

**FILIPPE AUGUSTO MANZI**

**APLICAÇÃO DE VISÃO  
COMPUTACIONAL PARA  
EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS  
EM IMAGENS DO OLHO HUMANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia de Computação com  
ênfase em Sistemas Embarcados

**ORIENTADOR: Evandro Luís Linhari Rodrigues**

São Carlos  
2007

## SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	2
LISTA DE FIGURAS .....	3
LISTA DE TABELAS .....	5
LISTA DE TABELAS .....	5
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUÇÃO .....	8
1.1. MOTIVAÇÃO .....	8
1.2. OBJETIVOS .....	8
1.3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	9
1.4. CRONOGRAMA .....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	10
2.1. VISÃO COMPUTACIONAL .....	10
2.2. BIOMETRIA .....	10
2.3. OLHO HUMANO .....	11
2.3.1. PUPILA .....	12
2.3.2. ÍRIS .....	13
2.4. CAPTURA DE IMAGENS DIGITAIS .....	13
2.5. IMAGENS DIGITAIS .....	15
2.5.1. ESPAÇOS DE COR .....	15
2.6. PROCESSAMENTO DE IMAGENS .....	16
2.6.1. SMOOTH .....	17
2.6.2. THRESHOLD .....	17
2.6.3. TRANSFORMADA DE HOUGH .....	18
2.6.4. CONVERSÃO RGB ESCALA DE CINZA .....	20
3. MÉTODOS E IMPLEMENTAÇÕES .....	21
3.1. ORGANIZAÇÃO DA APLICAÇÃO .....	21
3.2. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO .....	22
3.2.1. DEV-C++ .....	22
3.2.2. OPENCV .....	22
3.3. AQUISIÇÃO DE VÍDEOS .....	23
3.4. SOFTWARE .....	23
3.4.1. CAPTURA DOS QUADROS .....	23
3.4.2. PROCESSAMENTO PARA ENCONTRAR A PUPILA .....	24
3.4.3. IMAGENS BINÁRIAS .....	25
3.4.4. OBTENÇÃO DOS DADOS .....	27
3.5. ANÁLISE DOS DADOS .....	30
4. RESULTADOS .....	31
4.1. TESTES DE EXECUÇÃO .....	31
4.2. ANÁLISE DOS DADOS DOS TESTES .....	41
4.3. DIFICULDADES E LIMITAÇÕES .....	42
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
5.1. DISCUSSÃO .....	44
5.2. CONCLUSÃO .....	45
5.3. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Olho Humano .....	12
Figura 2 - Músculos do olho .....	12
Figura 3 - Câmera com CCD para cada componente de cor e matriz de detectores sensíveis a um tipo de cor.....	14
Figura 4 - Linha reta em imagem .....	18
Figura 5 - Retas no espaço de parâmetros .....	19
Figura 6 - Figura com círculo .....	19
Figura 7 - Círculos no espaço de parâmetros .....	20
Figura 8 – Diagrama de blocos da aplicação .....	21
Figura 9 - Diagrama de blocos do software.....	21
Figura 10 - Procedimento para identificar a pupila .....	24
Figura 11 - Círculo Vermelho indica local onde a pupila foi encontrada .....	25
Figura 12 - Pontos utilizados para determinar o threshold da pupila .....	26
Figura 13 - Imagem binária com a pupila destacada .....	26
Figura 14 - Pontos utilizados para cálculo do threshold da íris.....	26
Figura 15 - Imagem binária da íris e da pupila destacadas.....	26
Figura 16 - Eixo cartesiano com as retas que orientam os diâmetros.....	27
Figura 17 - Medição do diâmetro no eixo x. ....	28
Figura 18 - Imagem Binária com diâmetros calculados e traçados.....	29
Figura 19 - Diâmetros traçados na imagem original .....	29
Figura 20 - Diâmetro da íris .....	29
Figura 21 - Gráficos dos diâmetros da pupila e da íris – Voluntário 1 .....	34
Figura 22 - Gráfico da circularidade e da relação de diâmetros – Voluntário 1.....	34
Figura 23 - Variação do diâmetro da pupila no tempo – Voluntário 1.....	35
Figura 24 - Dados dos vídeos – Voluntário 1 .....	35
Figura 25 - Derivada dos vídeos – Voluntário 1 .....	36
Figura 26 - Diâmetros da pupila e íris - Voluntário 2 .....	37
Figura 27 - Circularidade e Relação diâmetros pupila/íris - Voluntário 2 .....	37
Figura 28 - Variação do diâmetro da pupila no tempo (derivada) - Voluntário 2.....	37
Figura 29 - Diâmetros da pupila e da íris de outro voluntário.....	38
Figura 30 - Circularidade e Relação dos diâmetros do olho de outro voluntário.....	38
Figura 31 - Derivada da curva do diâmetro da pupila de outro voluntário .....	38

Figura 32 - Diâmetros da pupila e íris obtidos de uma amostra ruim .....	39
Figura 33 - Circularidade e Relação dos diâmetros obtidas de uma amostra ruim .....	39
Figura 34 - Derivada da curva da pupila de uma amostra ruim .....	39
Figura 35 - Diâmetros da pupila e íris de voluntário com reação imperceptível ao estímulo luminoso .....	40
Figura 36 - Circularidade e Relação entre diâmetros com resposta imperceptível .....	40
Figura 37 - Derivada da curva de variação da pupila com variação imperceptível.....	40
Figura 38 - Gráfico mostrando os momentos em que há estímulo luminoso no olho....	41
Figura 39 - Pupila Elíptica: circularidade distante de 1.....	41
Figura 40 - Medidas na curva da derivada .....	42
Figura 41 - Movimentação do olho impede identificação da posição da pupila .....	43
Figura 42 - Parte da íris fora do campo da imagem impossibilita medir seu diâmetro ..	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Cronograma de atividades.....	9
Tabela 2 - Etapas do processamento de imagens .....	17
Tabela 3 - Dados no acumulador da transformada.....	18
Tabela 4 - Arquivos que compõem a aplicação .....	22
Tabela 5 - Funções de captura de quadro.....	23
Tabela 6 - Orientação dos diâmetros medidos .....	27
Tabela 7 - Tabela com dados de vídeo.....	31

Resumo do Projeto de Formatura apresentado à EESC-USP como parte dos requisitos necessários para a conclusão do curso de Engenharia de Computação.

## **APLICAÇÃO DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS EM IMAGENS DO OLHO HUMANO**

Filipe Augusto Manzi

São Carlos, 2007

**Orientador:** Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

**Área de Concentração:** Visão Computacional

**Palavras-chave:** Biometria, Pupila, Processamento de Imagens, Transformada de Hough, Threshold.

### **RESUMO**

As características físicas e comportamentais dos seres vivos podem ser medidas, tratadas e estudadas estatisticamente. A área do conhecimento que atua nesse sentido é chamada de biometria. Para seres humanos, a biometria tem aplicações principalmente em diagnósticos médicos e na identificação pessoal, já que muitas características biométricas são únicas em cada indivíduo. Algumas dessas características podem ser extraídas a partir de imagens do corpo e com o auxílio de sistemas de computação. O ramo da ciência e tecnologia que desenvolve aplicações para processamento de imagens é chamado de Visão Computacional. É possível extrair diversas informações processando imagens dos olhos ao longo do tempo como o desenho da íris e a variação do diâmetro da pupila. O presente projeto propõe o desenvolvimento de uma aplicação de visão computacional capaz de processar vídeos do olho humano quadro a quadro para identificar a variação do diâmetro da pupila ao longo do tempo e em resposta à variação da luminosidade a que está exposta. A aplicação utiliza a linguagem de programação C e é baseada em bibliotecas de processamento de imagens em tempo real de código aberto. A análise dos dados obtidos pelo processamento das imagens dos olhos pode indicar padrões e anomalias da reação pupilar que podem ser utilizados posteriormente em outras aplicações.

Abstract of Graduation Project presented to EESC-USP as a partial fulfillment of the requirements to conclude the Computer Engineering course

## **COMPUTER VISION APPLICATION FOR HUMAN EYE CHARACTERISTICS EXTRACTION IN IMAGES**

Filipe Augusto Manzi

São Carlos, 2007

**Advisor:** Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

**Concentration Area:** Computer Vision

**Keywords:** Biometrics, Pupil, Image Processing, Hough Transform, Threshold.

### **ABSTRACT**

Physical and behaviors characteristics in live organisms can be statistically measured, treated and studied. This knowledge area is called Biometrics. For human beings, biometrics is used mainly in medical diagnosis and personal identification, since some characteristics are unique for every person. Computer systems can be used to extract information in body's images. This scientific and technological area is called Computer Vision. It is possible to extract different information while processing eye images like the iris shape and draw and the pupil diameter variation in response to external light stimulus. This project proposes the development of a Computer Vision application to process eye video frames in order to measure the pupil diameter variation in response to light exposure. This is a C language application and uses open source computer vision libraries for real time processing. The image processed data analysis can be useful to indicate patterns and anomalies in pupil reaction to be used in other applications.

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. MOTIVAÇÃO**

As características físicas e comportamentais dos seres vivos podem ser medidas, tratadas e estudadas estatisticamente. A área do conhecimento que atua nesse sentido é chamada de biometria. Para os seres humanos a biometria tem aplicações principalmente na área médica, em especial diagnósticos, e na identificação de indivíduos. Existem diversas características biométricas que são únicas para cada humano e podem ser utilizadas como chave ou identificador pessoal.

Instrumentos e ferramentas são utilizados para fazer medições diretamente nos corpos dos seres vivos. Existe, porém algumas partes e características dos humanos que só podem ser medidas e analisadas através da análise de imagens e com o auxílio de máquinas e sistemas computacionais. O ramo da ciência e tecnologia que desenvolve aplicações de processamento de imagens é chamado de Visão Computacional.

Dos olhos é possível extrair diversas informações. A leitura e formação de imagens da íris e retina e a medição do diâmetro da pupila são exemplos dessas informações. Esses dados são muito difíceis e até impossíveis de serem medidos sem o auxílio de sistemas de captura e análise de imagens. Medir a variação do diâmetro da pupila ao longo do tempo e a reação a estímulos luminosos pode fornecer diversas informações sobre o indivíduo acerca do seu nível de atenção e estresse, indicar a presença de doenças neurodegenerativas e lesões cerebrais [1] e até indicar se uma pessoa está potencialmente sob efeito de drogas. Existem pesquisas ainda que buscam encontrar padrões na variação do diâmetro da pupila. Esses padrões, caso sejam únicos para cada indivíduo poderiam ser utilizados para identificação.

Muitos trabalhos de visão computacional e extração de características dos olhos já foram desenvolvidos. O desenvolvimento de aplicações para essa finalidade pode ser facilitado com a utilização de bibliotecas de processamento de imagens já em avançado estágio de desenvolvimento. A biblioteca Open Source Computer Vision (OpenCV) é uma biblioteca de código aberto com várias implementações úteis para desenvolver aplicações para processamento de imagens em tempo real.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo desse projeto é desenvolver uma aplicação de Visão computacional com o auxílio da biblioteca OpenCV capaz de extrair as características do olho humano. Essa aplicação processa imagens estáticas e vídeos de olhos para extrair o diâmetro médio da pupila, sua circularidade (índice de quão circular ela é) e o diâmetro da íris. Esses dados são usados para observar o comportamento da pupila em reação a estímulos luminosos.



### 1.3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido com recursos próprios do autor e com o auxílio de um aparelho desenvolvido para captação de imagens do olho disponível no LAVI, Laboratório de Visão Computacional do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos.

Os softwares utilizados são todos livres e não necessitam de recursos adicionais. Toda a aplicação foi desenvolvida em um computador portátil com processador Pentium 4 de 3,33GHz com 1 Gigabyte de memória RAM e 60 Gigabytes de espaço em disco rígido de 4200 rpm.

O processamento de imagens é pesado e ocupa muita memória. Desta forma, as implementações buscaram otimizar a uso de memória RAM para evitar a utilização da memória de swap com o disco rígido, que torna o processamento extremamente lento. O código fonte da aplicação foi devidamente comentado e diversas observações foram feitas para facilitar o entendimento do mesmo.

### 1.4. CRONOGRAMA

A metodologia geral empregada para atingir os objetivos neste projeto pode ser dividida em seguintes etapas. O cronograma seguido é apresentado na tabela 1.

1. Elaboração do Plano de trabalho
2. Pesquisa bibliográfica
3. Configuração do ambiente de desenvolvimento
4. Desenvolvimento da aplicação
5. Testes e obtenção de dados
6. Análise estatística dos dados
7. Redação de Monografia e elaboração de apresentação

**Tabela 1 - Cronograma de atividades**

Atividade	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1. VISÃO COMPUTACIONAL**

A Visão Computacional pode ser definida como o conjunto de métodos e técnicas que tornam sistemas computacionais capazes de extrair e interpretar informações de imagens. O desenvolvimento de algoritmos computacionais capazes de extrair informações presentes em uma imagem é fortemente influenciado pela compreensão dos processos de aquisição de imagens e de sua percepção no sistema visual do homem e de outros animais [2]. Um dos maiores objetivos da Visão Computacional é buscar um modelo de representação genérico que se aproxime da visão biológica, objetivo esse ainda longe de ser alcançado.

