



SISTEMA DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE RAIO DA PUPILA E DA ÍRIS PARA PUPILOMETRIA DINÂMICA

**Curso de Engenharia Elétrica
TE105 - Projeto de Graduação**

Matheus Felipe Bosa

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Giselle Ferrari

Curitiba, 2 de julho de 2020.

Agenda

- **Introdução**
 - Contexto e motivação
 - Objetivos
 - Contribuições do trabalho
- **Fundamentação Teórica**
 - Íris e pupila
 - Diabetes *mellitus*
 - Pupilometria dinâmica
 - Imagem digital
 - Filtragem de imagens
 - Morfologia matemática binária
 - Segmentação de imagens
 - Métricas de avaliação

Agenda

- **Materiais e Métodos**
 - Recursos computacionais
 - Metodologia
- **Resultados**
 - Sistema de detecção automática
 - Avaliação de desempenho
- **Conclusão e Trabalhos Futuros**

Introdução

- Contexto e motivação
- Objetivos
- Contribuições do trabalho

Contexto e motivação

- Diabetes *mellitus* é a doença com a 4º maior taxa de mortalidade no mundo (4%)¹
- 463 milhões de pessoas no mundo vivem com diabetes²
- A projeção para 2030 é 578 milhões de pessoas
- Urbanização, sedentarismo e envelhecimento populacional³
- Neuropatia autonômica
- Pupilometria dinâmica

¹OMS. *World health statistic*, 2018.

²International Diabetes Federation Atlas. 9ª ed.

³Diretrizes da Sociedade Brasileira de Diabetes. 2017-2018.

Objetivos

- Revisar conceitos teóricos de processamento digital de imagens
- Implementar algoritmo para segmentação de pupila e íris em imagens de vídeo de pupilometria dinâmica com baixo custo computacional
- Desenvolver sistema *web* para execução do processamento das imagens
- Comparar o desempenho do sistema aos resultados obtidos por especialistas

Fundamentação Teórica

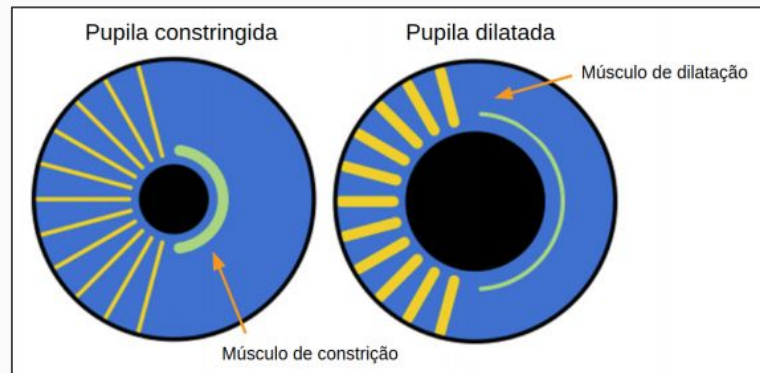
- Íris e pupila
- Diabetes *mellitus*
- Pupilometria dinâmica
- Imagem digital
- Filtragem de imagens
- Morfologia matemática binária
- Segmentação de imagens
- Métricas de avaliação

Íris e pupila

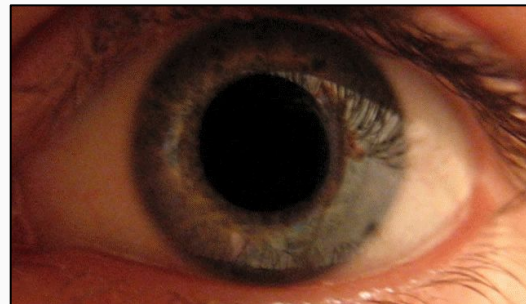
- Íris
 - Fibras musculares
 - Músculos esfíncter e dilatador
 - Controle do raio pupilar
- Pupila
 - Acesso ao sistema nervoso autônomo



Midríase e miose².



Mecanismo de constrição e dilatação pupilar¹.



Dilatação pupilar³.

¹Mathot, S. Pupillometry: psychology, physiology, and function. Journal of Cognition.

²Cassiano, G. Avaliação e alteração de reflexos pupilares.

³Coisas da Fonte. A pupila humana. Avaliação e alteração de reflexos pupilares. <<http://coisas-da-fonte.blogspot.com/2016/03/a-pupila-humana-variaco.es.html>>

Diabetes *mellitus*

- Secreção inadequada da insulina ou ação insuficiente do hormônio
- Controle dos níveis glicêmicos
- Neuropatia autonômica
- Sintomas
 - Gastrointestinais
 - Cardiovasculares

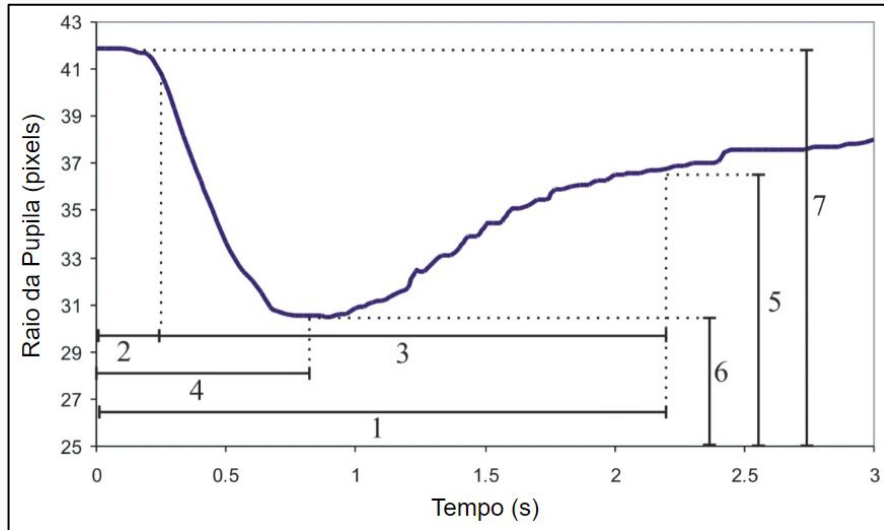


Diabetes¹.

¹Laboratório Richet. Diabetes: sintomas, fatores de risco, tipos e tratamento. <www.richet.com.br>

Pupílometria dinâmica

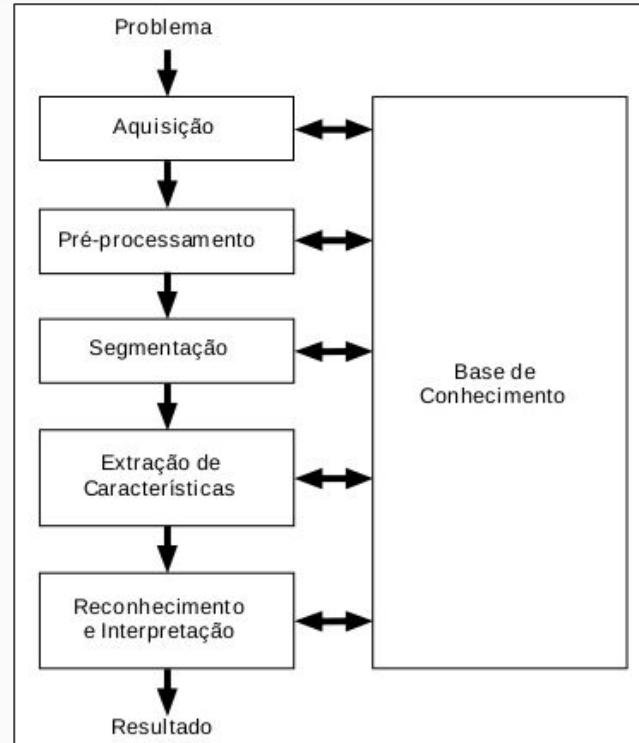
- Avaliação do sistema nervoso autônomo
- Identificação objetiva e precoce de neuropatia autonômica



Curva de variação do raio da pupila em função do tempo¹.

