão fornece a proporção de itens corretamente classificados como positivos (verdadeiros positivos) em relação a todos os itens classificados como positivos (verdadeiros positivos e falsos positivos).

$$P = \frac{VP}{VP + FP}$$

A Acurácia corresponde à taxa total de acerto do classificador, ou seja, qual a porcentagem de itens corretamente classificados (verdadeiros positivos e verdadeiros negativos) em relação ao total de itens.

$$A = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN}$$

O Coeficiente de Dice é uma estatística utilizada para medir a similaridade entre dois conjuntos. Pode ser descrito por:

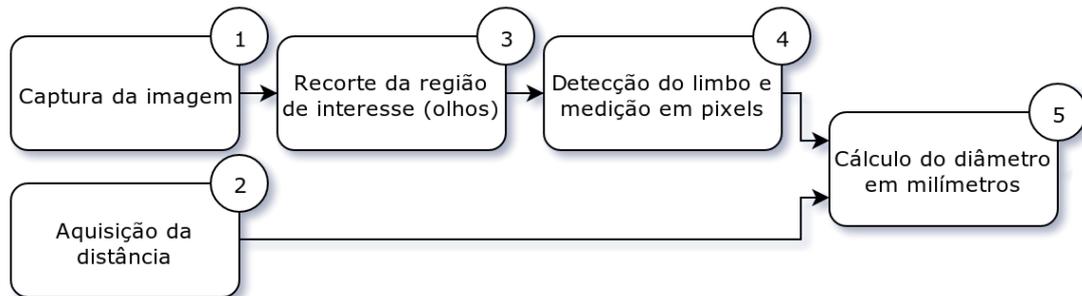
$$DSC = \frac{2VP}{2VP + FP + FN}$$

As métricas descritas são empregadas para avaliação do método de detecção do limbo proposto neste trabalho, utilizando como referência, uma base de imagens faciais onde a localização e tamanho dos limbos foram marcadas manualmente por um especialista. Os resultados foram comparados com as métricas de desempenho de outros detectores de círculos aplicados à mesma base de imagens.

3 Metodologia

O método proposto para a medição automática do diâmetro do limbo em imagens de pacientes consiste nas etapas apresentadas na [Figura 12](#) e descritas a seguir.

Figura 12 – Etapas do método proposto



Fonte: O autor (2020)

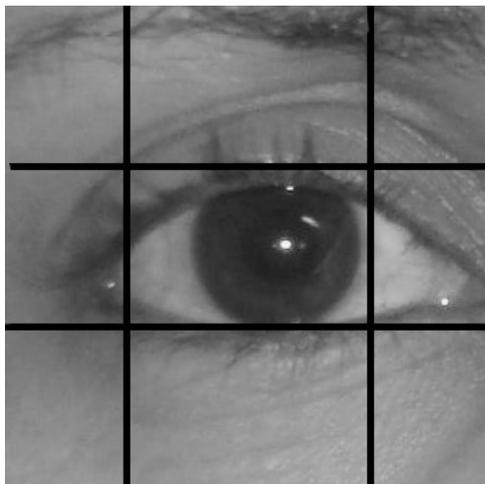
Na 1ª etapa é realizada a captura da imagem do paciente e, em paralelo, é executada a 2ª etapa, onde a distância entre a câmera e o rosto do paciente no momento da fotografia é aferida, isto é feito utilizando um sensor de distância acoplado à câmera, acionando-o no momento da fotografia, o valor registrado deve ser armazenado para uso posterior. Tal medida também pode ser feita utilizando uma estrutura onde a câmera e o rosto do paciente fiquem em posições estáticas e a distância entre eles possa ser medida. Esta medida será necessária para calcular o diâmetro do limbo em milímetros, a sua utilização é explicada em detalhes na [seção 3.2](#).

3.1 Detecção do limbo

Anteriormente à detecção do limbo, realiza-se a 3ª etapa, o recorte da região dos olhos na foto facial. Para esta fase, foi utilizado o algoritmo de [Viola, Jones et al. \(2001\)](#) ([seção 2.2](#)) para a detecção de características semelhantes a olhos na imagem. Procuram-se as regiões de cada olho na imagem levando em consideração algumas restrições de tamanho em relação às dimensões da imagem para evitar falsos positivos, por exemplo, cada uma das duas regiões detectadas deve ocupar no máximo metade e no mínimo um décimo do comprimento da imagem, como a imagem de entrada do método é facial, caso a região retornada pelo algoritmo como possível olho seja maior ou menor do que o intervalo supracitado, certamente trata-se de uma má detecção. Após encontradas, as regiões de interesse, são recortadas da imagem inicial em duas novas imagens que serão processadas no restante do método.

Para a detecção do limbo, a 4ª etapa, cada uma das duas imagens dos olhos é recortada novamente para que o foco seja apenas na esclera e na íris. Aqui, busca-se recortar a imagem o menor possível para que apenas a esclera e íris sejam exibidas, com a presença do mínimo de pele na imagem, pois o tom de cinza referente à pele na imagem interfere Limiar de Otsu, que utiliza os tons de cinza mais claro presente na esclera e o mais escuro presente na íris no cálculo do valor otimizado de *threshold*. Mas ao mesmo tempo, o recorte deve ser grande o suficiente para que a íris esteja completamente inserida nele para que, na imagem resultante, as bordas do limbo sejam completamente detectadas. A forma de corte utilizada foi de dividir a imagem em três partes iguais na horizontal e em quatro partes iguais na vertical, e então a região buscada é a compreendida entre o segundo terço da divisão horizontal e os segundo e terceiro quartos da divisão vertical. A técnica é ilustrada pela [Figura 13](#).

Figura 13 – Recorte da imagem dos olhos

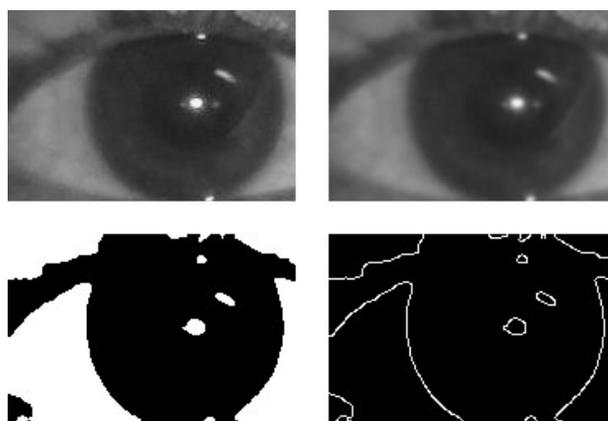


Fonte: O autor (2020)

A extração das bordas da imagem é objetivada para que seja executado o detector de círculos sobre a imagem resultante. No entanto, se apenas for aplicado o detector de bordas, a imagem resultante possuirá bordas provenientes de ruídos na imagem que reduzem a eficiência do detector de círculos. Portanto, para melhores resultados, é realizado um tratamento na imagem antes da extração das bordas. Os passos são ilustrados pela [Figura 14](#). Após o recorte, cada imagem passa primeiramente por um processo de redução de ruído, por meio da suavização ([seção 2.3](#)) utilizando o filtro da média do OpenCV com os parâmetros informando o uso de uma máscara de 5x5. Como normalmente a região da íris é mais escura e a região da esclera é mais clara, e o limbo que pretende-se detectar é a fronteira entre essas duas regiões, o seu contorno será aguçado ao segmentarmos a imagem com base nessa mudança de tons, por isso, em seguida é aplicado o limiar de Otsu ([subseção 2.4.1](#)), que com base nos dois tons predominantes no histograma da imagem, encontra um valor de *threshold* otimizado para segmentar as regiões ([Figura 15](#)).