Os primeiros estudos mais aprofundados e específicos de visão computacional datam do final da década de setenta, quando os computadores já tinham capacidade de processamento suficiente para processar grandes conjuntos de dados, como são as imagens. Por essa razão, esse ramo é relativamente novo e a maior parte dos trabalhos, aplicações e abordagens estão orientadas à solução de problemas práticos e específicos ou em estágio de pesquisa.

A visão computacional engloba e pode ser aplicada a diversas áreas do conhecimento: inteligência artificial (inteligência computacional), aprendizado de máquina (visão cognitiva), processamento de sinais, física (ótica), matemática, neurobiologia (visão biológica), robótica (visão de robôs).

Aplicações da Visão Computacional podem ser encontradas como parte de sistemas complexos. São exemplos desses sistemas equipamentos para processamento de imagens médicas e aplicações industriais para controle de qualidade ou medição de características de produtos. Além dessas duas áreas mais proeminentes, a visão computacional pode ser aplicada no reconhecimento de pessoas e padrões, segurança de ambientes, visão de robôs, aplicações militares (mísseis guiados, por exemplo) e várias outras atividades que dependem da visão biológica. Muitos trabalhos que necessitam da visão humana são repetitivos, alguns perigosos, e até podem prejudicar esse importante sentido. Os sistemas computacionais de visão podem realizar esses trabalhos e são capazes de realizar outros os quais a visão humana não é capaz.

### **2.2. BIOMETRIA**

A palavra biometria tem sua origem no idioma grego significando o prefixo bio, vida e metria, que deriva de metron, medida. Biometria significa “medida da vida”.

Biometria é o estudo estatístico das características físicas ou comportamentais dos seres vivos [3]. Atualmente este termo é associado à identificação de pessoas através de medidas das características físicas ou comportamentais únicas de cada indivíduo. É comum utilizar dados biométricos também em aplicações médicas.

A biometria e a identificação biométrica não são recentes. A papiloscopia (estudo das impressões digitais) é utilizada há muito tempo como forma de identificação, principalmente na área criminal. Um método antigo de identificar biometricamente um indivíduo era infligir cicatrizes, tatuagens ou marcas em alguma parte de seu corpo. Em alguns casos, até mutilação era usada como forma de identificação biométrica.

A computação aumentou as possibilidades da biometria: tornou mais fácil a utilização de técnicas antigas como as impressões digitais e permitiu que outras características fossem obtidas a partir de imagens do corpo humano. Dentre essas características pode-se citar o reconhecimento dos desenhos da íris ou da retina (vasos sanguíneos da retina), o reconhecimento da face, da voz, da geometria da mão, da geometria das veias do corpo. O reconhecimento de assinaturas também pode ser enquadrado como atividade de biometria.

Existem três processos chave que devem ser aplicados por um sistema biométrico de identificação: captura, extração e comparação. A captura é a aquisição de uma amostra biométrica que será armazenada. A extração é a aquisição de uma amostra no momento em que a identificação é necessária. A comparação é feita entre a amostra obtida na captura com a amostra obtida no processo de extração. Caso haja similaridade suficiente, a amostra é validada.

Na área médica, a biometria está presente principalmente em equipamentos para diagnóstico e monitoração.

### **2.3. OLHO HUMANO**

Os olhos são órgãos capazes de captar a luz refletida por tudo que está a nossa volta. Essa luz é transformada em sinais elétricos que são enviados ao cérebro através do nervo ótico e lá são interpretadas como imagens. A interpretação das imagens no cérebro compõe o sentido da visão.

A entrada da luz no globo ocular se dá pela córnea, um tecido transparente que cobre toda a íris do olho. A luz, então, passa pela pupila e atinge o cristalino, que atua como uma lente de focalização, fazendo todos os raios convergirem em um ponto chamado retina. A retina é composta por milhões de células fotossensíveis que podem ser de dois tipos: os bastonetes e os cones. Os bastonetes são responsáveis pela percepção de claro e escuro e os cones respondem pela percepção das cores. É na retina que os estímulos de luz são convertidos em impulsos eletroquímicos, que serão transmitidos ao cérebro pelo nervo ótico. No cérebro, o córtex visual recebe os impulsos dos dois olhos, faz o processamento e completa a sensação visual. A informação enviada pelos dois olhos processada simultaneamente nos dá a percepção de profundidade.

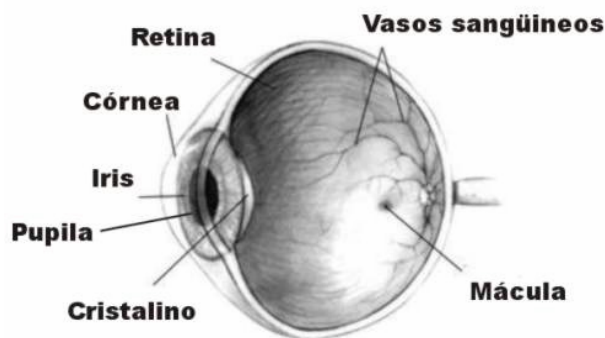


Figura 1 - Olho Humano [4]

A movimentação do olho é feita por seis músculos. Completam a estrutura do olho as pálpebras, que atuam como proteção dos olhos e em conjunto com as glândulas lacrimais atuam na lubrificação do globo ocular. Pêlos, denominados cílios, atuam como proteção do olho contra partículas maiores.

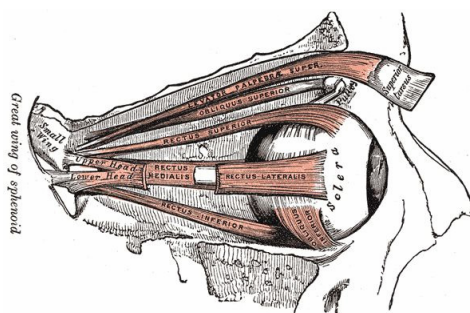


Figura 2 - Músculos do olho [3]

Nas sub-seções seguintes são detalhadas as duas partes do olho de interesse desse trabalho: a pupila e a íris.

### 2.3.1. PUPILA

A pupila é responsável por regular a entrada de luz no olho. Músculos contraem e relaxam para aumentar ou diminuir seu diâmetro. A pupila diminui seu diâmetro conforme aumenta a intensidade da luz a que o olho é exposto e aumenta na situação oposta, quando a intensidade de luz diminui. Apesar de ter a aparência preta, a pupila é translúcida.

A biometria da pupila tem hoje aplicação principalmente médica. A medição das características físicas da pupila pode ser utilizada por oftalmologistas para detectar patologias e planejar cirurgias de correção de ametropias oculares [5].

Alterações no tempo de reação da pupila, bem como alteração dos diâmetros em diferentes situações, podem indicar problemas, em geral relacionados à resposta cerebral. Após uma situação de choque como um acidente, por exemplo, é comum avaliar a reação da pupila ao estímulo luminoso. Caso sejam detectadas anomalias na reação, isso pode indicar algum tipo de

lesão cerebral. O uso de algumas substâncias, como remédios e algumas drogas, também é capaz de gerar alterações na reação pupilar. Dá-se o nome de Midríase à dilatação da pupila e Miose à diminuição de seu diâmetro.

Pode-se comparar o funcionamento da pupila ao diafragma de uma máquina fotográfica [6, 7]. Além de controlar a luminosidade que incide na retina, ela também regula a profundidade focal [8]. Ao focalizar objetos distantes, o diâmetro da pupila diminui, e aumenta na situação oposta [4]. Além dos fatores previamente citados, o estado emocional e de atividade cerebral (estado de alerta ou distração) também causam alteração no diâmetro da pupila.

### **2.3.2. ÍRIS**

A íris é uma membrana circular localizada entre a córnea e o cristalino. É a parte que dá cor ao olho. Em seu centro está a pupila. É a íris que controla o tamanho da abertura da pupila. Tem cerca de doze milímetros de diâmetro [17].

O desenho formado pela íris tem características únicas em cada indivíduo. Por essa razão, a biometria da íris é muito utilizada na identificação de pessoas. A obtenção de dados sobre a íris não é foco desse trabalho.

## **2.4. CAPTURA DE IMAGENS DIGITAIS**

Ao criar sistemas computacionais para processar imagens estamos tentando simular o comportamento do sistema de visão biológico. Os computadores trabalharão no processamento das imagens, assim como o nosso cérebro faz com as imagens captadas pelos olhos. Dessa forma, os sistemas de visão computacional precisam de algum dispositivo que seja capaz de transformar as imagens reais, que são estímulos de luz, em algum formato que o computador é capaz de processar: as imagens digitais. Esses dispositivos são as câmeras e realizam uma função básica: convertem luz em carga elétrica que posteriormente será interpretada como bits.

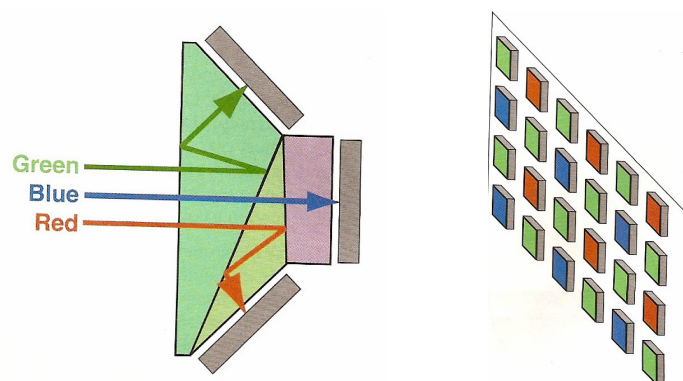
O tipo mais comum de câmera utilizado para criar imagens e vídeos digitais é o CCD (charge-coupled device). Os CCDs são circuitos integrados de estado sólido que contém vários diodos que atuam armazenando a luz a que são expostos (fotodetectores). A luz que entra no semicondutor do chip faz com que elétrons da camada de valência atinjam a camada de condução [9]. A quantidade de elétrons que muda de camada é diretamente proporcional à intensidade de luz. Cada diodo representa um pixel da imagem e o valor de carga elétrica medida nesse pixel será convertido em informação digital.

Os CCDs são formados por fotolitografia e são alinhados em um padrão perfeito que não gera distorções nas imagens e são insensíveis a ruídos externos. Foram criados e patenteados pelo Bell Labs em 1969 e muito desenvolvidos para o programa espacial da Nasa, já que geravam imagens de qualidade em satélites e no espaço a um baixo custo [8].

Os fotodetectores formam uma matriz de dados que representa a imagem. Como existem centenas de milhares de fotodetectores em um CCD é praticamente impossível ligar

todos a fios para fazer a leitura da carga acumulada em cada um. A leitura das informações dos pixels é feita uma linha de cada vez. As linhas da matriz são deslocadas até uma linha base onde é feita a leitura. Nessa linha, a carga de cada pixel é determinada gerando um sinal analógico do valor. O deslocamento das cargas até a linha de leitura é feito através de variações de tensão, aplicadas em diferentes pontos dos pixels.

Para captar as cores existem três técnicas que são comumente utilizadas. A primeira consiste em utilizar filtros para as três componentes da luz básicas: vermelho, verde e azul (RGB). Três filtros de cor, um para cada componente, são montados em um disco. O movimento circular desse disco controla a exposição do CCD a cada componente de cor gerando valores que irão compor a cor cada pixel. No disco de filtros ainda há normalmente um espaço sem filtro algum que possibilita a captação de imagens monocromáticas. A segunda configuração para captar cores consiste na utilização de três CCDs, um para cada componente de cor. Um prisma separa e direciona a luz de cada cor para seu CCD específico. Os dados captados das três cores irão compor a cor de cada pixel. A terceira técnica é a utilização de um chip com matriz de detectores onde cada elemento é sensível a um tipo de luz básica (RGB). Filtros direcionam a luz para os receptores corretos e controlam para que a intensidade de exposição de cada componente seja a mesma. Através de técnicas de interpolação é possível completar os dados e obter as três componentes de cor para cada pixel.



**Figura 3 - Câmera com CCD para cada componente de cor e matriz de detectores sensíveis a um tipo de cor [9]**

O principal competidor das câmeras CCD são as câmeras CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). O processo de manufatura dos sensores de luz CMOS é muito parecido com o processo utilizado na produção de circuitos integrados comuns [9] o que os torna baratos e ocupam menor espaço. É possível construir no mesmo circuito e com a mesma tecnologia o sensor de luz e quaisquer outros elementos como amplificadores. Esses sensores, porém, são mais suscetíveis a ruídos e são menos sensíveis a luz do que os sensores CCD e portanto capturam imagens com pior qualidade.

## 2.5. IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital representa uma imagem de duas dimensões como uma sequência finita de valores digitais. Cada um desses valores representa um pixel, que é o menor elemento que compõe uma imagem digital ou uma componente de cor de um pixel no caso de imagens coloridas.

O valor de cada pixel é obtido pela quantização do sinal analógico (carga elétrica) obtido pelo dispositivo de captura, como o CCD. Esse valor varia conforme a quantidade de bits atribuída a cada pixel bem como o tipo de dado em que esse valor é armazenado. Existem três tipos de imagens principais:

- *Imagens binárias*: cada pixel pode assumir os valores 0 ou 1 e ocupam 1 bit. Normalmente são resultado de algum processamento de imagem ou são utilizadas em dispositivos que só lidam com esse tipo de imagem, como aparelhos de fax e monitores monocromáticos.
- *Imagens em escala de Cinza*: cada pixel é representado por apenas por um valor.
- *Imagens Coloridas*: nessas imagens, cada pixel é representado por pelo menos três informações, uma para cada canal de cor (RGB, por exemplo). O valor de cada canal e a composição da imagem colorida depende do Espaço de cores utilizado.