¹Ferrari, G et al. Using dynamic pupillometry as a simple screening tool to detect autonomic neuropathy in patients with diabetes. BioMedical Engineering OnLine.

Processamento digital de imagens



Um sistema de visão artificial e suas principais etapas¹.

¹Gonzalez R., Woods R. Processamento Digital de Imagens. 2001. Vol. 3.

Imagem digital

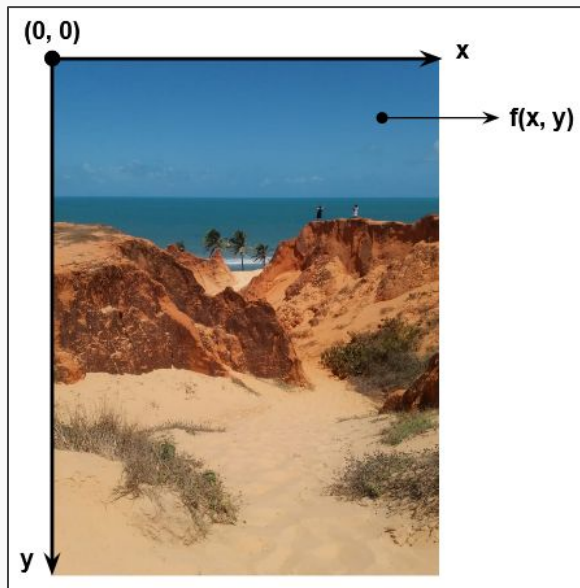
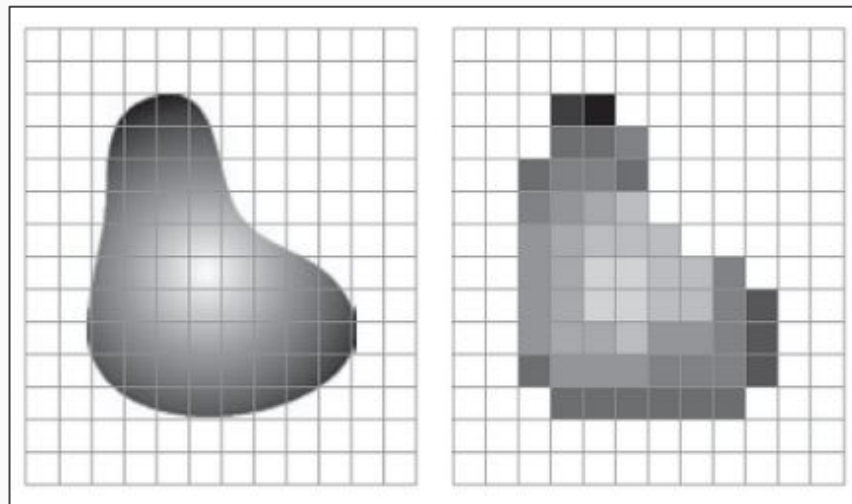


Imagem digital e sistema de coordenadas¹.



Processo de amostragem e quantização².

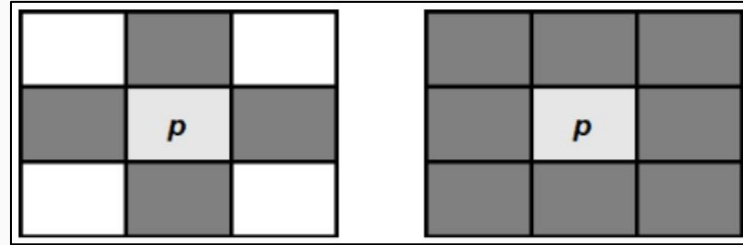
¹Autoria própria.

²Gonzalez R., Woods R. Processamento Digital de Imagens. 2001. Vol. 3.

Filtragem de imagens

- Técnicas baseadas em filtragem espacial

$$g(x, y) = T[f(x, y)]$$



4-vizinhança e 8-vizinhança do *pixel* $p_{(x,y)}$ ¹.

¹Autoria própria.

Filtragem de imagens

- Operação de convolução em imagens

1	1	1	0	0
0	1	1	1	0
0	0	1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

1	0	1
0	1	0
1	0	1

Imagem de entrada e filtro unitário "X"¹.

1x1	1x0	1x1	0	0
0x0	1x1	1x0	1	0
0x1	0x0	1x1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

4		

Operação de convolução¹.

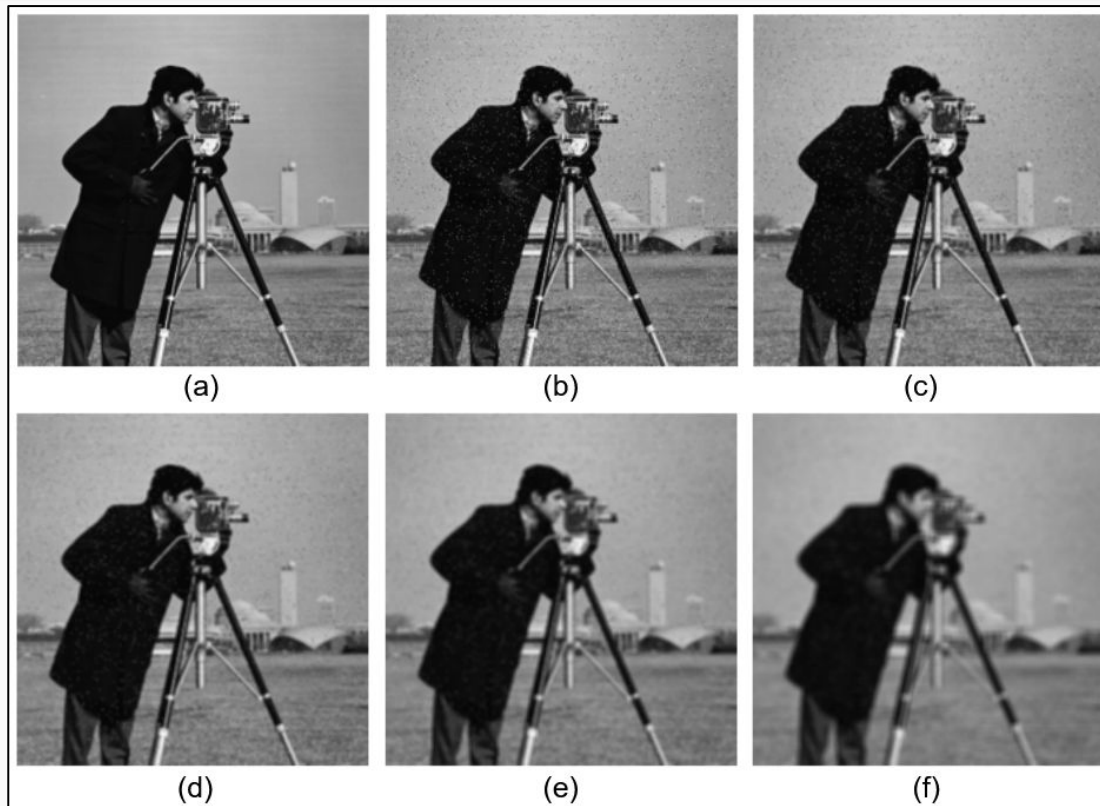
¹Clappis, A. Uma introdução às redes neurais convolucionais usando Keras. <medium.com/data-hackers>

Filtragem de imagens

- Filtros passa-baixas
 - Filtro da média
 - Filtro da mediana
 - Filtro gaussiano

1/9	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1

Máscara 3x3 do filtro da média¹.



Filtragem pela média utilizando máscaras distintas.

(a) Imagem original. (b) Imagem com ruído sal e pimenta. (c) 3x3. (d) 5x5. (e) 7x7. (f) 11x11¹.

¹Autoria própria.