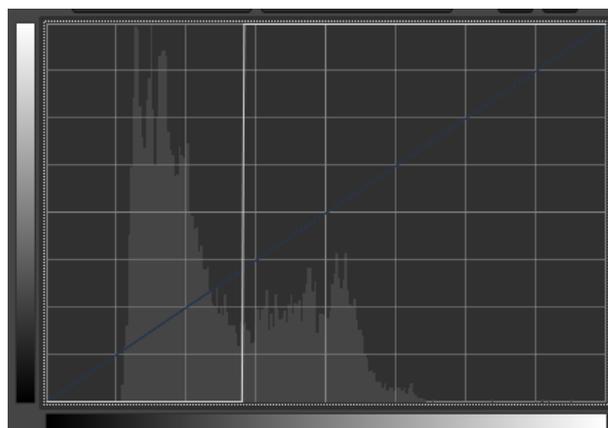
Uma vez encontrada a imagem binarizada de cada olho, por fim é executado o detector de bordas de Canny (subseção 2.5.1) na imagem, encontrando as fronteiras entre as regiões preta e o branca da imagem. Foi utilizada a função implementada no OpenCV com os parâmetros proporcionais ao valor de *threshold t* encontrado pelo Limiar de Otsu, buscando uma extração bastante justa dos contornos, os valores de limite inferior e superior do detector de Canny foram respectivamente $0,99t$ e $1,01t$. Como o contorno do limbo havia sido realçado pelo limiar, ao serem extraídas as bordas da imagem binarizada, o contorno do limbo estará entre as bordas encontradas.

Figura 14 – Etapas do tratamento da imagem para a detecção do limbo



Fonte: O autor (2020)

Figura 15 – Aplicação do Limiar de Otsu no histograma



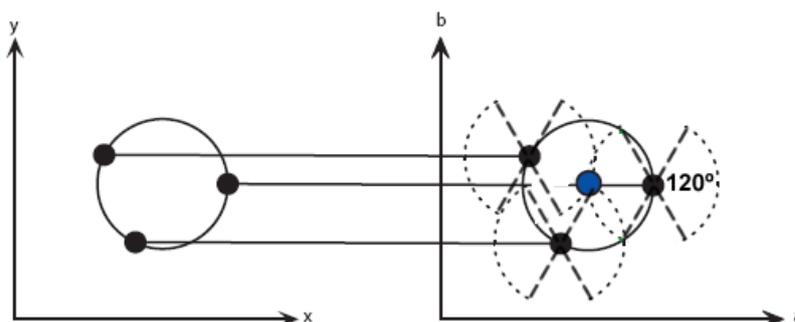
Fonte: O autor (2020)

3.1.1 Modificações no Detector de Círculos de Hough

No caso específico da detecção de círculos em uma imagem composta de bordas provenientes dos contornos de uma imagem de olho, onde se busca encontrar o círculo correspondente ao limbo, podem ocorrer detecções incorretas devido ao fato de que outras regiões do olho também possuem formas circulares e estarem presentes na imagem das bordas, como as pálpebras.

Desta forma, é conveniente implementar uma modificação no algoritmo de detecção de círculos de Hough, de modo que, ao percorrer os pontos da borda no espaço geométrico, gere no espaço de Hough apenas os pontos no contorno de um círculo dentro de um determinado intervalo de ângulos desejado, como exemplificado na [Figura 16](#), onde apenas pontos que correspondem a uma abertura lateral de 120° no círculo são levados em consideração ao se gerar o acumulador.

Figura 16 – Modificação no Detector de Círculos de Hough



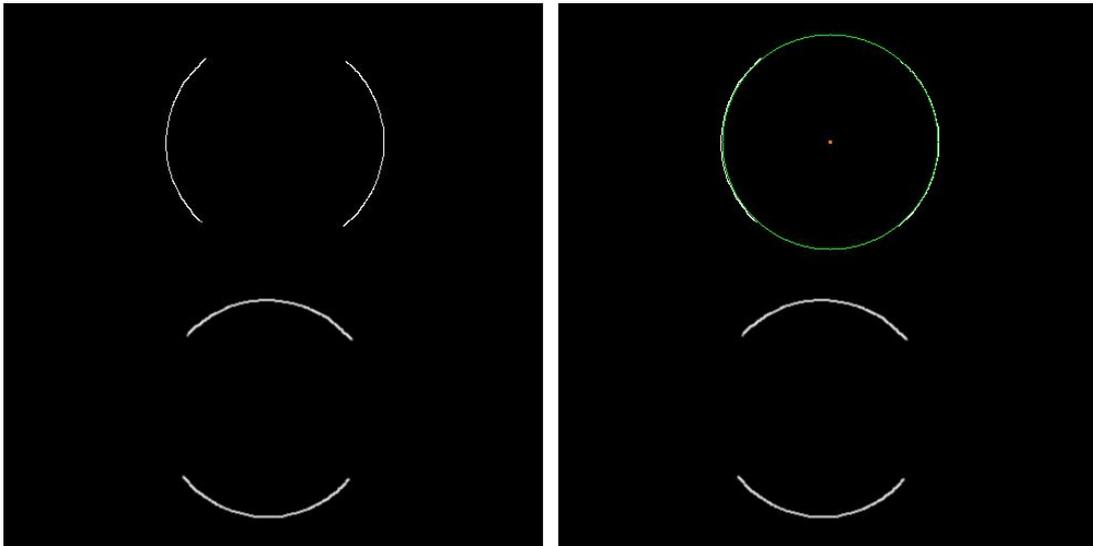
Fonte: (ALMEIDA et al., 2015)

Deste modo, quando um ponto de acumulação no espaço de Hough é encontrado, ele representa a coordenada de um centro de círculo na imagem original, porém, apenas os pontos do círculo dentro do intervalo de ângulos desejado foram levados em consideração no acumulador. Em outras palavras, se uma forma circular na imagem tiver, em sua maioria, pontos dentro do intervalo desejado, ela será detectada pelo algoritmo e se ela tiver, em sua maioria, pontos fora do intervalo desejado, ela não será detectada.