A quantidade de níveis de cor que uma imagem pode representar depende da profundidade do pixel, isto é, da quantidade de bits utilizada para representar cada informação. Em uma imagem em escala de cinza com 8 bits por pixel, por exemplo, é possível representar 255 níveis da cor cinza, desde o preto até o branco. Em muitas situações o olho humano não é capaz de distinguir todos os níveis de cores que uma imagem pode apresentar, mas esses níveis podem ser muito úteis em processamento de imagens.

### 2.5.1. ESPAÇOS DE COR

Um espaço de cor é um método para especificar, criar e visualizar cores [10]. São necessárias pelo menos três informações sobre um ponto de uma imagem para interpretar a cor. Nossos cérebros identificam as cores através das informações de brilho (percepção de mais ou menos luz em um ponto), a matiz (percepção de qual cor visível, vermelho, amarelo verde ou azul, um ponto está mais próximo) e saturação (percepção da intensidade que um ponto da imagem apresenta sua matiz). Em computação, uma cor pode ser representada pela quantidade de emissão de luz vermelha, verde e azul (RGB) necessária para obter a percepção da cor desejada.

O espaço RGB é o mais comumente utilizado na computação. É um modelo aditivo baseado na teoria tri-cromática. É um espaço de cor que depende do dispositivo de exibição: em

diferentes monitores CRT (Cathode Ray Tube), por exemplo, a cor pode ser interpretada diferentemente por um observador.

Outro espaço de cor é o CMY(K), (Cyan, Magenta, Yellow, Black) que é subtrativo. É utilizado principalmente por impressoras. A cor das imagens com a combinação das cores ciano, magenta e amarela e opcionalmente com a cor preta. A conversão RGB para CMY(K) pode ser feita através dos seguintes cálculos:

$$ciano = 1 - vermelho$$

$$magenta = 1 - verde$$

$$amarelo = 1 - azul$$

Existem outros espaços de cor e variações como o HSL (Hue, Saturation and Lightness), que são alterações do espaço RGB. Cada um tem suas vantagens e desvantagens para aplicações diferentes.

## **2.6. PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

A disciplina Processamento de Imagens vem do Processamento de Sinais [11]. As imagens, como os sinais, são representações da realidade física e carregam informações. Ao processar uma imagem estamos interessados em extrair informações mais facilmente. O sistema visual humano processa e extrai informações de imagens a todo momento e utilizar máquinas para realizar a mesma atividade é extremamente complexo e exige diversos conhecimentos e abstrações. Essa característica de complexidade faz com que o processamento de imagens tenha hoje extrema dependência do sistema e da atividade a que está relacionado não existindo sistemas e soluções generalistas.

Comumente buscamos informações quantitativas ao processar as imagens. Diversas disciplinas científicas atuais utilizam processamento de imagens: ciências dos materiais, biofísica e biometria, física espacial.

As técnicas de processamento que foram desenvolvidas podem ser classificadas em duas grandes linhas: análise e melhoria (enhancement). A análise está relacionada à parametrização e descrição das informações dentro da imagem. A melhoria está relacionada ao tratamento feito nas imagens para corrigir defeitos ou ressaltar informações a fim de facilitar a análise.

Um sistema de processamento de imagens pode de maneira geral dividido em seis etapas, apresentadas na tabela 2 [11].

As imagens podem ser processadas no domínio do espaço ou da frequência. De acordo com os objetivos, diferentes técnicas podem ser aplicadas nesses dois domínios. Em geral, o processamento nos domínios do espaço e frequência é utilizado na etapa de Melhoramento das imagens. As principais técnicas para segmentação da informação são o *thresholding*, que é a aplicação de valores e critérios para realçar partes de interesse da imagem e a detecção de



bordas. É comum utilizar imagens binárias na etapa de parametrização, pois elas normalmente facilitam o processamento e existem diversas técnicas com desenvolvimento avançado para esse tipo de imagem.

**Tabela 2 - Etapas do processamento de imagens**

1	Aquisição da imagem	Amostragem, armazenamento e eventual compactação
2	Melhoramento (enhancement)	Pré-tratamento digital da imagem
3	Segmentação da informação	Extração de “objetos” e partes da imagem
4	Parametrização	Determinação de grandezas dos objetos, forma, descrição estrutural.
5	Reconhecimento	Classificação dos objetos
6	Análise quantitativa e aplicação da ferramenta a outras áreas da ciência	Associação das grandezas medidas ao problema

Nas subseções seguintes são descritas algumas técnicas e métodos utilizados nesta aplicação.

#### **2.6.1. SMOOTH**

A operação de smooth quando aplicada a uma imagem tem a intenção de melhorar sua qualidade. Ela busca suavizar a imagem eliminando pontos que estejam fora de um padrão esperado. A forma mais comum dessa operação é calcular o valor médio dos pixels que estejam na vizinhança de um pixel que está sendo analisado. Caso o valor do pixel seja muito diferente do valor médio dos pixels vizinhos, ele é interpretado como ruído e seu valor é corrigido.

A eliminação de ruídos através da técnica de smooth facilita a aplicação de algoritmos de segmentação e reconhecimento posteriores.

#### **2.6.2. THRESHOLD**

Identificar partes de interesse em uma imagem é uma das etapas mais críticas no processamento de imagens. Uma das maneiras mais simples e eficazes de selecionar um determinado objeto ou parte em uma cena é através da operação de *threshold*.

*Threshold* é um valor limite que é usado em um critério de seleção. Todos os pixels de uma imagem são comparados a esse critério de seleção e são alterados conforme a necessidade. Um exemplo de aplicação de *threshold* é comparar todos os pixels a um valor limite e caso sejam maiores não alterar seu valor e, caso sejam menores, igualar a zero. Desta forma destaca-se uma região da imagem.

Comumente a operação de *threshold* gera imagens binárias ou em níveis de cinza. Conforme a aplicação, qualquer outro tipo de destaque da região de interesse pode ser usado como aplicar cores diferentes. Essa operação pertence à etapa de segmentação do processamento de imagens. Uma vez destacada a parte de interesse, a etapa de parametrização pode ser executada.

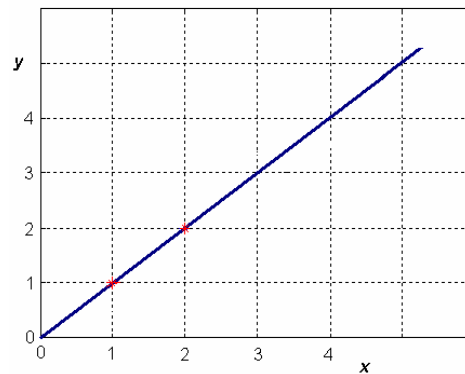
### 2.6.3. TRANSFORMADA DE HOUGH

A transformada de Hough foi desenvolvida por Paul Hough em 1962 e patenteada pela IBM. Foi concebida para identificar linhas, círculos e elipses em imagens binárias e é uma importante ferramenta no processamento de imagens digitais. A transformada é normalmente aplicada a uma imagem que passou anteriormente pela operação de reconhecimento de bordas [12].

O conceito da transformada é mapear um pixel da imagem em uma curva no espaço de parâmetros da forma que se deseja identificar. No caso da identificação de retas a equação

$$y = ax + b$$

Os valores  $x$  e  $y$  dos pontos da imagem são utilizados para traçar uma curva no espaço de parâmetros  $a$  e  $b$ . Todos os pixels que são processados (de uma borda, por exemplo) e os parâmetros  $a$  e  $b$  são armazenados em um acumulador de duas dimensões. Em um exemplo, uma figura tem uma reta que passa pelos pontos (1,1) e (2,2).



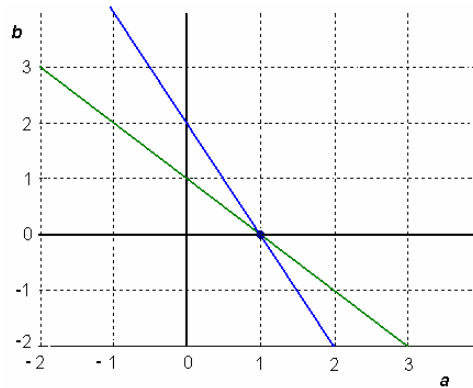
**Figura 4 - Linha reta em imagem [12]**

Se o valor de  $a$  variar no intervalo  $[-2,3]$  poderemos calcular o valor de  $b$ . Obteremos os seguintes dados:

**Tabela 3 - Dados no acumulador da transformada**

$x$	$Y$	$a$	$b = -ax + y$	Acumulador $A(a,b)$ incrementado
1	1	-2	3	$A(-2,3)$
1	1	-1	2	$A(-1,2)$
1	1	0	1	$A(0,1)$
1	1	1	0	$A(1,0)$
1	1	2	-1	$A(2,-1)$
1	1	3	-2	$A(3,-2)$
2	2	-2	6	$A(-2,6)$
2	2	-1	4	$A(-1,4)$
2	2	0	2	$A(0,2)$
2	2	1	0	$A(1,0)$
2	2	2	-2	$A(2,-2)$
2	2	3	-4	$A(3,-4)$

Esses mesmos pontos irão gerar duas retas que se cruzam no espaço de parâmetros, justamente onde o acumulador tem o maior valor. No caso, A(1,0) foi incrementado duas vezes.



**Figura 5 - Retas no espaço de parâmetros [12]**

Para os valores de  $a=1$  e  $b=0$  temos a reta  $y=1x+0$ , ou seja  $y=x$  é a equação da reta encontrada nessa imagem, reta essa que existe.

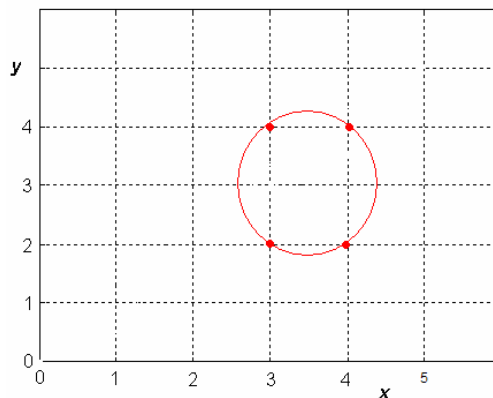
Duda e Hart [13] sugeriram um procedimento similar utilizando, porém utilizando como equação de reta [14]

$$\delta = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$$

E sugeriram também a utilização do processo para identificar circunferências. A equação de uma circunferência é

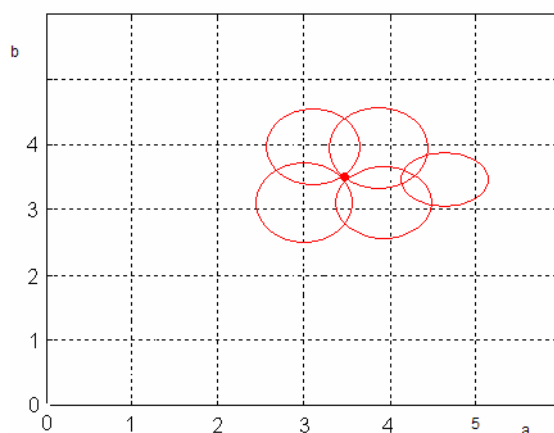
$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = c^2$$

Onde  $a$  e  $b$  são as coordenadas do centro da circunferência e  $c$  seu raio de curvatura. Para cada pixel da imagem é gerada uma circunferência no plano de parâmetros  $(a,b)$  e são armazenadas no acumulador. O cruzamento de circunferências no plano de parâmetros irá indicar as coordenadas do centro da circunferência que queremos identificar.



**Figura 6 - Figura com círculo**

Se estivermos procurando círculos nessa figura com um raio fixo  $r$ , iremos obter uma imagem no espaço de parâmetros similar a essa:



**Figura 7 - Círculos no espaço de parâmetros**

Neste exemplo, no ponto (3,5, 3,5) há a sobreposição das circunferências gerada a partir dos quatro pontos da figura 5. Esse ponto é o centro da circunferência de raio  $r$ . O valor de  $r$  é importante e necessário nos cálculos para detectar as circunferências e torna mais complexa a operação fazendo necessário um acumulador tridimensional. Uma opção é limitar a variação de  $r$  ou tentar utilizar outras técnicas para determinar o valor do raio para posteriormente utilizar a transformada de Hough para encontrar o centro da circunferência.

#### **2.6.4. CONVERSÃO RGB ESCALA DE CINZA**

Algumas operações do processamento de imagens são facilitadas quando os pixels têm apenas uma dimensão, ou seja, a imagem é em escala de cinza ou binária. A aplicação da transformada de Hough é um exemplo: processar três canais de cor para identificar retas e círculos seria complexo e dispendioso, além de envolver processamento desnecessário.