Filtragem de imagens

- Filtros passa-altas
 - Detecção de bordas
 - Operadores de gradiente

$$\text{mag}(\vec{\nabla} f(x, y)) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

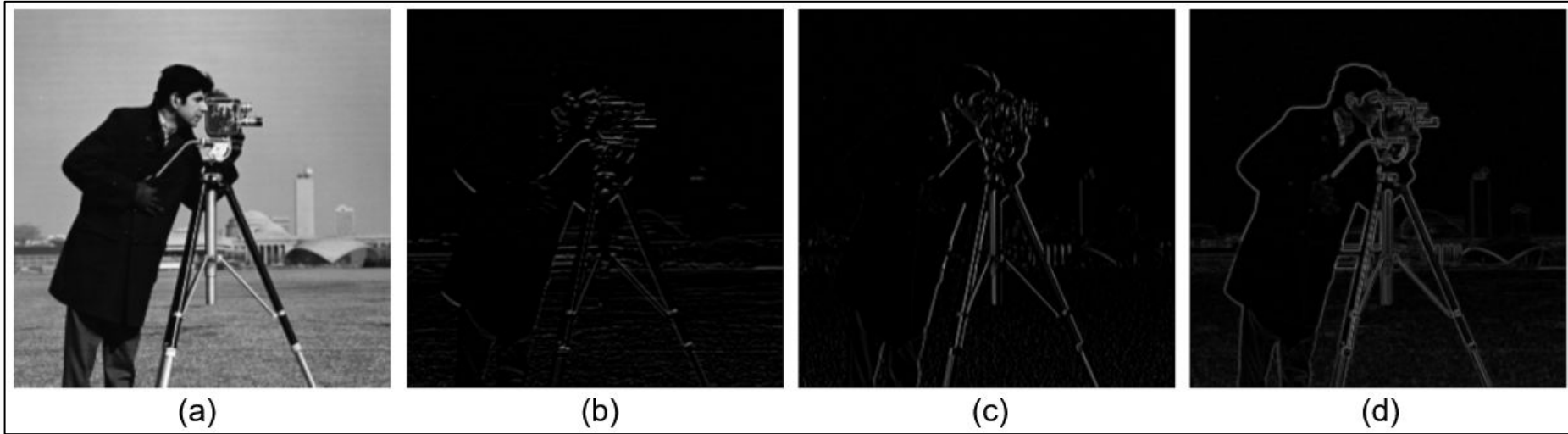
$$\text{Prewitt}_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Prewitt}_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Sobel}_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{Sobel}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Scharr}_x = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad \text{Scharr}_y = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

Filtragem de imagens

- Filtragem passa-altas utilizando o operador de Sobel

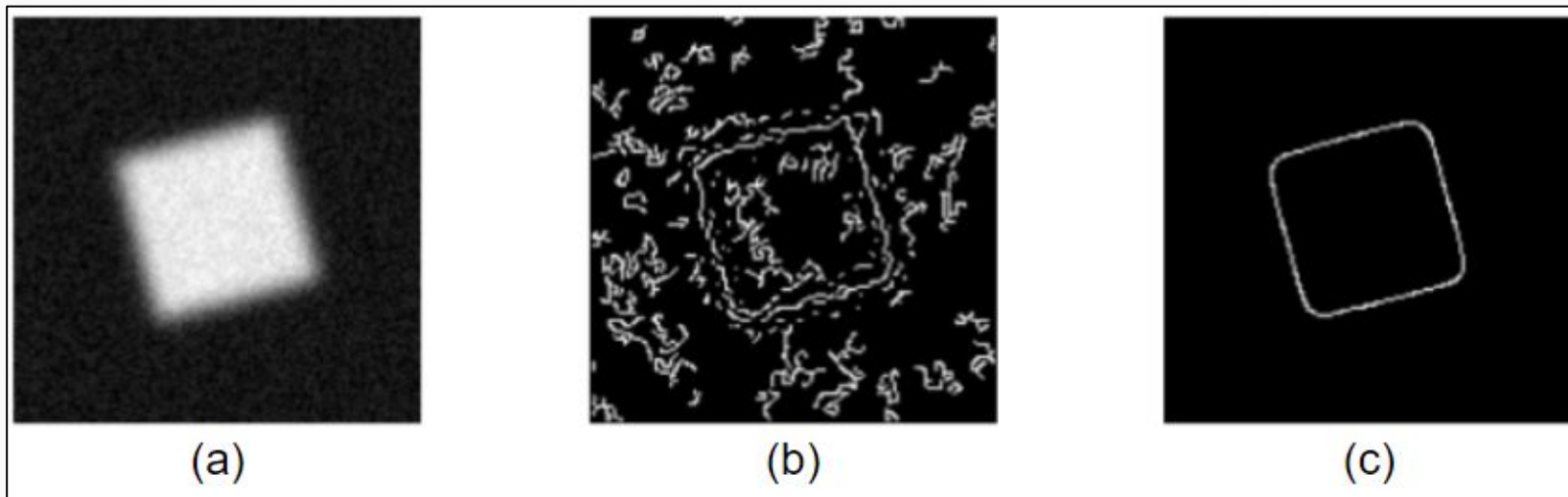


(a) Imagem original. (b) Imagem filtrada por Sobel horizontal. (c) Imagem filtrada por Sobel vertical. (d) Imagem filtrada pela combinação dos filtros Sobel horizontal e vertical¹.

¹Autoria própria.

Filtragem de imagens

- Detector de bordas de Canny



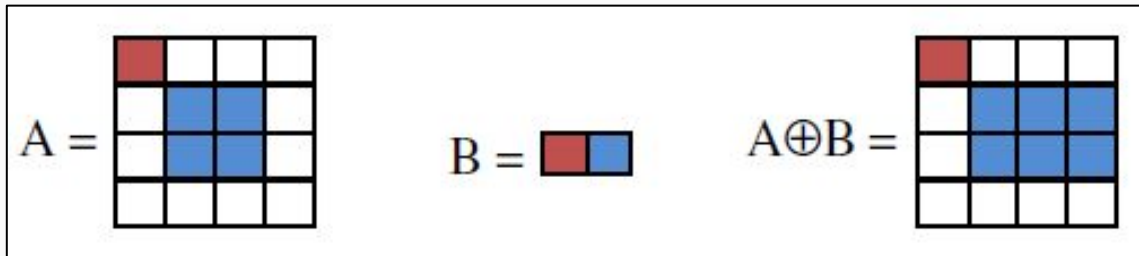
(a) Imagem com ruído. (b) $\sigma = 1$. (c) $\sigma = 3$ ¹.

¹scikit-image. *Canny edge detector*. <scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/edges/plot_canny.html#sphx-glr-auto-examples-edges-plot-canny-py>

Morfologia matemática binária

- Operações morfológicas
 - Erosão
 - Dilatação
 - Abertura (erosão → dilatação)
 - Fechamento (dilatação → erosão)

$$A \oplus B = \{c | c = a + b, a \in A, b \in B\}$$



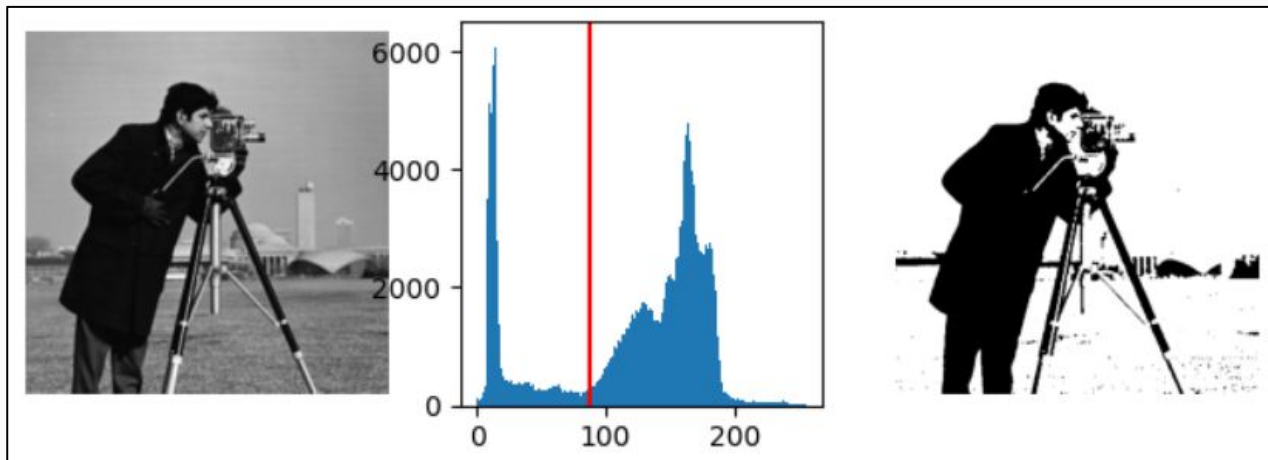
Operação da dilatação¹.