Na [Figura 17](#) o funcionamento da modificação é demonstrado de forma simples. Duas formas circulares de teste foram desenhadas, uma com pontos em sua maioria dentro do intervalo de ângulos desejado, compreendendo as laterais do círculo, e outra com pontos em sua maioria fora do intervalo desejado, e como esperado, apenas a primeira forma foi detectada como círculo.

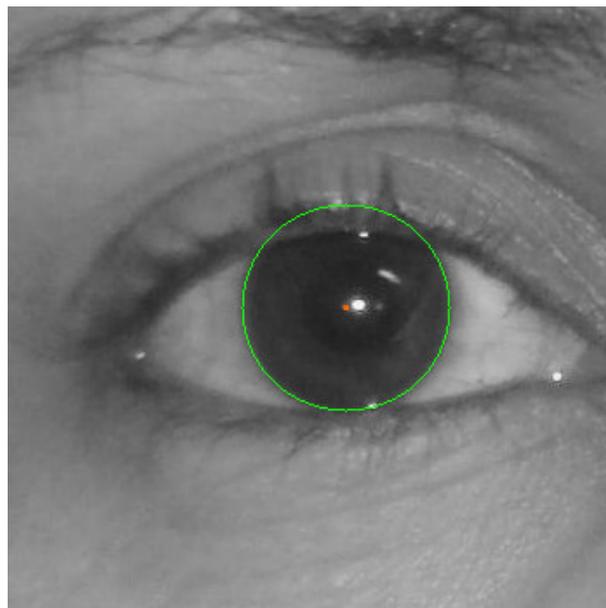
Na imagem das bordas, é aplicado o detector de círculos de Hough modificado, utilizando o intervalo de raios de um quarto a um oitavo da largura da imagem da região do olho, e os pontos nos intervalos de 135° a 225° , e de 315° a 45° , correspondendo a uma abertura de 90° de cada lado do círculo, valores advindos da simples divisão do círculo em quatro setores iguais e selecionando-se os dois setores laterais. Ao encontrar na imagem das bordas o círculo que sobrepõe o limbo, armazena-se o seu diâmetro em pixels. A [Figura 18](#) demonstra uma detecção do limbo realizada seguindo os passos descritos.

Figura 17 – Aplicação da modificação no Detector de Círculos de Hough



Fonte: O autor (2020)

Figura 18 – Limbo detectado



Fonte: O autor (2020)

3.2 Medição do limbo

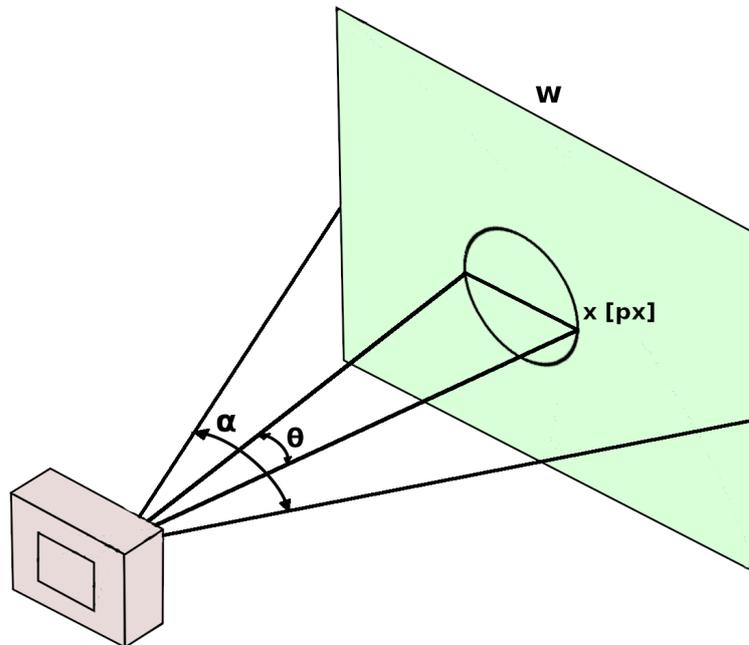
O tamanho de um objeto em pixels em uma imagem não tem relação direta com seu tamanho real, uma vez que, de acordo com variações de características entre diferentes câmeras, como resolução, distância focal, etc., ou até mesmo com a variação da distância entre a câmera e o objeto fotografado, objetos de um determinado tamanho podem ter diferentes medidas em pixels em diferentes imagens. Para que a medida do limbo seja armazenada e reportada na unidade de milímetros, como é objetivo deste trabalho, faz-se necessária uma conversão do diâmetro entre pixels e milímetros (5^a etapa).

O ângulo do campo de visão de uma câmera pode ser encontrado diretamente em sua documentação, nos metadados das imagens tiradas por ela ou pode ser calculado com base em informações presentes nestes utilizando a [Equação 3.1](#), onde α representa o ângulo do campo de visão, f representa a distância focal, que é a distância entre a lente e o sensor digital e s representa a dimensão do sensor, na direção horizontal, vertical ou diagonal, dependendo da direção do ângulo que se busca determinar.

$$\tan(\alpha/2) = \frac{s/2}{f} \Rightarrow \alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{s/2}{f}\right) \quad (3.1)$$

Na [Figura 19](#), o ângulo θ representa a fração do ângulo do campo de visão da câmera (α) que compreende o tamanho do que está sendo medido. É possível descobrir o ângulo θ por meio de uma regra de três simples, descrita na [Equação 3.2](#), utilizando o diâmetro do limbo em pixels (x), a resolução da câmera utilizada em pixels (w) na direção horizontal, vertical ou horizontal, dependendo da direção em que se está sendo feita a medição e o ângulo do campo de visão da câmera (α), em graus, encontrado pela [Equação 3.1](#). A medida x também pode representar a distância em pixels entre os olhos na imagem, mais especificamente, a distância entre os centros dos círculos detectados que equivalem ao limbo de cada olho.