Existem diversas fórmulas que são utilizadas para converter imagens RGB em escala de cinza. A idéia é somar valores proporcionais de cada uma das componentes de cor para obter o valor da luminância de um pixel. No caso dessa aplicação, a seguinte proporção é utilizada na soma das componentes RGB:

$$Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$$

Desta forma, as três informações referentes a um pixel colorido são transformadas em uma informação referente a um pixel em escala de cinza. A informação de luminância pode ser representada por valores inteiros ou reais.

### 3. MÉTODOS E IMPLEMENTAÇÕES

#### 3.1. ORGANIZAÇÃO DA APLICAÇÃO

A Aplicação de Visão Computacional para Extração de Características em Imagens do Olho Humano pode ser representada através do diagrama de blocos apresentado na figura 7.



Figura 8 – Diagrama de blocos da aplicação

Os três blocos finais do diagrama da aplicação correspondem às implementações de software. Toda a parte de software foi desenvolvida utilizando bibliotecas, compiladores e ambiente de desenvolvimento livre, no caso a OpenCV (Open Source Computer Vision Library) e o Bloodshed Dev-C++.

O software de processamento dos vídeos pode ser representado pelo diagrama de blocos da figura 8.

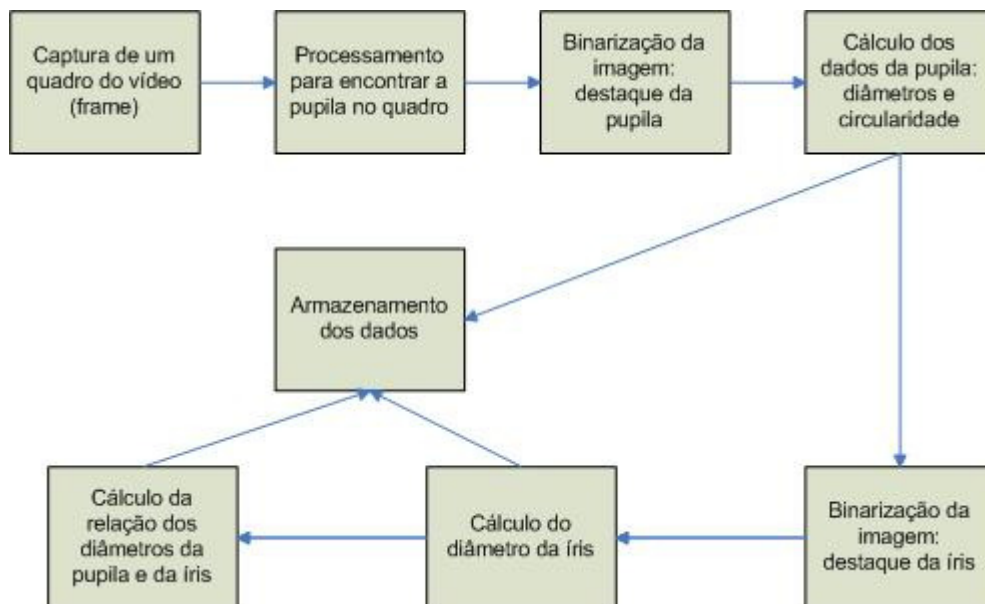


Figura 9 - Diagrama de blocos do software

A aplicação faz a medição do diâmetro da pupila em quatro orientações diferentes e com esses diâmetros é possível calcular a circularidade da pupila e o diâmetro médio. Posteriormente, o diâmetro da íris orientado pelo eixo x é calculado. Por fim, a relação entre os diâmetros da pupila e da íris é calculada e todos os dados são armazenados em arquivos de texto para análise.

Além do programa principal, outros 3 arquivos cpp e seus respectivos headers compõem a aplicação. A tabela abaixo apresenta esses arquivos.

**Tabela 4 - Arquivos que compõem a aplicação**

<b>Arquivo</b>	<b>Principais funções</b>
Main.cpp	Rotina do programa principal
videomng.cpp videomng.h	Rotinas de captura dos frames Rotinas para encontrar a pupila na imagem Rotinas de threshold Rotinas para calcular os diâmetros da pupila e íris
diameters.cpp diameters.h	Rotinas que identificam as bordas da pupila e íris e calculam a distância entre as bordas
statistics.cpp statistics.h	Rotinas que calculam circularidade, diâmetro médio

As seções seguintes irão detalhar as ferramentas utilizadas e cada bloco que compõe a aplicação de visão computacional.

## **3.2. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO**

### **3.2.1. DEV-C++**

O bloodshed Dev-C++ é um ambiente de desenvolvimento integrado (Integrated Development Environment – IDE) para as linguagens de programação C e C++ [15]. Utiliza o compilador mingw que faz parte do pacote de compiladores GCC (GNU Compiler Collection).

O Dev-C++ foi escolhido para compor o ambiente de desenvolvimento por ser um software livre e de fácil configuração e integração com outras bibliotecas como o OpenCV, também utilizado nesse projeto.

### **3.2.2. OPENCV**

A OpenCV (Open Source Computer Vision Library) é uma biblioteca de funções de programação de aplicações de visão computacional em tempo real [16]. Desenvolvida originalmente pela Intel, a biblioteca pode ser usada para desenvolvimento em Linux, Windows e Mac OS X.

Entre as aplicações da biblioteca estão a identificação de objetos, segmentação e reconhecimento de imagens, reconhecimento de faces e gestos, captura de movimentos e reconhecimento de bordas.

Uma série de exemplos de aplicação acompanha o pacote de instalação da biblioteca. Esses exemplos podem servir de base para o desenvolvimento de softwares de visão

computacional. Uma vez instalada a biblioteca, deve-se adicionar ao caminho padrão do sistema (PATH) as pastas onde estão os arquivos que serão utilizados na compilação futura.

### **3.3. AQUISIÇÃO DE VÍDEOS**

Os vídeos utilizados nesse projeto foram captados com um dispositivo disponível no LAVI (Laboratório de Visão Computacional) do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos. O dispositivo é composto de uma estrutura de PVC similar a um binóculo. Em um dos olhos é feita a captura de imagem com uma câmera apropriada. Como a captura é feita com a ausência de luz visível para não influenciar a reação da pupila, LEDs (Light Emission Diodes) de luz infravermelha são utilizados como fonte de luz para tornar possível a captação.

No outro olho acontece a estimulação visual. Uma fonte de luz que é controlada através da porta paralela de um computador permite que 255 diferentes níveis de intensidade sejam aplicados. Quando um olho é submetido a um estímulo, o outro olho que está sendo filmado na ausência de luz visível reage da mesma maneira, ou seja, quando o olho é submetido à luz, dilata e faz com que o olho no escuro dilate da mesma forma. Os dois olhos respondem da mesma maneira mesmo quando apenas um é estimulado.

O sinal de vídeo gerado pelo dispositivo é capturado com a utilização de uma placa de vídeo de captura e softwares apropriados. Todos os vídeos utilizados na aplicação devem ter resolução de 640 por 480 pixels e as imagens dos quadros não podem ter compactação nenhuma para que possam ser utilizados com as bibliotecas da OpenCV. Os vídeos que não têm essas condições devem ser convertidos com a utilização de programas apropriados. Devido a essa resolução e a ausência de qualquer tipo de compactação os vídeos ocupam grande espaço de armazenamento.

### **3.4. SOFTWARE**

#### **3.4.1. CAPTURA DOS QUADROS**

Após a adequação dos vídeos eles podem ser processados. As medidas dos diâmetros da pupila e da íris são feitas em todos os quadros que compõem o vídeo. Cada quadro é tratado como uma imagem estática pela aplicação e para tal, o quadro precisa ser capturado do vídeo original. Foram implementadas três funções básicas para essa finalidade descritas na tabela 4.

A biblioteca OpenCV fornece a implementação de uma estrutura chamada *capture* que no caso de captura a partir de vídeos é iniciada pela função *cvCaptureFromFile*. Essa estrutura endereça o fluxo de vídeo (stream) que será utilizado para capturar as imagens que compõem cada quadro do vídeo. Com o auxílio de outras duas funções da OpenCV, a *cvGrabFrame* e *cvRetrieveFrame* o quadro é capturado do fluxo de vídeo e alocado em uma estrutura de imagem. A estrutura de dados básica que é utilizada para as imagens é chamada de *IplImage*.

Nesta estrutura, os dados sobre cada pixel estão armazenados na forma de um vetor e todas as informações necessárias sobre a imagem como tamanho, profundidade de bits, tipo de dado utilizado estão presentes.

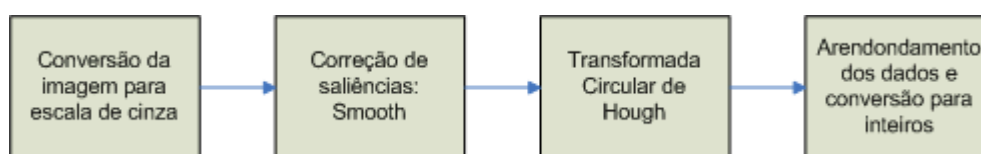
**Tabela 5 - Funções de captura de quadro**

Função	Descrição
initCapture	Abre o vídeo para captura e inicia uma estrutura de captura da biblioteca OpenCV que endereça o vídeo.
getFrame	Captura o quadro do vídeo e o armazena em uma estrutura de dados que contém a imagem.
cpCorrectFrame	Corrige a orientação da imagem quando necessário, fazendo a origem da imagem (coordenadas cartesianas 0,0) ficar no canto esquerdo e inferior.

Uma vez capturado e com a orientação corrigida, um quadro pode passar para o processamento e obtenção dos dados do olho.

### 3.4.2. PROCESSAMENTO PARA ENCONTRAR A PUPILA

A obtenção de todos os dados do olho depende da localização da pupila dentro da imagem. O procedimento pode ser visto no diagrama de blocos da figura 10. Para localizar a pupila foi desenvolvida uma função chamada *findPupil* que utiliza uma importante função da biblioteca OpenCV: a *cvHoughCircles*, que implementa a transformada circular de Hough em dois estágios. Dois parâmetros são importantes para a correta detecção da pupila: um indica o maior limiar (threshold) utilizado pelo detector de bordas (Canny Edge detector). Outro atua na detecção do centro dos círculos definindo o tamanho do acumulador.

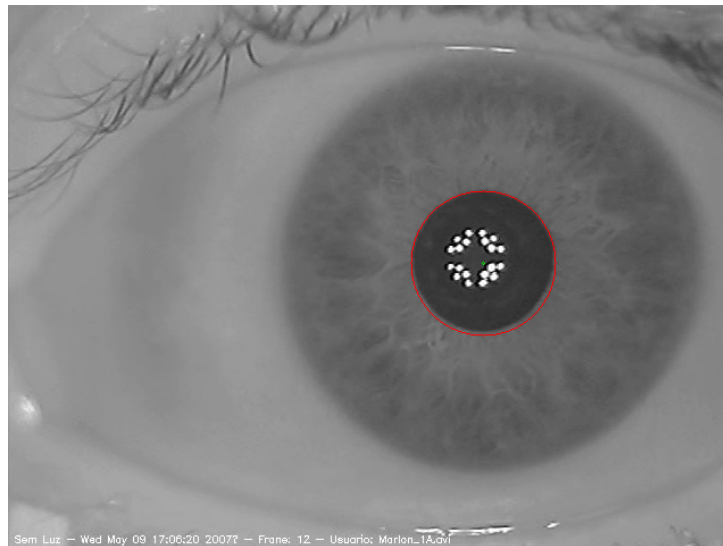


**Figura 10 - Procedimento para identificar a pupila**

A detecção de círculos deve ser feita em imagens em escala de cinza e a todos os frames a função *cvCvtColor* é aplicada. Essa função converte o espaço de cores de uma imagem. Com o parâmetro *CV\_BGR2GRAY* indicamos que a imagem deve ser convertida do espaço BGR (similar ao RGB, mas com a ordem dos dados sobre as cores alterada) para escala de cinza. Após a conversão, as imagens passam por um processo de remoção de saliências (smooth) através da função *cvSmooth*, também implementada pela OpenCV. Só então o algoritmo de Hough é aplicado.



A função *cvHoughCircles* retorna três informações sobre cada círculo encontrado: o valor da coordenada x do centro do círculo, o valor da coordenada y do centro do círculo e o raio. Esses dados são armazenados em uma estrutura de dados típica da biblioteca OpenCV, a *cvMemStorage*, que é capaz de armazenar diversos tipos de dados que são manipulados por diferentes funções da biblioteca. Por fim, os dados armazenados que são do tipo ponto flutuante são convertidos para o tipo inteiro, já que o acesso a pontos da imagem é feita pela indexação de índices de matriz e esses índices são do tipo inteiro.



**Figura 11 - Círculo Vermelho indica local onde a pupila foi encontrada**

### 3.4.3. IMAGENS BINÁRIAS

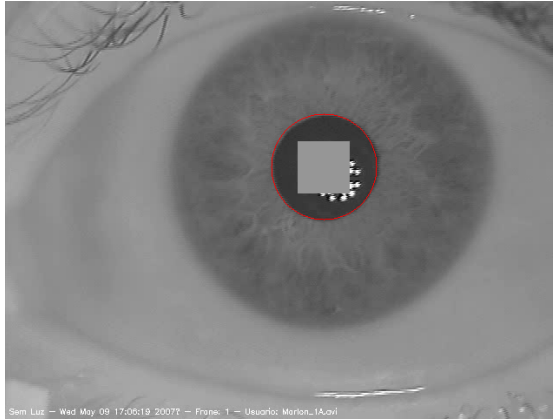
As informações sobre o posicionamento da pupila dentro da imagem do olho são necessárias para medir os diâmetros da pupila e da íris. A medição dos diâmetros é feita em imagens binárias onde se destaca a parte do olho que será medida. Para criar as imagens binárias utiliza-se a função da biblioteca OpenCV *cvThreshold*.