¹Soares, H. B. Análise e classificação de imagens de lesões da pele por atributos de cor, forma e textura utilizando máquina de vetor de suporte. 2008. Tese de doutorado - UFRN.

Segmentação de imagens

- Limiarização

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) > T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

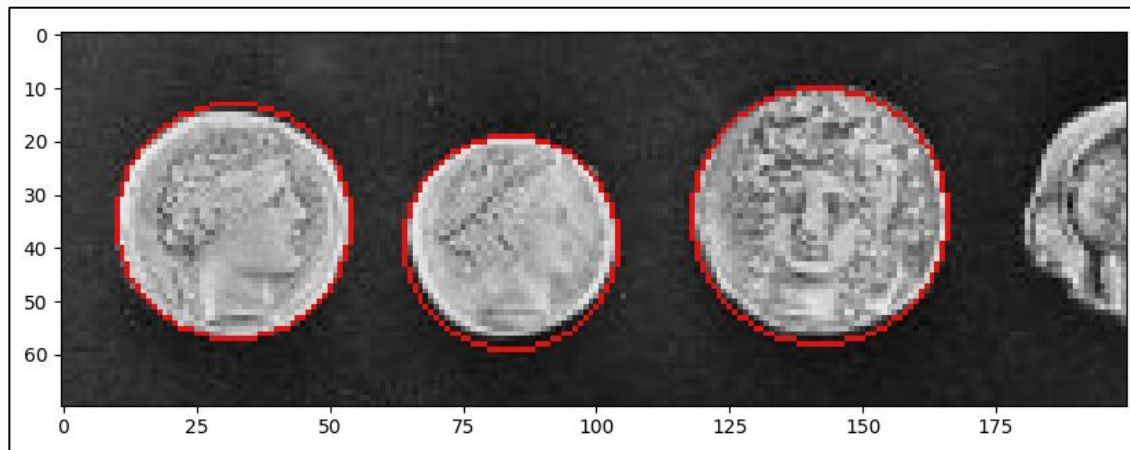


Binarização de uma imagem¹.

¹scikit-image. *Thresholding*. <scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/segmentation/plot_thresholding.html>

Segmentação de imagens

- Transformada circular de Hough



Detecção de moedas numa imagem¹.

¹scikit-image. *Circular and Elliptical Hough Transforms*. <scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/edges/plot_circular_elliptical_hough_transform.html>

Métricas de avaliação

- Erro Médio Absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}|$$

- Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMSE - *Root Mean Squared Error*)

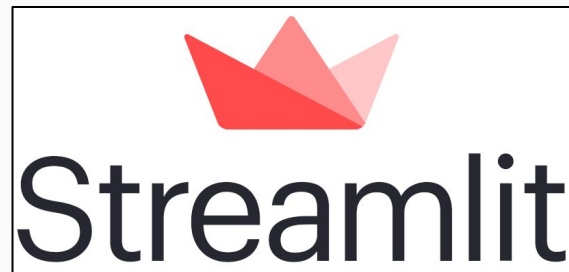
$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}$$

Materiais e Métodos

- Recursos computacionais
- Metodologia
 - Aquisição de imagens
 - Pré-processamento
 - Segmentação da pupila
 - Segmentação da íris
 - Avaliação de desempenho

Recursos computacionais

- Python
- Streamlit
- scikit-image
- Heroku



Metodologia

- Aquisição de imagens
- Pré-processamento
 - Remoção de ruído
 - Tratamento de reflexos
- Segmentação da pupila
 - Binarização global
 - Identificação de circunferências
- Segmentação da íris
 - Detecção de ponto de máximo local
- Avaliação do desempenho do sistema

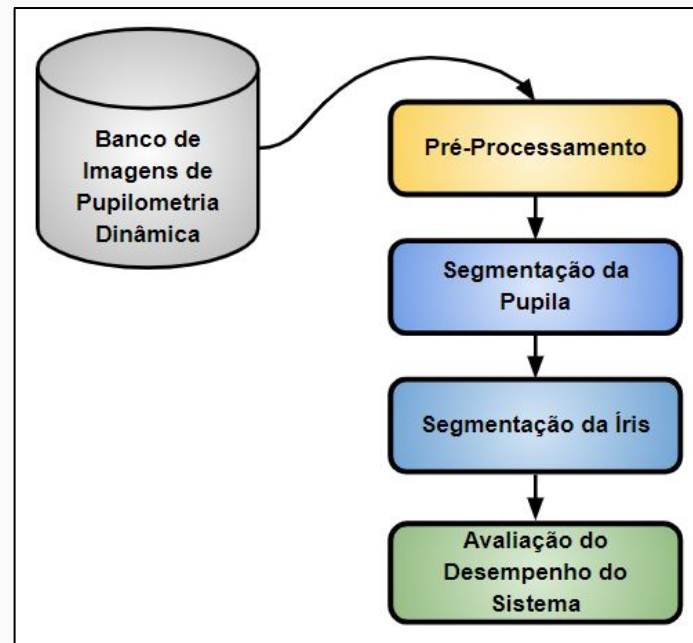
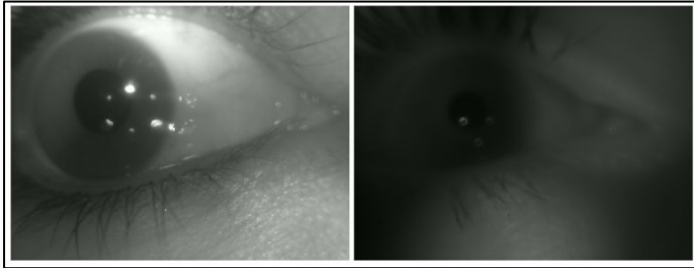


Diagrama da metodologia do trabalho¹.

¹Autoria própria.

Aquisição de imagens

- Beatriz Bonafini sob orientação do Prof. Dr. Lucas Ferrari
- Ambulatório do Serviço de Endocrinologia e Metabologia do Hospital das Clínicas da UFPR
- Pacientes portadores de diabetes *mellitus* tipo 1
- Aprovação do comitê de ética de pesquisa com seres humanos



Níveis distintos de contraste, brilho, nitidez e número de reflexos especulares¹.

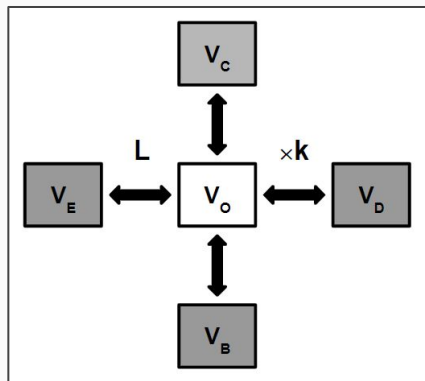


Sequência de três quadros de vídeo em que paciente pisca o olho¹.