Figura 19 – Fração do ângulo de visão da câmera que compreende o objeto medido



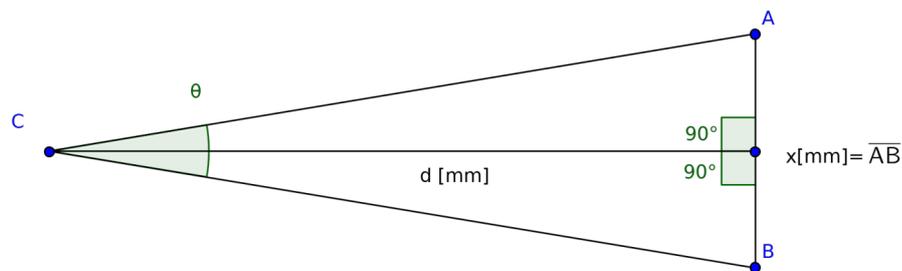
Fonte: Adaptado de ([WIKIPEDIA, 2019a](#))

$$\frac{\theta}{d} = \frac{\alpha}{w} \Rightarrow \theta = d \cdot \frac{\alpha}{w} \quad (3.2)$$

A técnica de conversão proposta necessita que no momento da captura da imagem, também se capture a distância entre a câmera e o rosto do paciente utilizando um sensor de distância acoplado a câmera, por exemplo. Com base nesta medida e no tamanho do limbo em pixels na imagem, o tamanho em milímetros pode ser calculado por meio de técnicas de trigonometria descritas na [Equação 3.3](#) e demonstradas geometricamente na [Figura 20](#).

Na [Figura 20](#), o ponto C representa a câmera, θ representa o ângulo de visão da câmera que o objeto que está sendo medido ocupa, encontrado pela [Equação 3.2](#), os pontos A e B representam as extremidades do que está sendo medido, sendo x o tamanho do que está sendo medido em milímetros, a medida que se deseja encontrar e d representa a distância entre a câmera e o que está sendo medido no momento da fotografia.

Figura 20 – Representação geométrica



Fonte: O autor (2020)

$$\tan(\theta/2) = \frac{x/2}{d} \Rightarrow x = 2 \cdot d \cdot \tan(\theta/2) \quad (3.3)$$

3.3 Dispositivo para detecção de patologias da visão

O equipamento utilizado neste trabalho foi o dispositivo portátil de baixo custo, baseado em uma placa *Raspberry Pi 3 B* proposto por [Silveira et al. \(2018\)](#). O componente responsável pela aquisição das imagens é a Câmera *Raspberry Pi v2*, de 8 MP (*megapixels*), foco fixo e resolução de 3280 x 2464 pixels. Caso necessário, pode ser utilizada a versão NoIR, esta versão da câmera não possui filtro infravermelho, o que permite capturar luz infravermelha nas fotografias, necessária em alguns exames oftalmológicos que utilizam iluminação com esta frequência.

O dispositivo possui uma placa de circuito que dispõe de LEDs (*Light Emitting Diode*) de alto brilho e LEDs infravermelhos posicionados formando um círculo de aproximadamente 4,5 cm de diâmetro ao redor da câmera. A placa foi desenvolvida para exercer a função de fornecer iluminação para a aquisição de imagens através da câmera em ambientes

de baixa luminosidade, assim como possibilitar exames semelhantes aos realizados pelos dispositivos disponíveis no mercado, que utilizam o reflexo do infravermelho nos olhos dos pacientes para identificar patologias da visão.

O envólucro que organiza os componentes eletrônicos possui suportes para o encaixe das mãos do operador com um formato ergonômico. Na lateral, encontram-se aberturas para as portas do *Raspberry*. O tamanho e formato do dispositivo busca reproduzir o padrão dos equipamentos disponíveis no mercado. Para a interação homem-máquina, o componente utilizado é um *display* de 5 polegadas *touchscreen*. Há uma interface gráfica desenvolvida em Python, que é responsável pela realização dos exames e todo o processo de cadastro de pacientes e métodos computacionais.

O dispositivo foi concebido com o propósito de permitir a inclusão de diversos métodos computacionais para detectar patologias da visão. O método que está sendo apresentado neste estudo foi incorporado no dispositivo. Para os fins deste trabalho, foi necessário realizar algumas modificações no dispositivo. Para medir a distância entre o dispositivo e o rosto do paciente, foi escolhido utilizar o Sensor Ultrassônico HC-SR04, devido ao seu baixo custo e facilidade de integração com o *Raspberry Pi*. O sensor emite um som numa frequência acima da faixa audível por seres humanos, e capta o eco. Com base no tempo decorrido entre o envio e o recebimento do som, e sabendo-se a velocidade do som no ar, é possível calcular a distância percorrida.

Para integrar o sensor de distância ao dispositivo, foi desenvolvida uma nova placa de circuito. Nesta placa, os LEDs de luz branca e os de luz infravermelha foram dispostos de uma forma semelhante à da placa original do dispositivo, em forma de círculo ao redor da câmera, no entanto, em busca de um aumento na quantidade de LEDs de luz branca, mais requisitados neste método, a quantidade de cada tipo de LED foi alterada, de doze LEDs infravermelhos e três de luz branca, para seis de cada, dispostos de forma alternada no círculo ao redor da câmera. A versão modificada do dispositivo pode ser vista na [Figura 21](#).

Figura 21 – Dispositivo com nova placa de circuito



(a) Visão frontal do dispositivo

(b) Visão traseira do dispositivo

Fonte: O autor (2020)

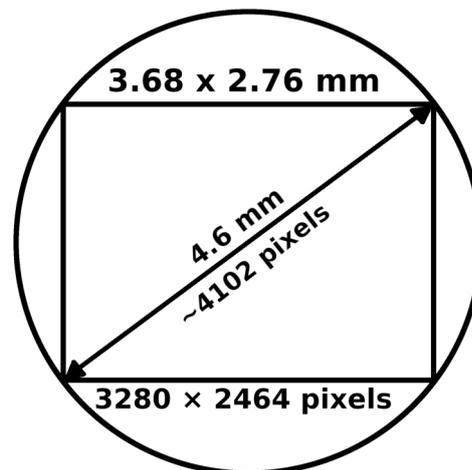
Na [Tabela 1](#) são apresentadas as especificações da câmera do dispositivo, importantes para este trabalho. Na [Figura 22](#) é esquematizada a relação entre o campo de visão total da lente da câmera (círculo externo) e a região do campo que de fato é registrada na fotografia, compreendida no retângulo interno, pois corresponde à parte da luz captada que de fato interfere com o sensor da câmera.