Através da configuração de parâmetros dessa função aplica-se um critério para cada pixel da imagem. Se o valor do pixel da imagem original for maior que um valor de referência (*threshold*), o pixel que correspondente à mesma posição na imagem binária recebe um valor máximo definido. Caso o valor do pixel da imagem original seja menor que o valor de referência, o pixel da imagem binária assume valor 0. O critério pode ser assim representado:

$$dst(x,y) = \begin{cases} \text{valor máximo, se } src(x,y) > threshold \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Onde *dst(x,y)* é o valor do pixel (x,y) na imagem binária e *src(x,y)* é o valor do pixel na posição (x,y) na imagem original. O *valor máximo* é 255, que indica a cor branca, e *threshold* é determinado por outras funções.

Durante a execução da aplicação são geradas duas imagens binárias destacando uma a pupila e outra a íris e a pupila juntas. Para tal, dois valores de *threshold* devem ser corretamente determinados. O valor limite referente à imagem correspondente da pupila é obtido através da média dos valores dos pixels vizinhos ao centro da pupila encontrado pela transformada circular de Hough. Com esse valor, a imagem binária da pupila é gerada e os diâmetros são calculados. Na figura 12 é possível observar os pontos que foram utilizados para o cálculo do *threshold* da imagem da pupila indicados por um quadrado cinza sobre a pupila. Na figura 13 é possível observar a imagem binária da pupila obtida com esse valor limite.



**Figura 12 - Pontos utilizados para determinar o threshold da pupila**

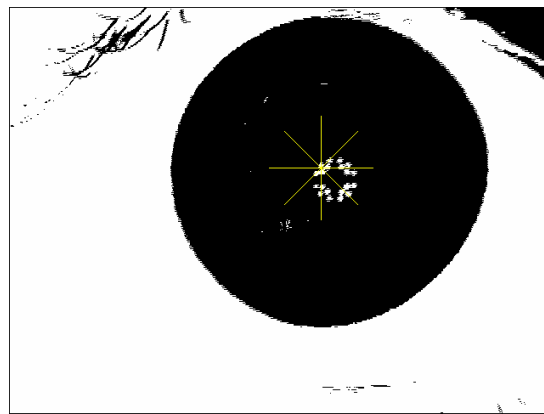


**Figura 13 - Imagem binária com a pupila destacada**

Após calcular os diâmetros da pupila o mesmo procedimento é repetido para obter uma imagem destacando a íris e pupila juntas. A média do valor de vários pontos que estão na íris é calculada para servir de *threshold*. Esse procedimento só é feito após calcular o diâmetro da pupila no eixo x, pois o raio da pupila é que vai indicar a posição correta dos pixels desejados. As figuras 14 e 15 mostram respectivamente os pontos utilizados para o cálculo do valor limite de binarização para a íris e a imagem binária obtida.



**Figura 14 - Pontos utilizados para cálculo do threshold da íris**



**Figura 15 - Imagem binária da íris e da pupila destacadas**

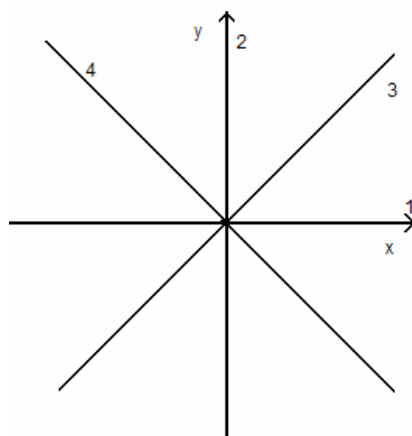
O diâmetro da íris pode enfim ser determinado com a imagem binária gerada para cada quadro.

#### 3.4.4. OBTENÇÃO DOS DADOS

Após obter a imagem binária que destaca a pupila são feitas as medições que irão fornecer o diâmetro médio da pupila. O diâmetro da pupila é medido em quatro orientações diferentes e esses quatro valores irão compor o valor médio. A origem do plano de referência desses diâmetros é o ponto cartesiano (x, y) do centro da pupila obtido pela transformada de Hough. A partir desse centro, são medidos os diâmetros no eixo x (valor de y é mantido constante), no eixo y (valor de x é mantido constante), na reta onde y=x e na reta onde y=-x. A tabela 5 e a figura 15 resumem e demonstram a orientação das retas que servem de base para medir os diâmetros.

**Tabela 6 - Orientação dos diâmetros medidos**

Diâmetro	Equação de reta
1	y = constante
2	x = constante
3	y = x
4	y = -x

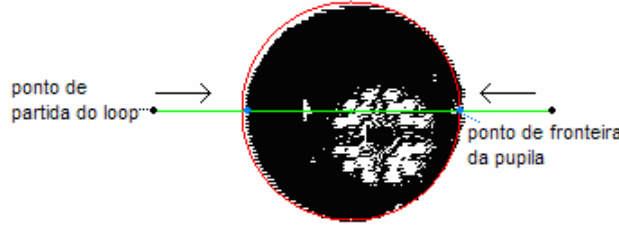


**Figura 16 - Eixo cartesiano com as retas que orientam os diâmetros**

Os diâmetros são calculados pela distância dos dois pontos extremos da pupila e que estejam sobre uma das retas de orientação. Um laço de repetição percorre a cada reta de referência desde um ponto fora da pupila até encontrar sua fronteira. Esse ponto de referência não é tão distante da origem (centro da pupila) para evitar repetições desnecessárias e varia para cada reta. A distância euclidiana entre os dois pontos que estejam na fronteira da pupila e sobre uma mesma reta será um diâmetro e é calculada pela fórmula

$$diâmetro = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2}$$

Onde  $(x1, y1)$  e  $(x2, y2)$  correspondem aos pontos de fronteira. O valor do diâmetro é dado em pixels.



**Figura 17 - Medição do diâmetro no eixo x.**

**A partir dos pontos de partida do laço (loop) o algoritmo avança na reta do eixo x até encontrar o ponto de fronteira. O mesmo laço é feito para os dois lados da pupila, encontrando os dois pontos de fronteira.**

Obtidos os valores dos quatro diâmetros, podem ser calculados o diâmetro médio e a circularidade. O diâmetro médio é calculado pela fórmula

$$diâmetro\_médio = \frac{diâmetro1 + diâmetro2 + diâmetro3 + diâmetro4}{4}$$

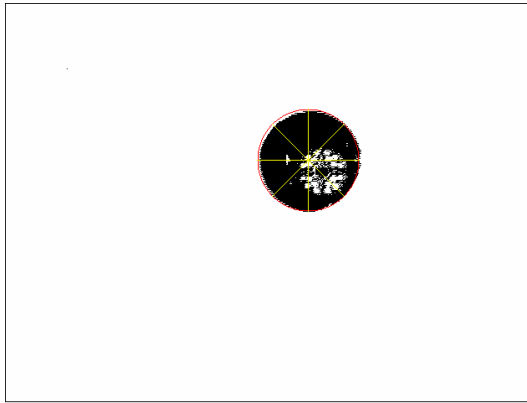
Onde  $diâmetroX$ , com X variando de 1 até 4, corresponde a cada um dos diâmetros obtidos orientados pelas retas. A circularidade utilizada nesse trabalho é a relação entre os quatro diâmetros e indica o quanto eles são diferentes. Quando maior a diferença entre o valor desses diâmetros, mais distante de um é o valor da circularidade, indicando o quão elíptica é a pupila. Para calcular a circularidade, é feita a média de duas relações: a relação entre os diâmetros orientados pelas retas no eixo x e no eixo y e a relação entre os diâmetros com inclinação de 45 graus em referência ao eixo x. As fórmulas seguintes demonstram o cálculo:

$$circularidade_{XY} = diâmetroX / diâmetroY$$

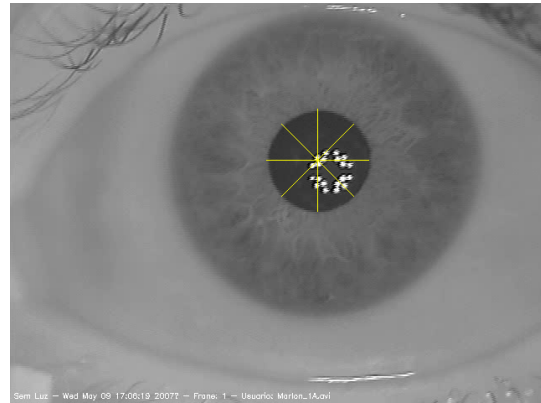
$$circularidade_{45} = diâmetro_{45} / diâmetro_{135}$$

$$circularidade = \frac{circularidade_{XY} + circularidade_{45}}{2}$$

Onde  $diâmetroX$  é o diâmetro orientado pela reta do eixo x,  $diâmetroY$  é a reta orientada pelo eixo y,  $diâmetro_{45}$  é orientado pela reta  $y=x$  e  $diâmetro_{135}$  é orientado pela reta  $y=-x$ .

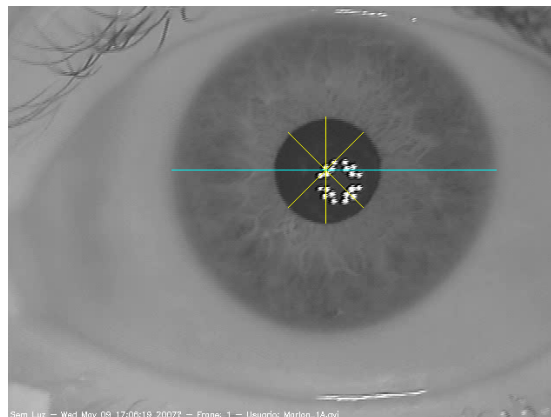


**Figura 18 - Imagem Binária com diâmetros calculados e traçados**



**Figura 19 - Diâmetros traçados na imagem original**

O próximo dado que deve ser obtido é o diâmetro da íris. O mesmo procedimento utilizado na imagem binária da pupila para obter os quatro diâmetros é utilizado para obter o diâmetro da íris. Com a imagem binária que destaca a íris e a pupila juntas, é feito o laço de aproximação até encontrar as fronteiras da íris apenas em relação ao eixo x, com o mesmo ponto de origem utilizado nas retas de orientação dos diâmetros da pupila. Calcula-se a distância entre esses dois pontos para definir o diâmetro da íris. A figura 20 mostra o traçado do diâmetro da íris.



**Figura 20 - Diâmetro da íris**

O último dado calculado com informações do quadro que está sendo processado é a relação entre diâmetro da íris e diâmetro da pupila. Essa relação é utilizada para auxiliar a identificação de alterações reais no diâmetro da pupila. O diâmetro da íris é considerado constante e só sofre alterações quando o olho se movimenta para os lados. As imagens são planas e não representam a curvatura do globo ocular. Por essa razão, ao movimentar o olho, os diâmetros da íris e da pupila irão variar. Se a relação entre esses diâmetros se mantiver, isso indica que não houve alteração no diâmetro pupila. Caso contrário, a alteração deve ser registrada. A relação é calculada como:

$$Relação = \frac{diâmetroPupila}{diâmetroÍris}$$

Onde *diâmetroPupila* é o diâmetro da pupila no eixo x e *diâmetroÍris* é o único diâmetro da íris calculado.

Todos os dados obtidos são gravados em arquivos de texto para posterior análise.

### **3.5. ANÁLISE DOS DADOS**

Os dados gravados em arquivos de texto foram então analisados com auxílio de técnicas de estatística e gráfica. A análise visava reconhecer padrões ou informações relevantes acerca da variação do diâmetro pupilar no tempo e em resposta a estímulos luminosos.

Os resultados dessa análise podem ser vistos na seção 4 deste texto.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. TESTES DE EXECUÇÃO

Para testar a aplicação desenvolvida foram utilizados treze diferentes filmes dos olhos de oito voluntários. Para alguns dos voluntários mais de um filme foi captado e analisado. A cada quadro dos filmes os diâmetros da pupila e da íris, o valor da circularidade e a relação entre pupila e diâmetro foram calculados e armazenados em arquivos de texto. Porém, para a análise, utilizou-se o valor médio dos dados obtidos a cada cinco quadros. Como foram utilizados filmes com taxa de quadros de 15 e 30 quadros por segundo, cinco quadros correspondem à reação média da pupila a cada um terço e um sexto de segundo respectivamente. Esses dados também foram armazenados em arquivos de texto e serviram de base para a construção de gráficos.

Não foram observadas diferenças significativas nos resultados ao processar e analisar vídeos com taxas de quadros de 15 e 30 quadros por segundo. Porém, vídeos com 30 quadros por segundo quase sempre utilizavam toda a memória física do computador para serem processados obrigando o sistema operacional a utilizar a memória de *swap* do disco rígido. Quando isso acontecia, o processamento se tornava muito lento.