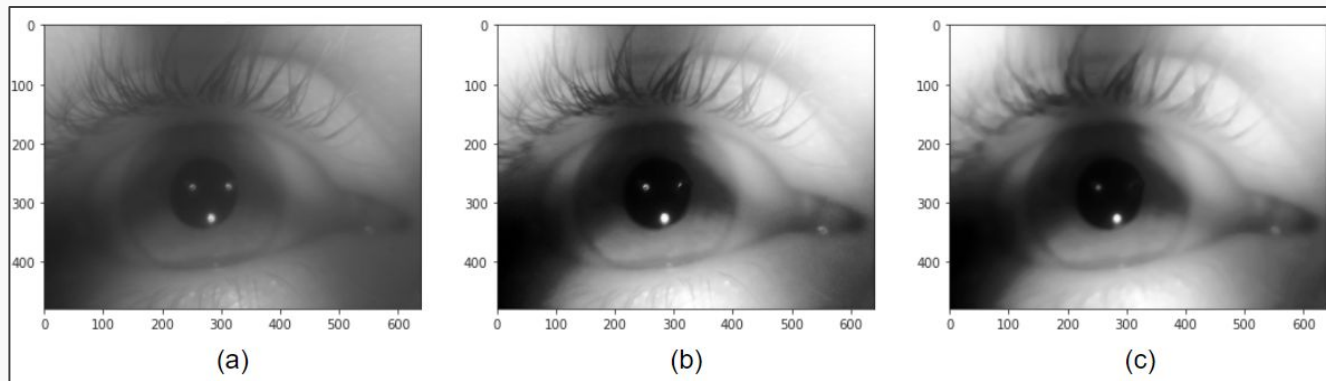
¹Autoria própria.

Pré-processamento

- Remoção de ruído
- Tratamento de reflexos especulares causados por LEDs infravermelhos



Parâmetros L e k ¹.

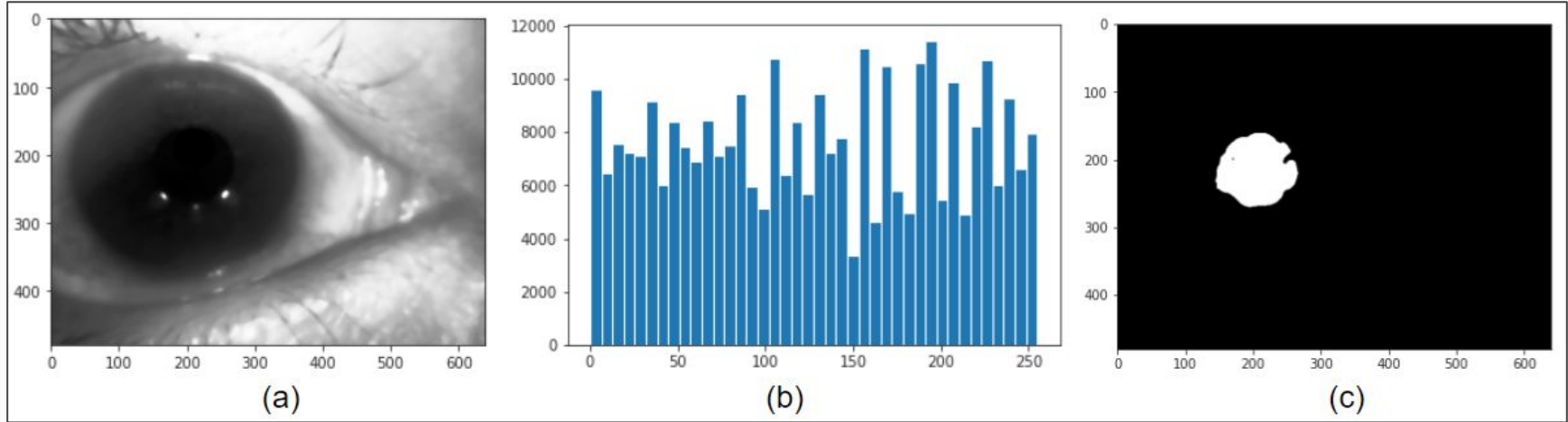


(a) Imagem de entrada. (b) Imagem após processamento pelo algoritmo de tratamento de reflexos. (c) Imagem processada após filtragem de suavização pela mediana¹.

¹Autoria própria.

Segmentação da pupila

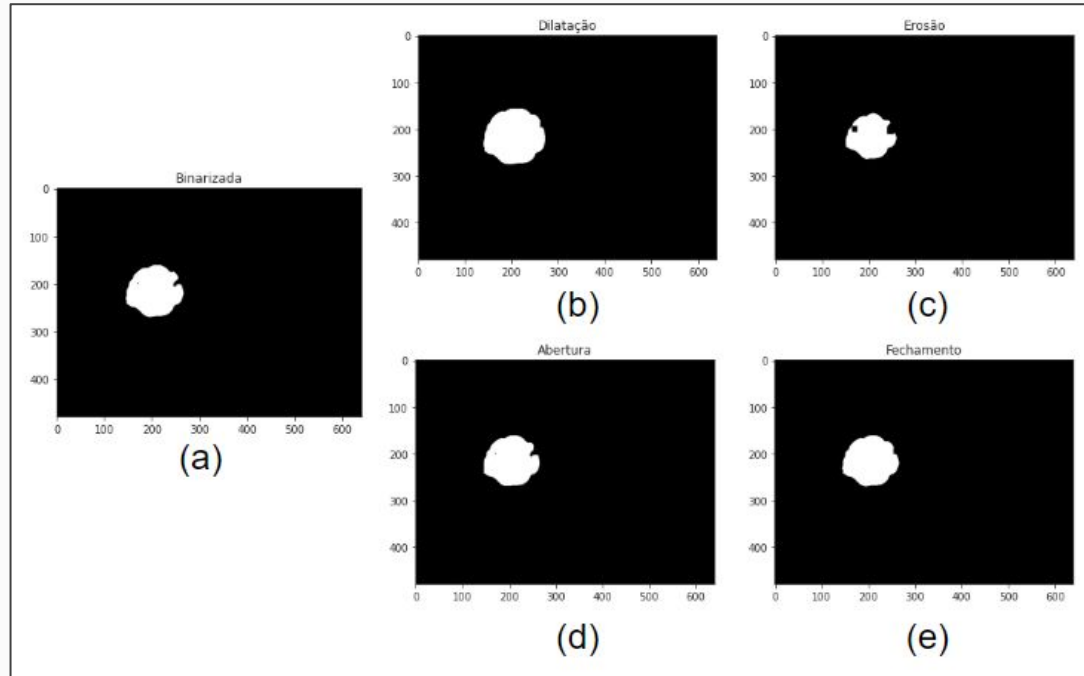
- Binarização global



(a) Imagem após tratamento de reflexos. (b) Histograma da imagem com 40 bins.
(c) Imagem binarizada a partir do histograma usando o limiar de valor 7 correspondente ao 1º bin¹.

Segmentação da pupila

- Operação morfológica binária

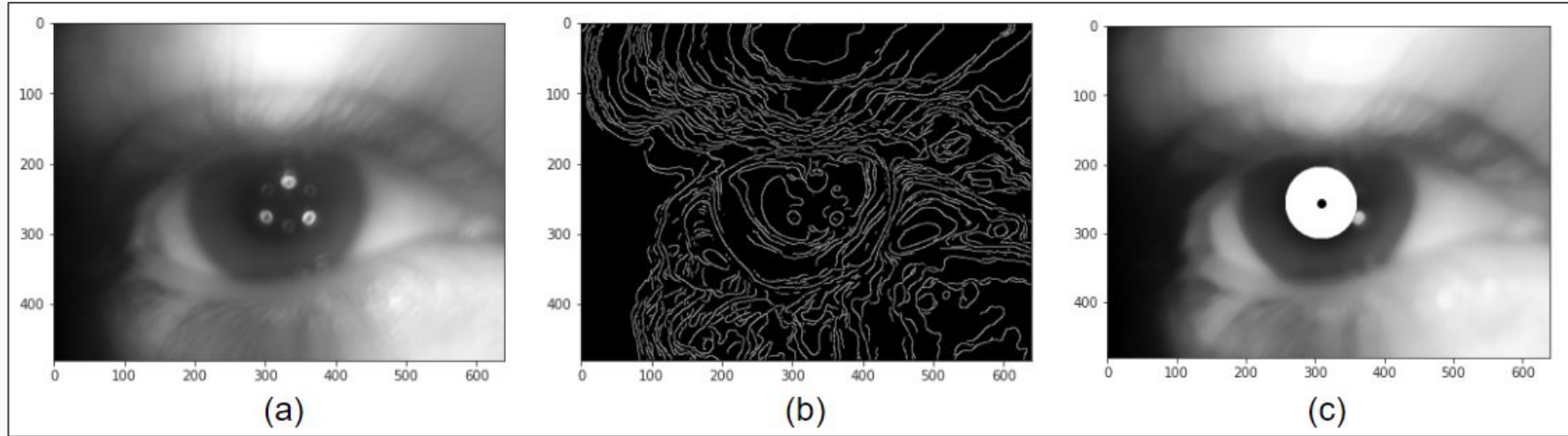


(a) Imagem binarizada. (b) Dilatação. (c) Erosão. (d) Abertura. (e) Fechamento¹.