Tabela 1 – Especificações de Hardware da Câmera *Raspberry Pi v2*

PARÂMETRO	VALOR
Resolução da câmera	3280 2464 pixels
Dimensões do sensor	3,68 x 2,76 mm (4,6 mm diagonal)
Distância focal	3,04 mm

Fonte: (DOCUMENTATION, 2019)

Figura 22 – Relação entre o campo de visão da câmera e a região da fotografia



Fonte: O autor (2020)

A medida diagonal do sensor é utilizada pois é a que mais se aproxima da totalidade do campo de visão da lente. Ao substituir tais valores nas Equações ([Equação 3.1](#), [Equação 3.2](#) e [Equação 3.3](#)), obtemos a [Equação 3.4](#), que será utilizada neste trabalho, onde $x[px]$ é o tamanho do que se está medindo em pixels na imagem, d é a distância em milímetros entre a câmera e o que se está medindo e $x[mm]$ é a medida que se deseja encontrar, o tamanho do que está sendo medido na unidade milímetros.

$$x [mm] = 2 \cdot d \cdot \tan \left(\frac{x [px]}{2} \cdot 0,01809203817 \right) \quad (3.4)$$

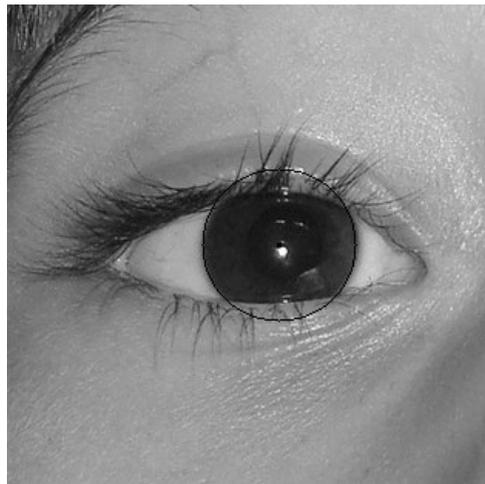
4 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos pela metodologia proposta para localização do limbo e cálculo do seu diâmetro em milímetros por meio de processamento de imagens. São mostrados os resultados obtidos pela fase de detecção do limbo executada em uma base de imagens de rostos e são discutidas as métricas de desempenho calculadas com base nas imagens resultantes. Também são apresentados e discutidos os resultados da aplicação do método proposto para o cálculo do diâmetro do limbo em milímetros em um experimento em ambiente controlado utilizando réplicas de olhos e em fotos de pacientes reais.

4.1 Detecção do limbo em uma base de imagens

Os parâmetros propostos no método de detecção do limbo foram testados em uma base de fotos que possui imagens de 45 pacientes em diversos posicionamentos, totalizando 248 fotos. Destas, foram utilizadas apenas imagens dos pacientes sem óculos e em posições frontais em relação à câmera, pois estas são as que mais se alinham ao objetivo deste trabalho. Desse modo, o conjunto de fotos utilizado foi de 83 imagens. Um dos resultados da detecção pode ser visto na [Figura 23](#).

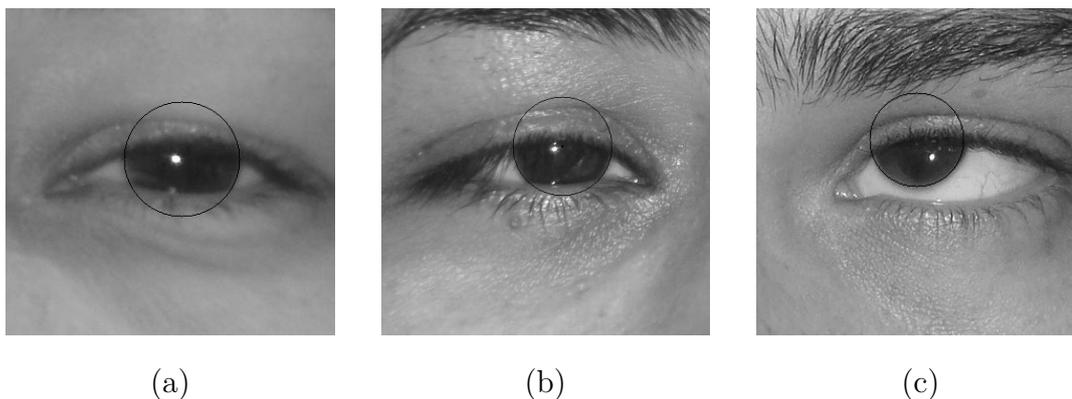
Figura 23 – Exemplo de resultado da detecção do limbo



Fonte: O autor (2020)

É possível observar que o método funciona com fidelidade até mesmo em fotos onde o paciente está com os olhos entreabertos ([Figura 24a](#) e [Figura 24b](#)) e também em pacientes com estrabismo, nos quais a íris não se encontra no centro do olho ([Figura 24c](#)), casos que costumam apresentar dificuldades na detecção por outros métodos.

Figura 24 – Detecção do Limbo em casos atípicos



Fonte: O autor (2020)

A base de fotos utilizada inclui máscaras com a marcação manual da posição e tamanho dos limbos, um exemplo de uma imagem da base e sua respectiva máscara sobrepostos podem ser parcialmente vistos na [Figura 25](#). Foram calculadas algumas métricas de desempenho ([seção 2.7](#)) do método proposto, analisando as imagens resultantes da detecção em relação às máscaras da base, provenientes de marcação manual do limbo. Como comparação, também foram calculadas as métricas de desempenho do detector de círculo de Hough nativo do OpenCV. Os valores encontrados são exibidos na [Tabela 2](#).

Figura 25 – Exemplo de imagem e sua máscara sobrepostos



Fonte: O autor (2020)

Tabela 2 – Métricas do Hough do OpenCV e do Hough modificado

Métrica	Hough OpenCV (%)	Hough Modificado (%)
Sensibilidade	88,39	93,97
Especificidade	99,75	99,92
Precisão	82,22	90,76
Acurácia	99,67	99,88
Coefficiente de Dice	83,03	91,89

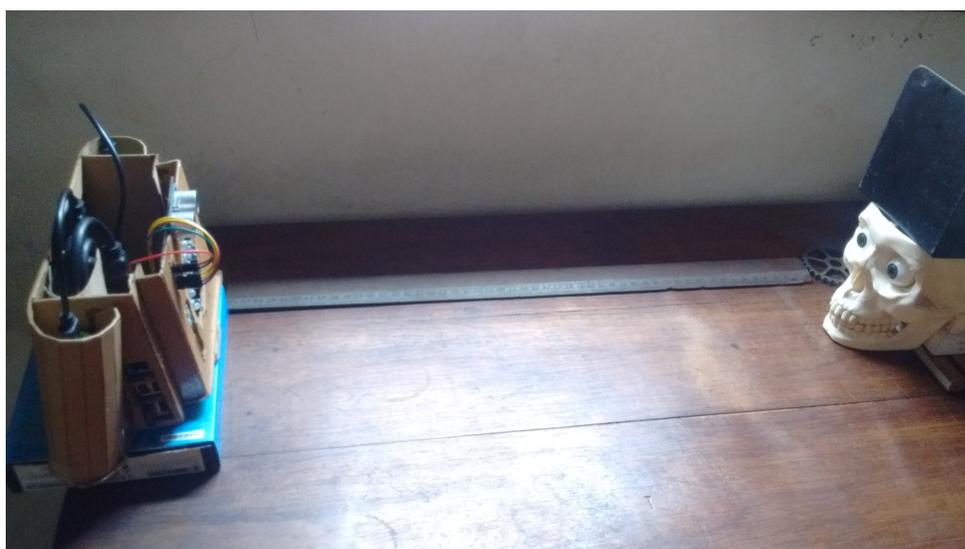
Fonte: O autor (2020)