Além dos dados previamente citados foi calculada durante a análise a derivada da curva que indica a variação do diâmetro pupilar. Essa derivada também usou como base de tempo cinco quadros do filme. A seguinte fórmula descreve o cálculo da derivada:

$$derivada = diâmetro\_pupila(x) - diâmetro\_pupila(x-1)$$

Onde  $diâmetro\_pupila(x)$  é o diâmetro médio dos últimos cinco quadros que foram processados e  $diâmetro\_pupila(x-1)$  é o valor do diâmetro médio dos outros cinco quadros que antecedem o primeiro quadro do tempo  $x$ .

Os dados obtidos e calculados passaram a compor tabelas e a partir dessas tabelas foram criados os gráficos. A tabela 7 mostra um exemplo da organização dos dados coletados:

**Tabela 7 - Tabela com dados de vídeo**

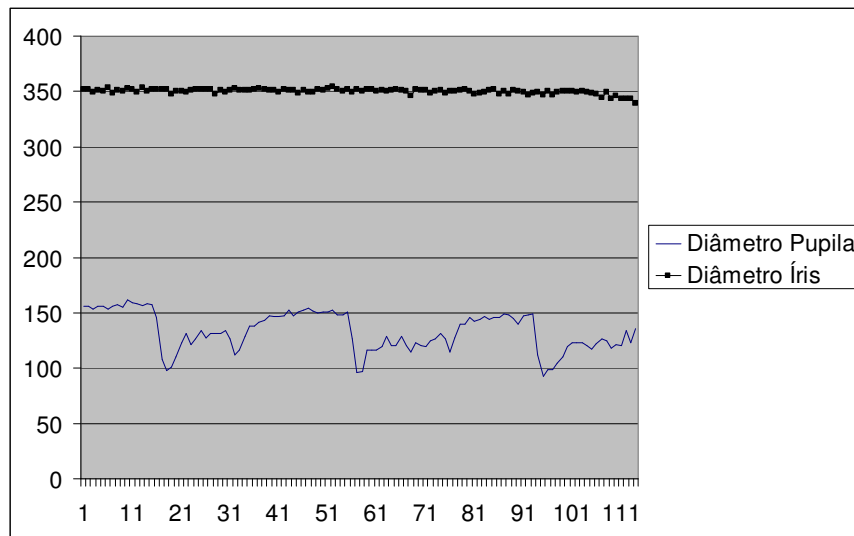
Diâmetro Pupila	Diâmetro Íris	Circularidade	Relação pupila/íris	Derivada pupila
155,3853	352,25	0,977111	0,441122	
155,4353	352	0,984191	0,441578	0,050003
153,1797	349,6	0,984198	0,438157	-2,25565
155,4525	351,2	0,978875	0,442632	2,272797
155,6646	350	0,981526	0,444756	0,212127
153,5746	353,4	0,98135	0,434563	-2,08995
155,6232	348,6	0,983432	0,446423	2,048538
157,2631	350,8	0,981147	0,448299	1,639954
154,6439	350	0,972155	0,44184	-2,61923
161,643	353	0,983915	0,457912	6,999131
158,8889	352,4	0,987468	0,450876	-2,75415
157,9631	349,4	0,972995	0,452098	-0,92575

156,9474	353,4	0,98381	0,444107	-1,01569
158,2874	350,4	0,980561	0,451733	1,339951
157,8252	352	0,984421	0,448367	-0,46214
145,5249	352,4	0,988598	0,412954	-12,3003
107,7851	352	1,002267	0,306208	-37,7398
97,85249	352,2	1,032367	0,277832	-9,9326
101,2117	347,8	1,025342	0,291005	3,359192
110,6215	350	1,005183	0,316061	9,409798
122,5869	350,4	0,992961	0,349849	11,96543
131,2952	349,8	0,969622	0,375344	8,708328
121,0556	350,8	0,977416	0,345084	-10,2397
126,3254	352	0,975695	0,358879	5,269837
134,2559	352,4	0,989203	0,380976	7,930511
127,4289	351,8	1,006591	0,36222	-6,82697
131,4538	351,8	0,99313	0,373661	4,024887
131,7574	348	0,971894	0,378613	0,303543
131,4352	351,4	0,9797	0,374033	-0,32217
134,053	349,8	0,973067	0,383227	2,617767
126,1683	351,2	0,998521	0,359249	-7,88467
111,6508	352,6	1,008828	0,31665	-14,5175
116,5378	351	1,02203	0,332016	4,887009
129,0432	350,8	0,986297	0,367854	12,50539
137,9065	351	0,99114	0,392896	8,863358
137,905	352,4	0,997633	0,391331	-0,00148
141,7693	353,2	0,995755	0,401385	3,864212
143,0835	351,8	0,985534	0,406718	1,314209
147,6841	351,2	0,994646	0,420513	4,600616
146,6477	351,4	0,986481	0,417324	-1,03641
146,7063	349,8	0,990445	0,4194	0,058593
147,0305	351,8	0,992239	0,417938	0,324265
152,8175	350,8	0,987357	0,435626	5,787002
147,1927	351,2	0,984739	0,419113	-5,62488
151,0154	348,6	0,988325	0,433206	3,822785
152,6761	351,4	0,984439	0,43448	1,660675
154,1868	349,4	0,982655	0,44129	1,510651
151,8518	349,8	0,981342	0,43411	-2,33493
150,2205	351,8	0,983564	0,427005	-1,63138
150,8776	351	0,981208	0,429851	0,657135
150,7225	353,2	0,983231	0,426734	-0,15505
152,2261	354,2	0,984356	0,429774	1,503556
148,4705	351,8	0,9801	0,422031	-3,75563
148,0669	350,2	0,980976	0,422807	-0,40355
150,8276	351,8	0,988755	0,428731	2,760666
126,0653	349,2	0,991376	0,361012	-24,7622
96,00545	351,75	1,0712	0,272937	-30,0599
97,09749	350,6	1,04055	0,276947	1,092041
116,1292	352,25	1,00881	0,329678	19,03171
116,1413	352	0,961406	0,329947	0,012139
116,26	350,2	0,971921	0,331982	0,118629
119,9641	351,4	0,980956	0,341389	3,704163
128,581	350,6	0,987738	0,366746	8,616912
120,5919	350,8	0,960547	0,343763	-7,9891

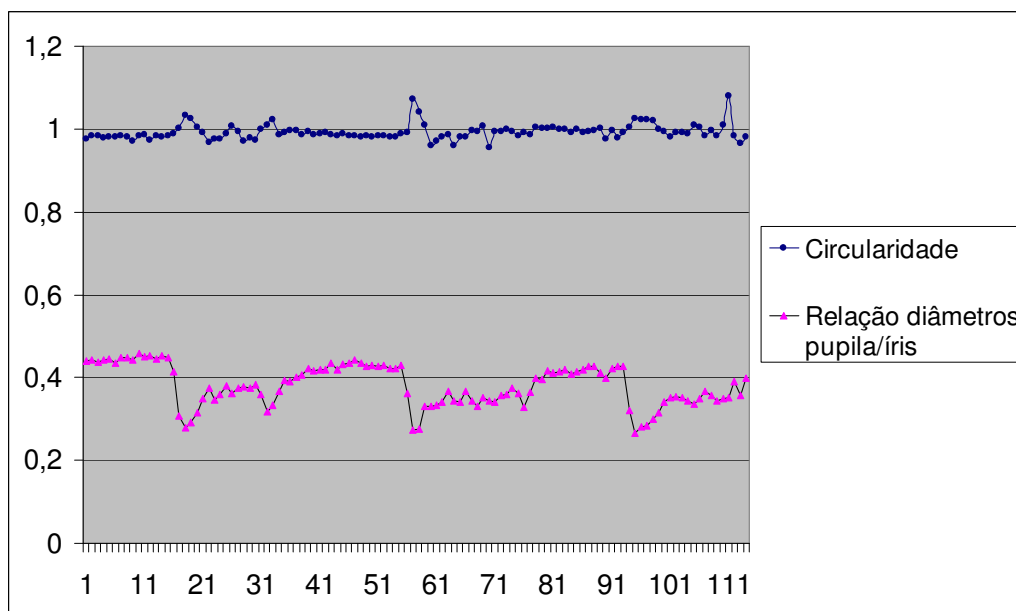


120,4263	352,2	0,980233	0,341926	-0,16569
129,0189	351,4	0,981727	0,367157	8,592636
120,6505	350,6	0,997642	0,344126	-8,36838
114,7928	346,4	0,993061	0,331388	-5,8577
123,1562	351,6	1,007923	0,350274	8,363357
120,3585	351,2	0,955415	0,342706	-2,79767
119,5606	351	0,994278	0,340628	-0,79793
124,3369	348,4	0,994594	0,35688	4,776344
126,2011	350,4	0,999558	0,360163	1,86422
131,5695	350,8	0,995353	0,375056	5,36837
125,8961	349	0,985215	0,360734	-5,6734
114,9064	350,6	0,991926	0,327742	-10,9897
127,3325	350	0,986314	0,363807	12,42609
139,8793	350,8	1,004233	0,398744	12,54681
139,55	352	1,002064	0,396449	-0,32932
145,7335	350	1,001199	0,416381	6,183456
142,6006	347,8	1,0044	0,410008	-3,13283
144,237	348,4	0,998593	0,413998	1,636398
146,6891	349,2	0,998331	0,420072	2,452087
143,7249	351,2	0,990819	0,409239	-2,96423
145,9027	352	1,000694	0,414496	2,177826
145,8648	348,2	0,993006	0,418911	-0,03787
149,2033	350,2	0,994904	0,426052	3,338485
148,0427	347,4	0,997357	0,426145	-1,16066
144,7749	351,4	1,002355	0,411995	-3,26778
139,6536	350	0,976193	0,39901	-5,12132
147,2098	349,8	0,997539	0,42084	7,556275
148,2669	346,6	0,979891	0,427775	1,057083
149,1705	348,8	0,990837	0,427668	0,903564
111,8179	349,6	1,005308	0,319845	-37,3526
92,58118	347,25	1,024655	0,266612	-19,2368
98,5025	350,4	1,021711	0,281114	5,921318
98,78032	347,2	1,023048	0,284506	0,277824
104,5274	349,2	1,020133	0,299334	5,747063
110,3301	350	0,998983	0,315229	5,802681
119,6656	350,2	0,994609	0,341706	9,335541
122,7319	350,4	0,982053	0,350262	3,066291
123,3647	349,2	0,991662	0,353278	0,632836
122,6198	350	0,992852	0,350342	-0,74498
120,0899	349,8	0,989405	0,34331	-2,52988
117,2035	348,75	1,010135	0,336067	-2,8864
121,9056	348,2	1,004362	0,350102	4,702088
126,2304	344,8	0,983286	0,366098	4,324867
124,7511	349,2	0,997475	0,357248	-1,47929
117,6156	343,6	0,985095	0,342304	-7,13554
120,9763	346	1,010215	0,349642	3,360656
120,5263	343,5	1,081478	0,350877	-0,45
133,871	343,6	0,984945	0,389613	13,34474
122,5863	343,75	0,965563	0,356615	-11,2847
135,2902	339,3333	0,98133	0,398694	12,70393

Esses dados deram origem aos seguintes gráficos:



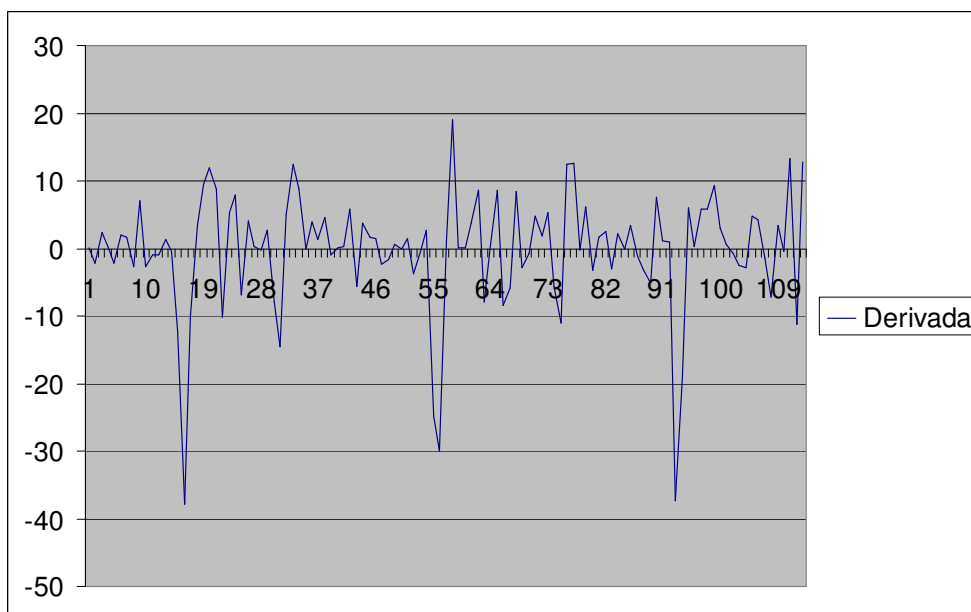
**Figura 21 - Gráficos dos diâmetros da pupila e da íris – Voluntário 1**



**Figura 22 - Gráfico da circularidade e da relação de diâmetros – Voluntário 1**

Nesses gráficos é possível observar a resposta da pupila ao estímulo de luz. Os momentos em que o diâmetro médio da pupila e o valor da relação pupila/diâmetro diminuem correspondem aos momentos em que a luz do equipamento de captura de imagens do olho é acionada. Em um primeiro momento há uma forte contração da pupila que rapidamente se adapta à luminosidade do ambiente. Mesmo após desligar a luz que estimula a reação dos olhos o diâmetro da pupila não volta ao mesmo valor em que estava anteriormente. A cada estímulo com e sem luz o diâmetro máximo da pupila diminui.