¹Autoria própria.

Segmentação da pupila

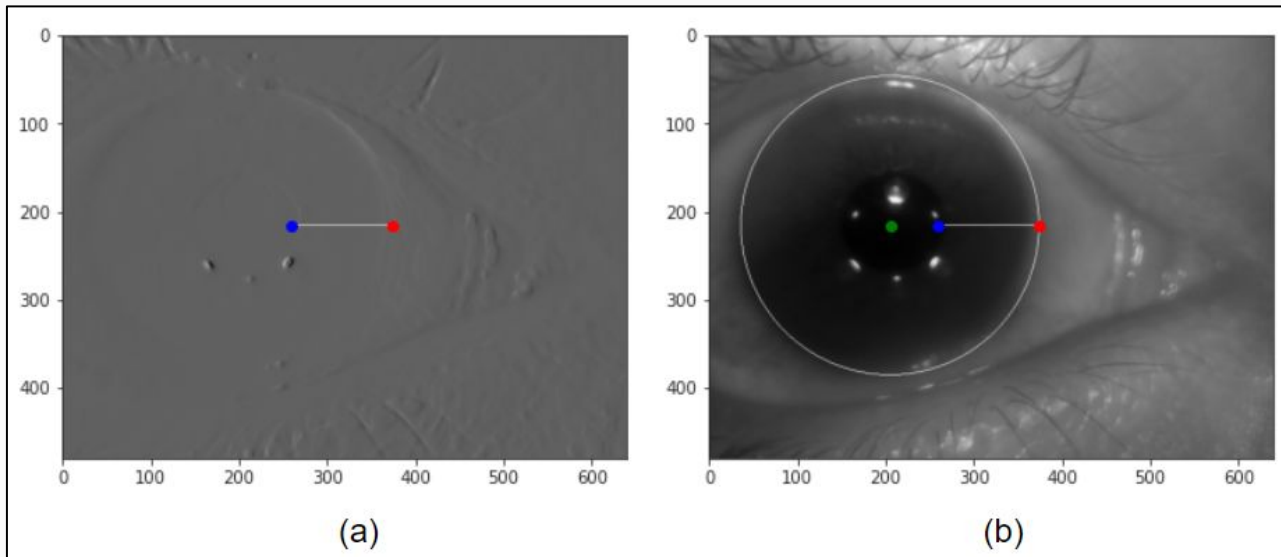
- Identificação de circunferências
 - Detector de bordas de Canny
 - Transformada circular de Hough



(a) Imagem original. (b) Imagem com contornos destacados pelo detector de bordas de Canny.
(c) Imagem com pupila segmentada após aplicação da transforma circular de Hough.

Segmentação da íris

- Determinação da região de fronteira entre íris e esclera
 - Contornos da pupila e da íris considerados como circunferências concêntricas
 - Determinação do máx. local à direita do centroide por meio do cálculo do gradiente



(a) Caminho do gradiente (linha em branco) que se inicia no ponto equivalente ao centro da íris acrescido horizontalmente pelo raio da pupila (ponto em azul) e alcança o ponto de fronteira entre íris e esclera (ponto em vermelho).

(b) Raio da íris traçado sobre imagem original (arco em branco) a partir do centro da pupila e da íris (ponto em verde)¹.

¹Autoria própria.

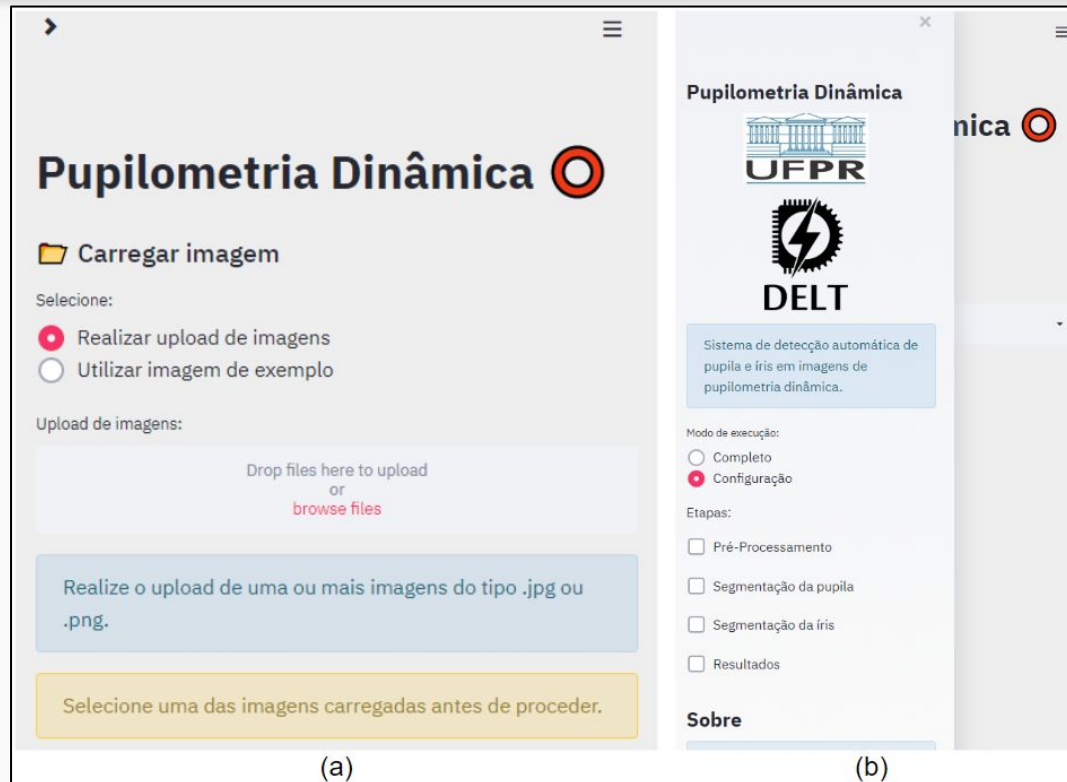
Avaliação de desempenho

- Comparação dos resultados
 - Anotações realizadas pelos especialistas 1 e 2 (valores reais)
 - Marcações obtidas pelo sistema (predições)
 - Melhor e pior caso verificados
- Cálculo das métricas MAE e RMSE

Resultados

- Sistema de detecção automática
- Avaliação de desempenho

Sistema de detecção automática



Início do sistema de detecção automática do raio da pupila e da íris. (a) Opções de carregamento de imagens para o processamento. (b) Modos de execução do sistema¹.