Observa-se que o desempenho do Detector de Círculos de Hough implementado neste trabalho é superior em todas as métricas testadas em relação ao Detector de Círculos de Hough nativo do OpenCV Python. No entanto, o tempo médio de execução do Hough nativo do OpenCV foi de 1,45 segundo por imagem. Já o Detector implementado neste trabalho e modificado para buscar especificamente por setores circulares, o tempo médio de execução foi de aproximadamente 41,3 segundos. Os tempos apresentados representam a duração completa do processo de detecção do limbo para ambos os detectores, com o tempo de pré-processamento (recorte da área dos olhos, tratamento da imagem e a extração das bordas) já incluso. Os tempos citados se referem ao processamento em uma máquina com processador Intel i3 3217U, 1.8 GHz, 4 núcleos, e 4 Gb de memória RAM, o código implementado na linguagem Python 3.6, e apenas um núcleo do processador sendo utilizado por vez, devido a um mecanismo de segurança chamado GIL (*Global Interpreter Lock*), que é utilizado pelo interpretador do Python.

4.2 Medição do limbo em réplicas de olhos

O método proposto para cálculo do tamanho do limbo em milímetros foi executado em um ambiente controlado para testar o seu funcionamento. Foi elaborado um experimento simples onde fotografias de réplicas de olhos foram retiradas, com o dispositivo e o objeto fotografado sendo posicionados estaticamente em diferentes distâncias desejadas, assim como a iluminação do local, podendo ser regulada conforme a necessidade. O experimento pode ser melhor compreendido observando a [Figura 26](#).

Figura 26 – Experimento em ambiente controlado



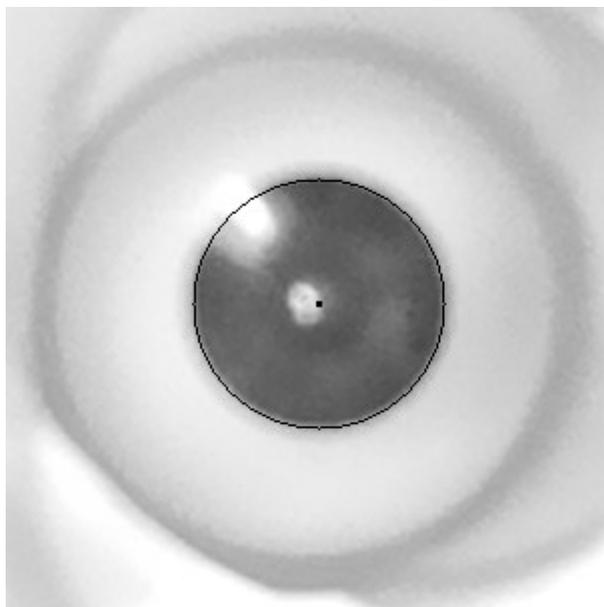
Fonte: O autor (2020)

As distâncias utilizadas foram de 20, 25 e 30 cm do objeto fotografado. Inicialmente, distâncias de até 50 cm foram testadas, porém, constatou-se que, em distâncias maiores, as

medidas do sensor de distância começam a ser afetadas devido à área do modelo de rosto que o sensor utiliza para ecoar o sinal tornar-se proporcionalmente pequena em relação ao seu cone de atuação. As distâncias utilizadas no cálculo foram o resultado da média de 5 medidas consecutivas realizadas após a foto, prática recomendada em atividades laboratoriais que busca reduzir a influência de possíveis erros em cada medição individual.

Na [Figura 27](#) é exibido um exemplo de como a região equivalente ao limbo na réplica de olho foi detectada pelo método proposto, como esperado. Na [Tabela 3](#) são exibidos os resultados do cálculo do diâmetro do limbo em milímetros do olho direito (OD) e esquerdo (OE), com base no diâmetro em pixels do limbo detectado na imagem e a distância entre a câmera e os olhos.

Figura 27 – Detecção do limbo na réplica de olho



Fonte: O autor (2020)

Os modelos de olhos têm o diâmetro do limbo de 12 mm, diâmetro aferido manualmente com um paquímetro¹. Sendo o erro absoluto de cada resultado a diferença em módulo entre ele e o valor que deveria ser (12 mm), o erro absoluto médio dos resultados é de aproximadamente 0,2 mm. Na prática médica, variações abaixo de 0,5 mm normalmente são desprezadas, sendo o valor medido arredondado para o múltiplo de 0,5 mm mais próximo. Portanto, a metodologia proposta para o cálculo se demonstra compatível com a medida manual, uma vez que ao arredondarmos, o múltiplo mais próximo é 12 mm.

4.3 Medição do limbo em pacientes reais

Houve a oportunidade de visitar o centro cirúrgico de uma clínica oftalmológica onde, com a permissão do médico e dos pacientes, foram capturadas imagens de 5 pacientes

¹ Instrumento empregado para medir precisamente pequenas distâncias, espessuras etc.

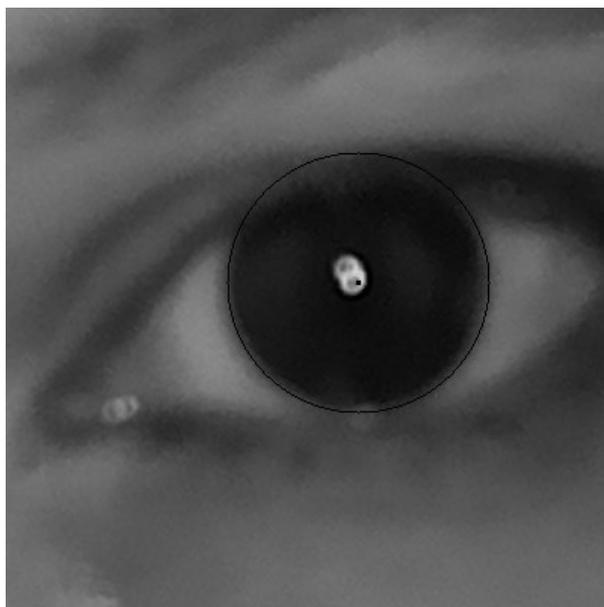
Tabela 3 – Resultados do método de detecção do limbo nas réplicas de olhos

Foto	Dist. (mm)	OD (px)	OE (px)	OD (mm)	OE (mm)
1	205,5	184	184	11,9	11,9
2	254,4	154	152	12,4	12,2
3	302,8	126	126	12	12
4	203,3	184	184	11,8	11,8
5	256	148	152	12	12,3
6	304,6	126	128	12,1	12,3
7	209,1	188	184	12,4	12,2
8	209,4	188	184	12,4	12,2
9	253	152	152	12,1	12,1
10	257,9	152	152	12,4	12,4
11	302,6	128	128	12,2	12,2
12	301,5	128	128	12,2	12,2
Média	-	-	-	12,1583	12,15

Fonte: O autor (2020)

em período pré-operatório utilizando o dispositivo com sensor de distância. O médico costuma aferir manualmente o diâmetro do limbo durante a cirurgia, então foi solicitado que posteriormente informasse tais valores para compor a base de dados. O método de detecção do limbo e o cálculo do diâmetro limbar em milímetros foram aplicados à base de imagens retiradas dos pacientes. Na [Figura 28](#) é mostrado um exemplo da detecção do limbo de um dos pacientes.