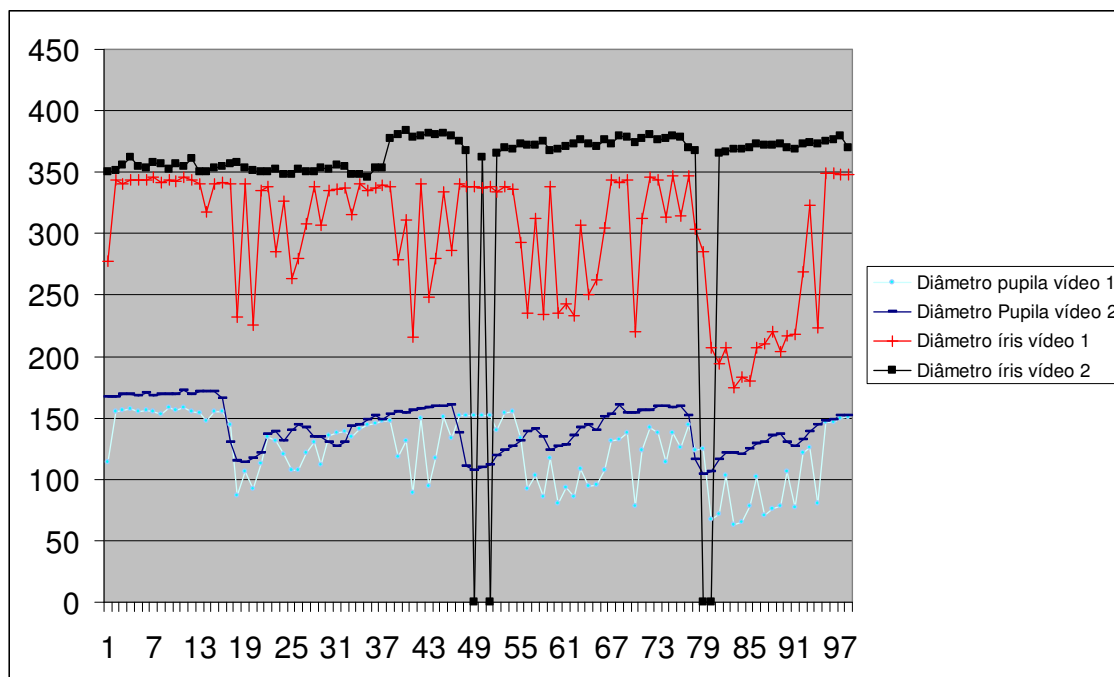
O gráfico da figura 23 mostra a variação do diâmetro da pupila ao longo do tempo. Os picos no quadrante negativo mostram a velocidade da reação da pupila ao estímulo luminoso.



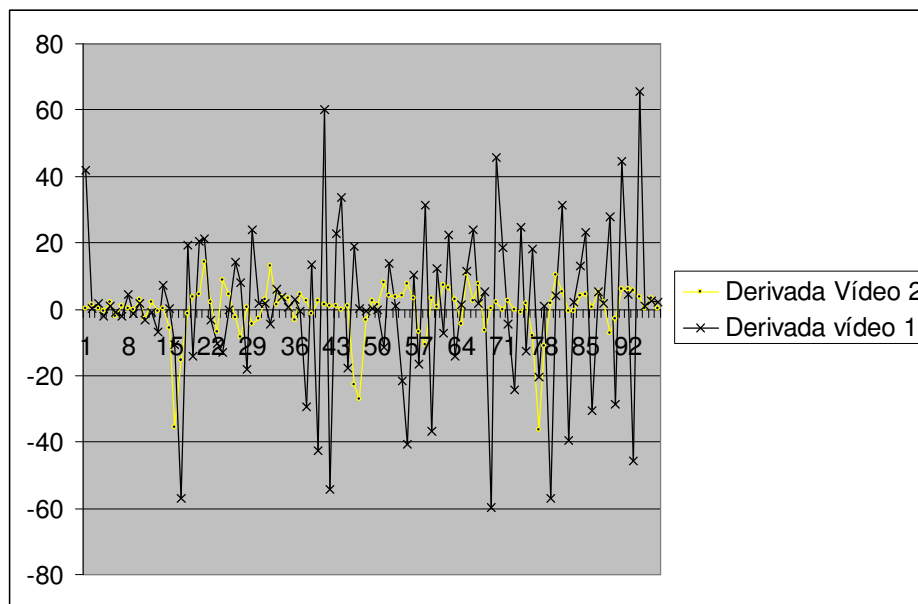
**Figura 23 - Variação do diâmetro da pupila no tempo – Voluntário 1**

No caso deste exemplo, o gráfico da relação dos diâmetros e da variação do diâmetro médio são muito próximos, indicando a qualidade da amostra obtida. A pouca variação no diâmetro da íris indica que o olho manteve seu foco e não se movimentou em excesso, o que favorece nos cálculos de corretas e reais variações do diâmetro pupilar.

Para o mesmo voluntário que originou os dados apresentados anteriormente outros dois vídeos foram captados e analisados. Os dados dos dois vídeos são apresentados nos gráficos das figuras 24 e 25.



**Figura 24 - Dados dos vídeos – Voluntário 1**

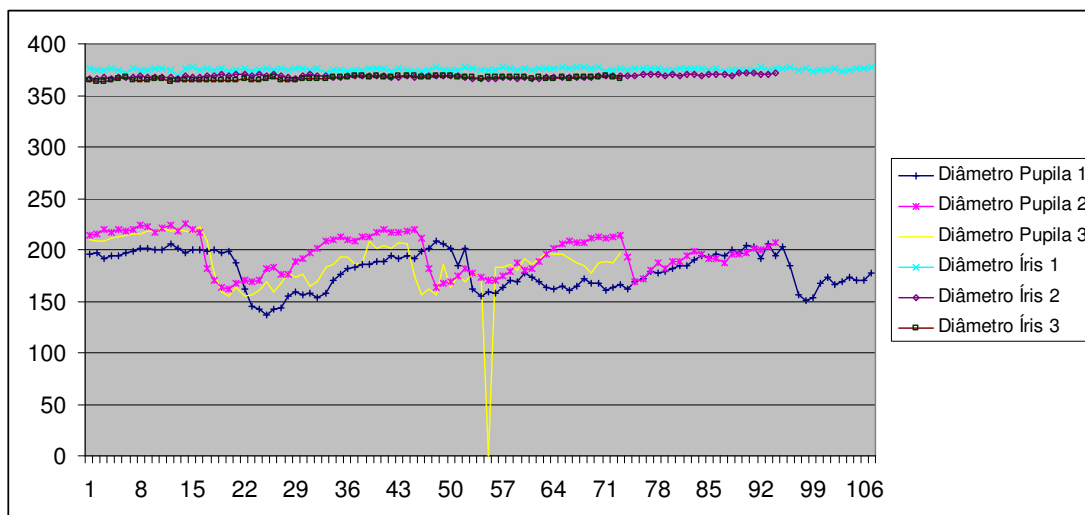


**Figura 25 - Derivada dos vídeos – Voluntário 1**

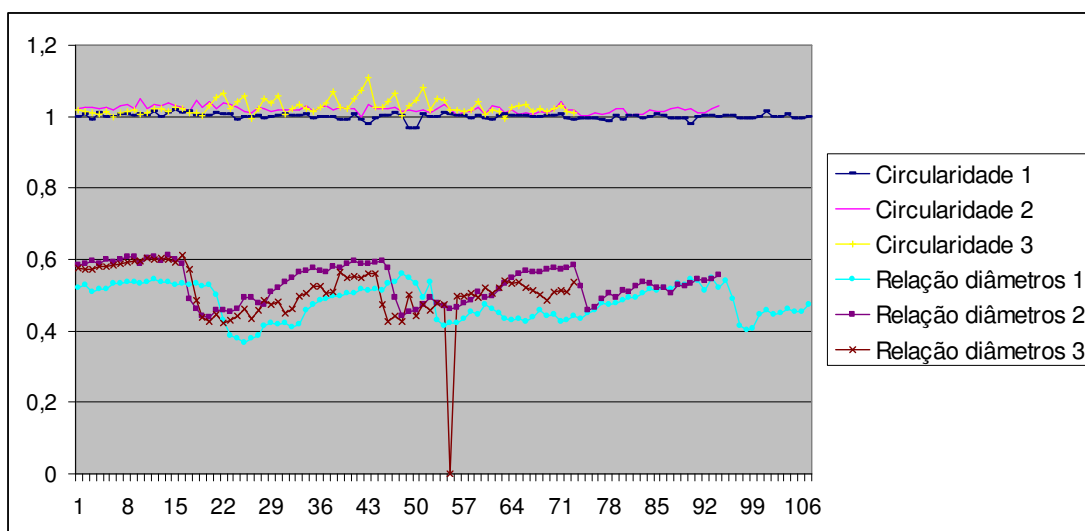
Os dados do vídeo 1 indicam maior variação do diâmetro da pupila ao longo do tempo, fato esse que pode ser observado através da análise visual do vídeo. Esse mesmo vídeo foi captado com o foco da câmera fora de seu ponto ótimo, o que dificulta a identificação da borda da íris e explica a oscilação da reta que descreve o diâmetro da pupila. É possível afirmar que para essa amostra de vídeo, a pupila do voluntário teve dificuldade em se adaptar à quantidade de luz a que era submetida. Uma possível causa para essa dificuldade é a entrada de luz pelas bordas do aparelho que captura as imagens, que não é capaz de isolar completamente os olhos da luz externa e não controlável.

O vídeo 2 apresentou dados com comportamento similar aos dados do vídeo apresentado nas figuras 21 e 22.

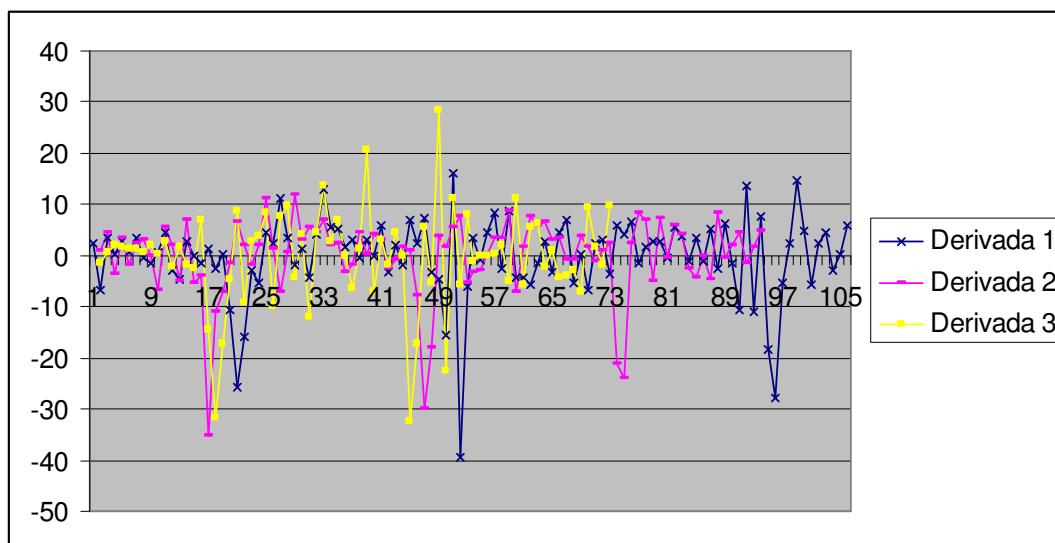
Outros três vídeos foram feitos para um segundo voluntário. Os dados obtidos processando esses vídeos são apresentados nos gráficos das figuras 26, 27 e 28. O tempo de duração e os instantes em que o estímulo luminoso é ativado não são os mesmos para os três vídeos, porém é possível observar que a reação da pupila é parecida nos três casos. Ao receber o estímulo luminoso ela se contrai rapidamente e conforme o olho se adapta à condição luminosa a que está exposto ela volta a dilatar. Mesmo com a ausência da luz que estimula sua reação, a pupila não volta a ter o mesmo diâmetro que tinha antes de receber o estímulo. O diâmetro da íris novamente se mantém constante, indicando a qualidade das imagens captadas e produzindo curvas da relação de diâmetros muito similares à curva da variação do diâmetro pupilar. É possível notar também maiores alterações na circularidade da pupila quando ela está relaxada (dilatada). O gráfico das derivadas da curva do diâmetro da pupila também é similar aos gráficos previamente apresentados.