¹Autoria própria. <<https://pupilometria.herokuapp.com/>>

Sistema de detecção automática

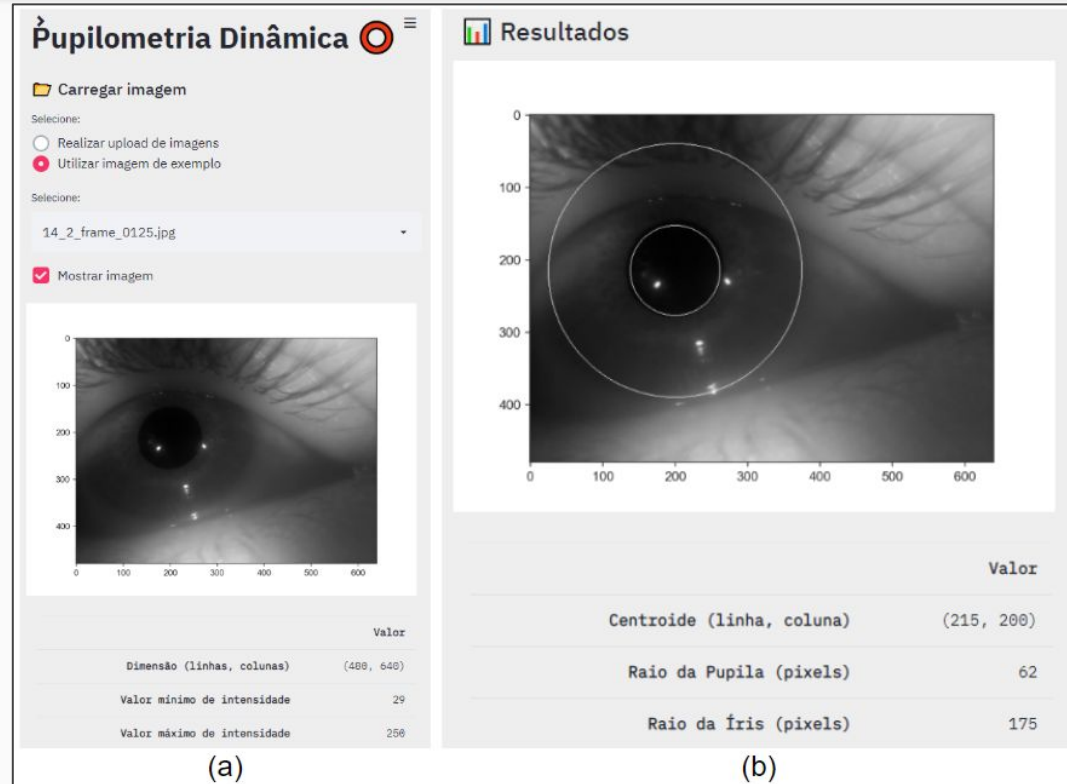


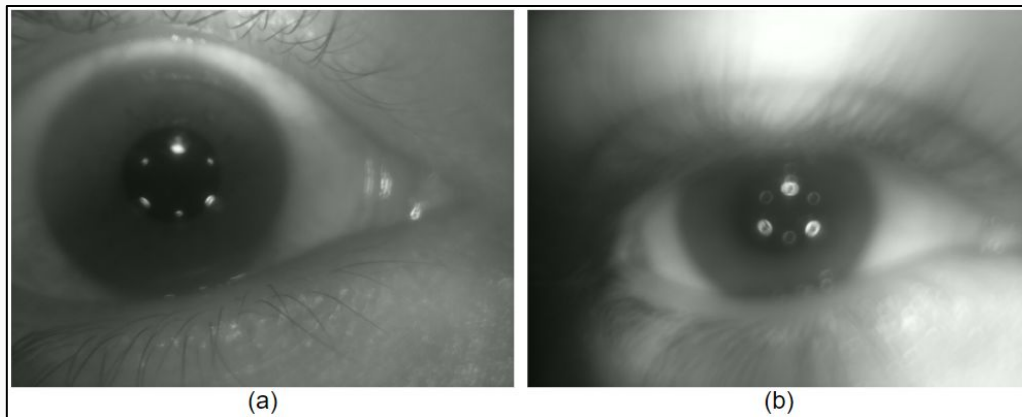
Imagem de entrada e os resultados obtidos no modo de execução de configuração. (a) Imagem de entrada.

(b) Imagem de saída com raio da pupila e da íris traçados em branco¹.

¹Autoria própria. <<https://pupilometria.herokuapp.com/>>

Avaliação de desempenho

- Cálculo das métricas MAE e RMSE
- Comparação dos resultados
 - Marcações obtidas pelo sistema
 - Anotações realizadas pelos especialistas 1 e 2
 - Melhor e pior caso verificados utilizando binarização global

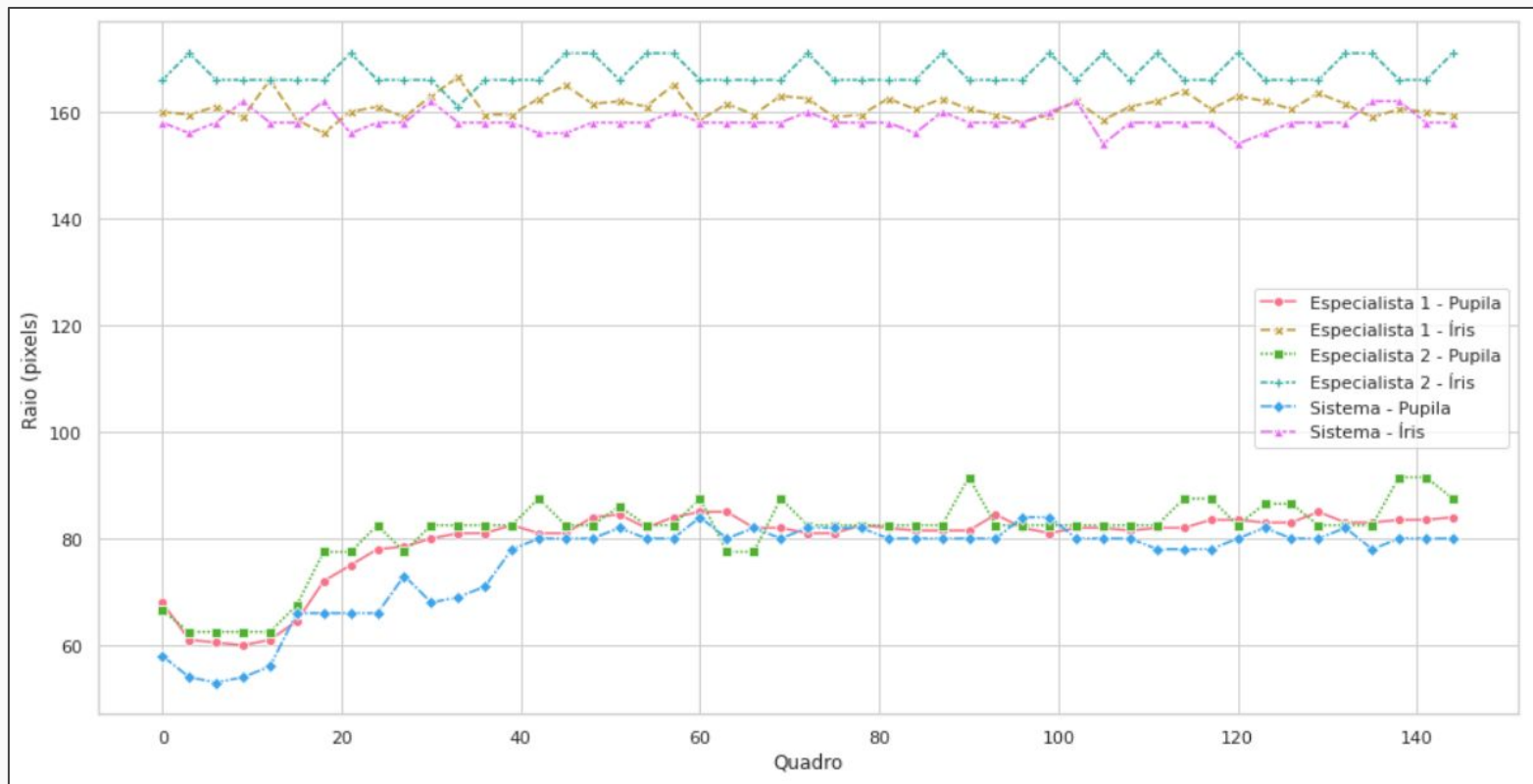


Primeiro quadro dos vídeos de pupilometria dos pacientes nº12 e nº1, ambos coleta de nº 1.