Figura 28 – Detecção do limbo em imagem de paciente real



Fonte: O autor (2020)

Na [Tabela 4](#) são apresentadas as medidas dos diâmetros encontrados manualmente pelo especialista, os resultados encontrados automaticamente pelo método proposto neste trabalho, assim como a diferença entre as duas medidas, caracterizando o erro, para os olhos

direito (OD) e esquerdo (OE) respectivamente em cada coluna. Os valores encontrados foram arredondados para o múltiplo de 0,5 mm mais próximo.

Tabela 4 – Resultados do método de detecção do limbo em pacientes reais

Paciente	OD e OE reais (mm)	OD e OE calculados (mm)	Erro (mm)
1	12,0 12,0	14,0 14,0	2,0 2,0
1	12,0 12,0	13,5 13,5	1,5 1,5
1	12,0 12,0	13,0 13,0	1,0 1,0
1	12,0 12,0	13,0 13,0	1,0 1,0
2	11,0 11,0	12,5 12,5	1,5 1,5
2	11,0 11,0	12,5 12,5	1,5 1,5
3	11,5 11,5	12,5 12,5	1,0 1,0
3	11,5 11,5	12,5 12,5	1,0 1,0
3	11,5 11,5	13,0 13,0	1,5 1,5
3	11,5 11,5	13,5 13,5	2,0 2,0
4	11,5 11,5	11,0 11,0	0,5 0,5
4	11,5 11,5	11,0 11,0	0,5 0,5
4	11,5 11,5	12,0 12,0	0,5 0,5
4	11,5 11,5	12,0 12,0	0,5 0,5
4	11,5 11,5	11,0 11,0	0,5 0,5
5	11,0 11,0	12,5 12,5	1,5 1,5
5	11,0 11,0	11,5 11,5	0,5 0,5
5	11,0 11,0	14,0 13,0	3,0 2,0
5	11,0 11,0	13,0 13,0	2,0 2,0
5	11,0 11,0	13,0 13,0	2,0 2,0
Média	-	-	1.275 1.225

Fonte: O autor (2020)

Apesar da resolução da câmera do dispositivo ser alta, as imagens não ficaram nítidas, isto pode ter sido causado devido à falta de foco ajustável na câmera e a pequenos movimentos durante a realização das fotos, tanto do paciente quanto do dispositivo por ser segurado nas mãos e não em uma plataforma fixa. Tais movimentos interferem na medida do sensor de distância, e a falta de nitidez nas imagens ocasionam imprecisões na detecção do limbo. Os pequenos erros nas medidas de entrada se propagam ao longo dos cálculos gerando diferenças no resultado final, em algumas aplicações, tais diferenças são desprezíveis, mas para a aplicação deste trabalho, que busca alta precisão, variações acima de 0,5 mm devem ser consideradas.

5 Conclusões

Problemas visuais podem diminuir a capacidade visual de pacientes, e em alguns casos, levar até à cegueira. O diâmetro limbar é uma medida utilizada pelos oftalmologistas em alguns exames relacionados à saúde dos olhos de pacientes, como os que possibilitam a detecção do glaucoma congênito, problema que atinge crianças em idade pré-escolar e escolar e pode prejudicar o desempenho delas na escola, o desenvolvimento motor e a capacidade de comunicação do indivíduo em formação. Desta forma, o diagnóstico precoce de patologias como esta é importante para que o tratamento seja feito o quanto antes.

Existem dificuldades em aplicar os exames usuais em crianças, pois geralmente a colaboração do paciente se faz necessária, e crianças pequenas não conseguem colaborar. A prática médica atual consiste em sedar o paciente e utilizar de técnicas invasivas e nem sempre precisas para o exame. Assim, se faz oportuna uma solução computacional que evite tais problemas, permitindo que se faça a detecção automática do limbo em imagens e que seu diâmetro seja calculado em milímetros.

O uso de processamento de imagens para detecção dos olhos e localização do limbo estão presentes na literatura, porém, são utilizados em aplicações como exames de estrabismo, segmentação da pupila para testes do reflexo vermelho, rastreamento da direção dos olhos em vídeo e reconhecimento biométrico por meio da íris. Neste trabalho, as etapas de detecção de olhos, localização do limbo e cálculo do diâmetro do limbo em milímetros foram implementadas na linguagem Python 3.6, com auxílio da ferramenta OpenCV e do dispositivo proposto por [Silveira et al. \(2018\)](#), com algumas modificações de hardware e software para integrar novos componentes, como o sensor de distância.

Inicialmente planejou-se que o processamento fosse realizado na placa *Raspberry Pi* do dispositivo, no entanto, devido a alterações nas técnicas utilizadas no método proposto, em busca de melhores resultados, o baixo poder de processamento e memória do *Raspberry* se tornaram fatores limitantes, por isso, o dispositivo passou a ser usado apenas para captação da imagem e distâncias, os dados registrados passaram a ser armazenados em arquivos e exportados para um computador tradicional, onde foi realizado o processamento dos dados.

O método desenvolvido demonstrou funcionar de forma coerente com o que foi proposto. Conseguiu-se realizar medições do diâmetro limbar em milímetros com base em processamento de imagens em conjunto com outros dados, como especificações da câmera e a distância entre a câmera e o paciente. Os resultados obtidos através do método desenvolvido são compatíveis com os valores obtidos pelo método manual de medição.

Em alguns casos, a precisão dos resultados não foi tão alta quanto desejada, devido

a fatores como o foco não ajustável da câmera utilizada, a irregularidade de iluminação em ambientes não controlados e a natureza irregular da superfície do rosto humano, que interfere no correto funcionamento de sensores de distância baseados em ultrassom, o tipo que foi utilizado. Apesar disso, o desempenho obtido pela técnica desenvolvida indica que, com equipamentos diferentes, de melhor precisão, a metodologia proposta tem potencial de aplicação em consultórios oftalmológicos.