(a) Paciente nº 12. (b) Paciente nº 1¹.

¹Autoria própria.

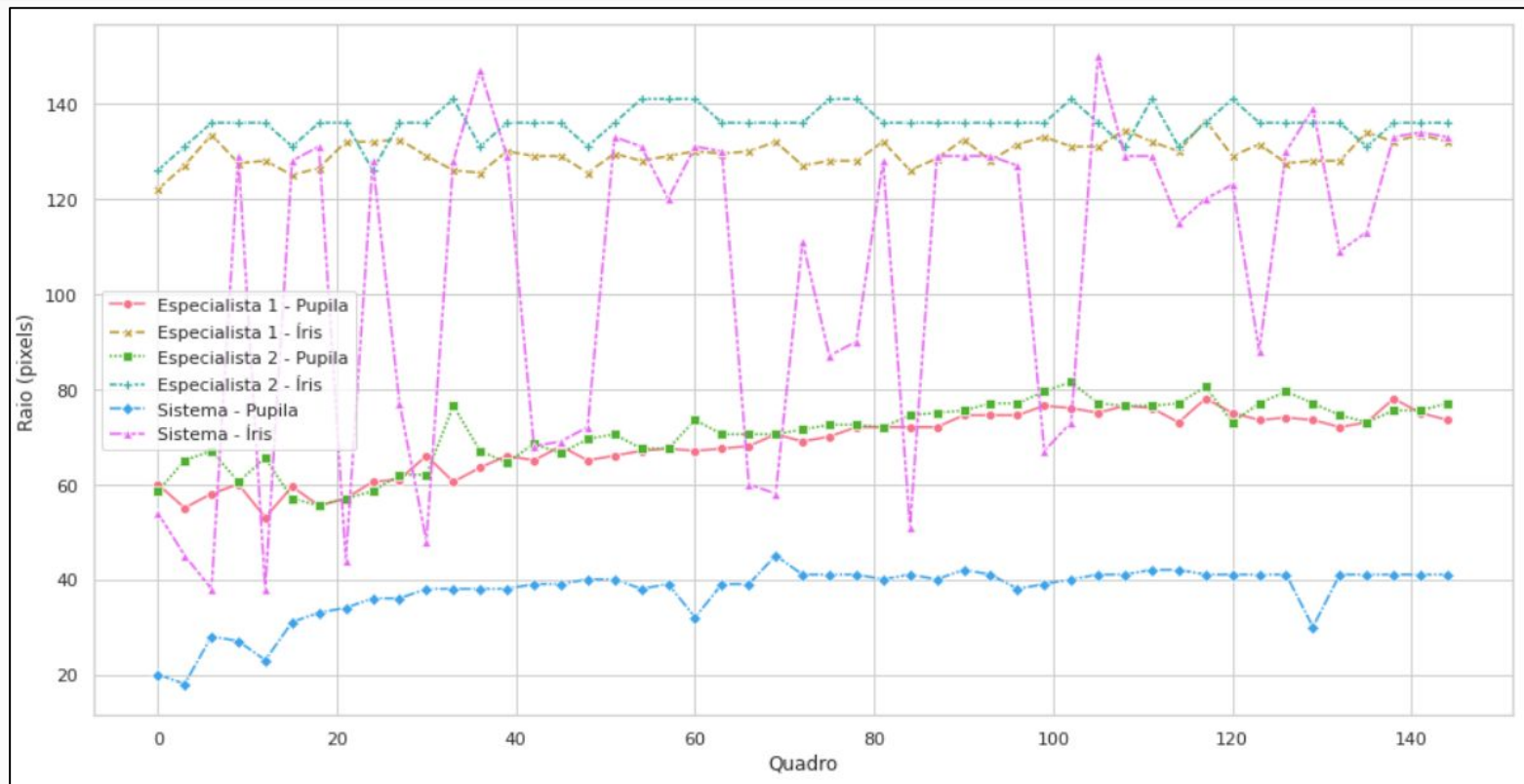
Avaliação de desempenho



Marcações dos raios da pupila e da íris para os quadros do vídeo de pupilometria do paciente nº 12 e coleta nº 1¹.

¹Autoria própria.

Avaliação de desempenho



Marcações dos raios da pupila e da íris para os quadros do vídeo de pupilometria do paciente nº 1 e coleta nº 1¹.

¹Autoria própria.

Avaliação de desempenho

	Pupila MAE	Pupila RMSE	Íris MAE	Íris RMSE
Especialista 1 x Sistema	4,031	5,101	3,337	4,039
Especialista 2 x Sistema	5,694	7,062	9,184	9,744
Média	4,863	6,082	6,260	6,892
Desvio padrão	0,832	0,981	2,923	2,852

Resultados das métricas MAE e RMSE para os raios da pupila e da íris referentes ao paciente nº 12 e coleta nº 1¹.

	Pupila MAE	Pupila RMSE	Íris MAE	Íris RMSE
Especialista 1 x Sistema	31,000	31,339	28,673	42,297
Especialista 2 x Sistema	33,316	33,823	33,102	46,253
Média	32,158	32,581	30,887	44,275
Desvio padrão	1,158	1,242	2,214	1,978

Resultados das métricas MAE e RMSE para os raios da pupila e da íris referentes ao paciente nº 1 e coleta nº 1¹.

¹Autoria própria.

Conclusão e Trabalhos Futuros

Conclusão

- Sistema de detecção automática de raio da pupila e da íris
- Disponibilização *online* e aberta
- Permite a configuração dos parâmetros envolvidos nos algoritmos
- Limitação de desempenho diretamente relacionada com a qualidade do material analisado

Trabalhos futuros

- Integração com dispositivo físico de captura de vídeo de pupilometria dinâmica
- Aprimoramento do algoritmo de tratamento de reflexos especulares
- Estudo de outros métodos de segmentação do raio da pupila e da íris
 - Aprendizado profundo (Deep Learning)

Referências

Referências

- CANNY, J F. A Computational Approach for Edge Detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 679:698, 1986.
- CASSIANO, G. Avaliação e alteração dos reflexos pupilares. Instituto Brasileiro de Treinamento e Pesquisa em Lentes de Contato.
- DIAS, A G Costa. Pupilometria dinâmica: uma proposta de rastreamento da posição e tamanho da pupila em tempo real. 2014. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- FERRARI, G L et al. *Using dynamic pupillometry as a simple screening tool to detect autonomic neuropathy in patients with diabetes: a pilot study*. BioMedical Engineering OnLine, v. 9, n. 26, 2010.
- GONZALEZ, R.; WOODS, R. Processamento Digital de Imagens. [S.I.]: Pearson, 2001. v. 3.
- HEROKU - Cloud Application Platform. Heroku.
- INTERNATIONAL DIABETES FEDERATION. IDF Atlas. 7. ed. Bruxelas, Bélgica, 2015.
- MUNDO EDUCAÇÃO. Estrutura interna dos olhos.
- PYTHON. Python Software Foundation. Python.

Referências

- SCIKIT-IMAGE - *Image Processing in Python*. scikit-image.
- SOARES, H. B. Análise e classificação de imagens de lesões da pele por atributos de cor, forma e textura utilizando máquina de vetor de suporte. 2008. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIABETES. Diretrizes da Sociedade Brasileira de Diabetes (2017-2018). 7. ed. São Paulo, Brasil, 2017.
- STREAMLIT - *The fastest way to build data apps*. Streamlit.
- YANO, V. Sistema biométrico multimodal baseado em pupilometria dinâmica. 2011. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. World Health Organization - *world health statistic 2018: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. 2018.

Obrigado!

Matheus Felipe Bosa - GRR20154661