A realização do trabalho contribuiu no desenvolvimento de habilidades e competências relacionadas a projetos da engenharia, fazendo parte do processo a postura de observar os obstáculos como oportunidades de aprendizado. Possíveis aperfeiçoamentos que podem ser feitos em trabalhos futuros são: melhoria da câmera, optando-se por uma com foco ajustável ou, preferencialmente, autoajustável, uso de sensor de distância baseado em infravermelho ou laser, pois possuem melhor precisão na medida, uso de uma versão superior da placa *Raspberry Pi*, com maior capacidade de processamento, projetar um *case* para o dispositivo que possa ser impresso em uma impressora 3D, adaptado para o encaixe do *Raspberry*, do *display*, das baterias e da placa de circuito com a câmera e os LEDs de iluminação.

Em um contexto mais amplo, este trabalho se integra a um projeto de desenvolvimento de uma plataforma *open-source* e *open-hardware*, na qual os códigos dos métodos computacionais para detecção de patologias da visão seriam disponibilizados, assim como detalhes do hardware utilizado e as instruções de montagem, de modo que profissionais da área da saúde possam adquirir o hardware e incluir nele os diversos métodos, facilitando assim o acesso de mais pessoas a exames e processos de triagem, tornando mais eficiente o funcionamento de sistemas de saúde. Projetos como este, que utilizam técnicas computacionais para tornar a detecção de patologias da visão mais acessível, aumentam a eficiência no diagnóstico dos problemas e, conseqüentemente, tendem a favorecer a taxa de tratamentos realizados, reduzindo assim a incidência de problemas de visão na população.

Referências

- ALMEIDA, J. D. S. d. et al. Computer-aided methodology for syndromic strabismus diagnosis. *Journal of digital imaging*, Springer, v. 28, n. 4, p. 462–473, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 24.
- CANNY, J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Ieee, n. 6, p. 679–698, 1986. Citado na página 17.
- CHAKRAVORTY, P. What is a signal?[lecture notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, IEEE, v. 35, n. 5, p. 175–177, 2018. Citado na página 12.
- CRUZ, F. R. G. et al. Iris recognition using daugman algorithm on raspberry pi. In: IEEE. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. [S.l.], 2016. p. 2126–2129. Citado na página 10.
- DOCUMENTATION, R. P. *Camera Module*. 2019. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/>>. Acesso em: 13 jul 2019. Citado na página 29.
- FRAZÃO, Dr. A. Glaucoma: quais os exames que confirmam o diagnóstico. 2016. Disponível em: <<https://www.tuasaude.com/exame-de-glaucoma>>. Acesso em: 21 dez 2019. Citado na página 8.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: Pearson Educación, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.
- HAAR, A. Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Mathematische Annalen*, Springer, v. 71, n. 1, p. 38–53, 1911. Citado na página 13.
- HOUGH, P. V. *Method and means for recognizing complex patterns*. [S.l.]: Google Patents, 1962. US Patent 3,069,654. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.
- INSTITUTE, N. E. *Glaucoma*. 2019. Disponível em: <<https://www.nei.nih.gov/learn-about-eye-health/eye-conditions-and-diseases/glaucoma>>. Acesso em: 21 dez 2019. Citado na página 8.
- JUNIOR, A. C.; OLIVEIRA, L. A. G. d. As principais causas de cegueira e baixa visão em escola para deficientes visuais. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, SciELO Brasil, v. 75, n. 1, p. 26–29, 2016. Citado na página 8.
- KUNIK, Z. et al. Raspberry pi based complete embedded system for iris recognition. In: IEEE. *2017 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*. [S.l.], 2017. p. 263–268. Citado na página 10.
- LAGANIÈRE, R. *OpenCV Computer Vision Application Programming Cookbook Second Edition*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- LIENHART, R.; MAYDT, J. An extended set of haar-like features for rapid object detection. In: IEEE. *Proceedings. international conference on image processing*. [S.l.], 2002. v. 1, p. I–I. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

- LORENZI, R. M. *Software de Detecção de Estrabismo para Dispositivos Móveis*. Tese (Monografia) — Universidade Regional de Blumenau, Curso de Ciência da Computação, Blumenau, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.
- OPENCV. *Face Detection using Haar Cascades*. 2019. Disponível em: <https://docs.opencv.org/3.4.1/d7/d8b/tutorial_py_face_detection.html>. Acesso em: 14 jul 2019. Citado na página 14.
- OPENCV. *Hough Circle Transform*. 2019. Disponível em: <https://docs.opencv.org/3.1.0/da/d53/tutorial_py_houghcircles.html>. Acesso em: 15 jul 2019. Citado na página 19.
- OPENCV. *Smoothing Images*. 2019. Disponível em: <https://docs.opencv.org/3.1.0/d4/d13/tutorial_py_filtering.html>. Acesso em: 16 jul 2019. Citado na página 15.
- OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979. Citado na página 16.
- PAPAGEORGIOU, C. P.; OREN, M.; POGGIO, T. A general framework for object detection. In: IEEE. *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No. 98CH36271)*. [S.l.], 1998. p. 555–562. Citado na página 13.
- RHODY, H. Lecture 10: Hough circle transform. *Chester F. Carlson Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology*, 2005. Citado na página 18.
- SHAPIRO, L. G.; LINDA, G. stockman, george c. *Computer Vision, Prentice hall*, 2002. Citado na página 16.
- SILVA, I. F. S. d. et al. Detecção automática da presença de patologia na visão baseada em imagens do teste de brückner. Universidade Federal do Maranhão, 2019. Citado na página 8.
- SILVEIRA, R. M. et al. Dispositivo de baixo custo para detecção de patologias da visão. In: SBC. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Computação Aplicada à Saúde*. [S.l.], 2018. Citado 4 vezes nas páginas 8, 10, 27 e 36.
- SOBEL, I.; FELDMAN, G. A 3x3 isotropic gradient operator for image processing. *a talk at the Stanford Artificial Project in*, p. 271–272, 1968. Citado na página 17.
- UMBAUGH, S. E. *Digital image processing and analysis: human and computer vision applications with CVIPtools*. [S.l.]: CRC press, 2010. Citado na página 17.
- VIOLA, P.; JONES, M. et al. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *CVPR (1)*, v. 1, n. 511-518, p. 3, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 21.
- WIKIPEDIA. *Angle of view*. 2019. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_view>. Acesso em: 31 dez 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 26.
- WIKIPEDIA. *Canny edge detector*. 2019. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Canny_edge_detector>. Acesso em: 14 jul 2019. Citado na página 17.
- ZHANG, H.; WIKLUND, K.; ANDERSSON, M. Circle detection using isosceles triangles sampling. *arXiv preprint arXiv:1511.00461*, 2015. Citado na página 17.