**Figura 26 - Diâmetros da pupila e íris - Voluntário 2**

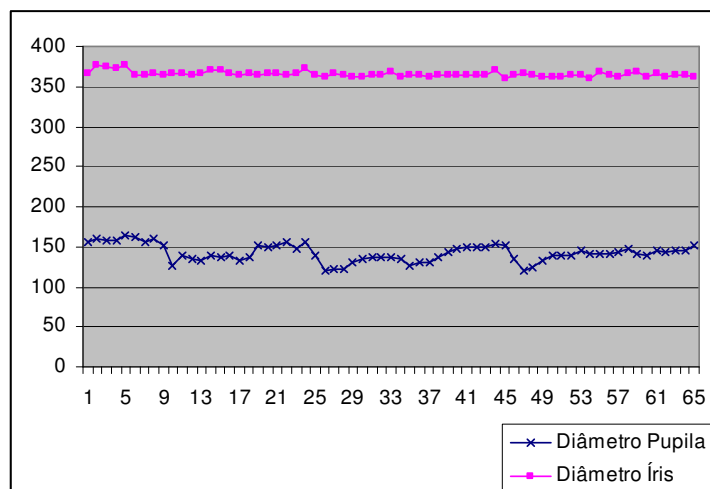


**Figura 27 - Circularidade e Relação diâmetros pupila/íris - Voluntário 2**

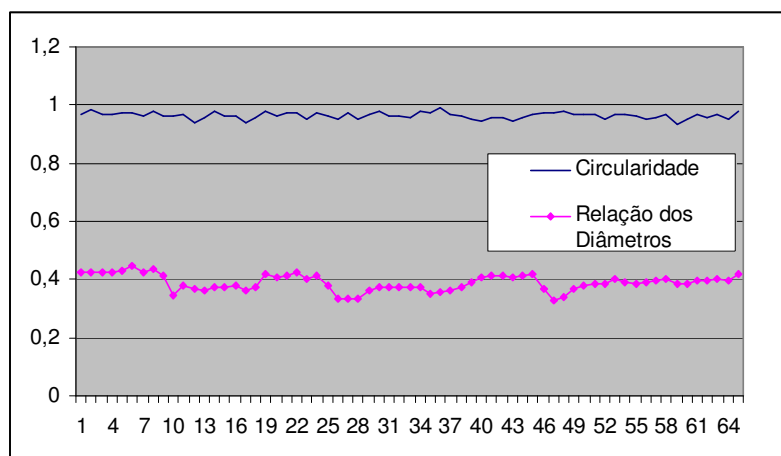


**Figura 28 - Variação do diâmetro da pupila no tempo (derivada) - Voluntário 2**

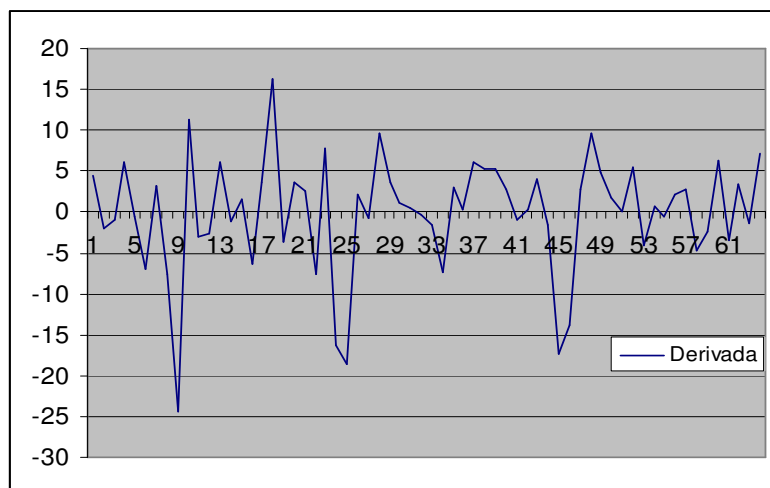
Os vídeos de outros quatro voluntários foram analisados e não apresentaram comportamento muito diferente dos vídeos dos voluntários 1 e 2. Todos tiveram formato gráfico similar aos gráficos apresentados em seguida.



**Figura 29 - Diâmetros da pupila e da íris de outro voluntário**  
Características gráficas similares aos exemplos anteriores

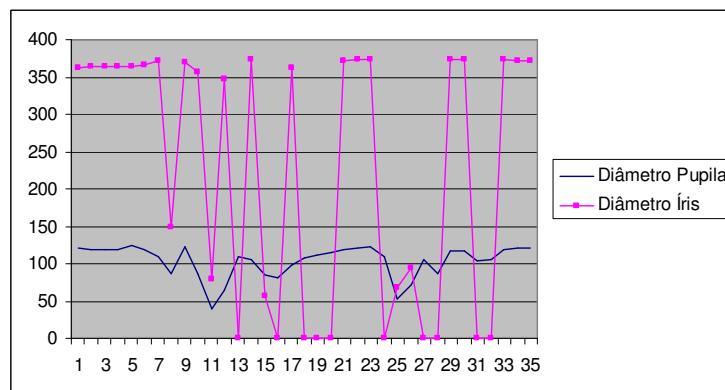


**Figura 30 - Circularidade e Relação dos diâmetros do olho de outro voluntário**

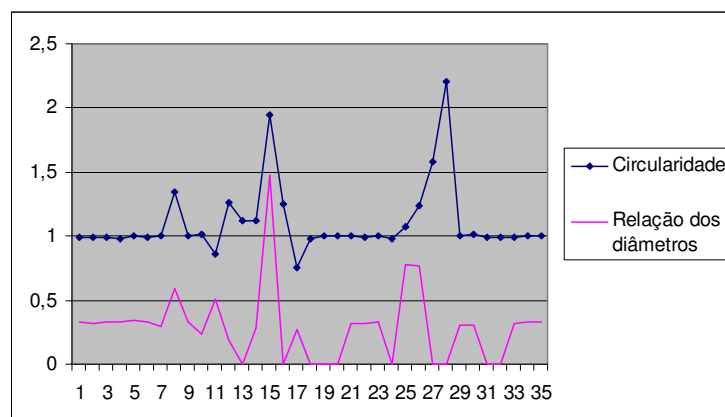


**Figura 31 - Derivada da curva do diâmetro da pupila de outro voluntário**

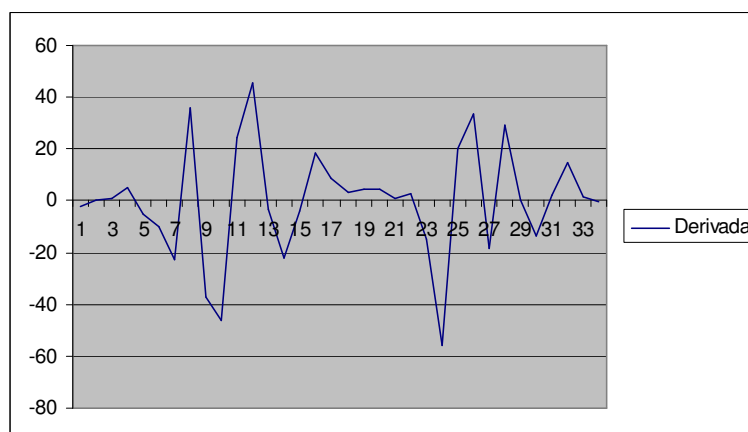
A aplicação foi testada ainda com outros dois vídeos com características que dificultavam a obtenção dos dados desejados: o olho do voluntário se movimentou muito durante a captura, as pálpebras sobrepuseram a pupila (olho pouco aberto) e em muitos momentos, partes da íris ficavam fora do campo de captura de câmera, impossibilitando a medição de seu diâmetro. Os dados obtidos a partir desses vídeos demonstram a situação em que a aplicação não é capaz de identificar os dados do olho corretamente. Os gráficos abaixo exemplificam o caso de uma amostra de vídeo ruim.



**Figura 32 - Diâmetros da pupila e íris obtidos de uma amostra ruim**

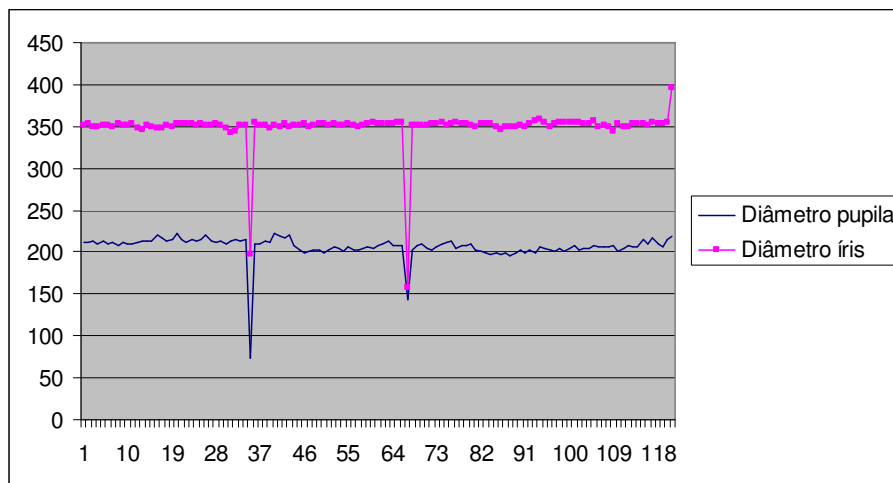


**Figura 33 - Circularidade e Relação dos diâmetros obtidas de uma amostra ruim**

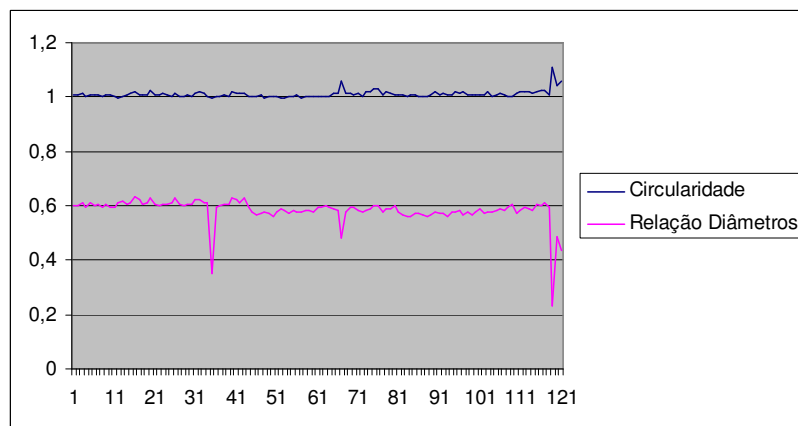


**Figura 34 - Derivada da curva da pupila de uma amostra ruim**

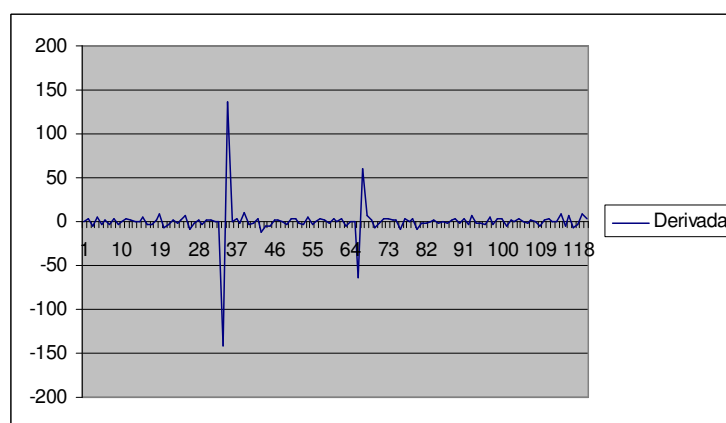
Por fim, a pupila do voluntário do último vídeo analisado apresentou pouca reação ao estímulo luminoso.



**Figura 35 - Diâmetros da pupila e íris de voluntário com reação imperceptível ao estímulo luminoso**



**Figura 36 - Circularidade e Relação entre diâmetros com resposta imperceptível**



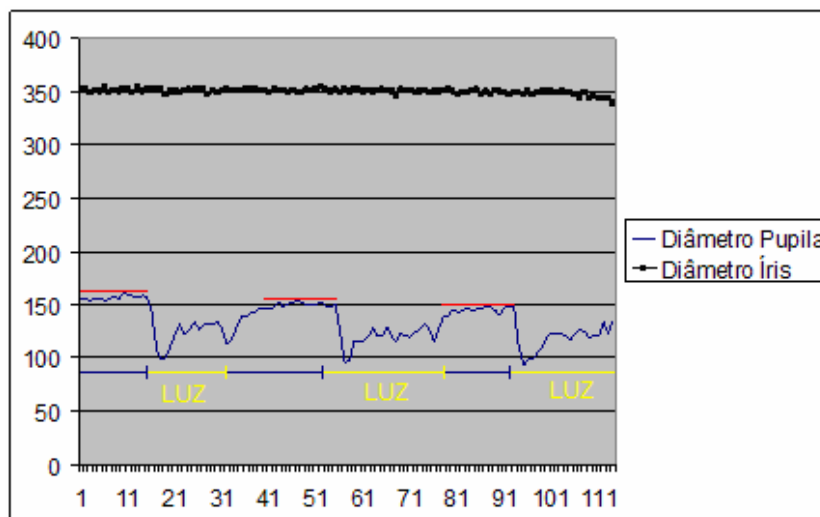
**Figura 37 - Derivada da curva de variação da pupila com variação imperceptível**

Os picos que podem ser observados nesses gráficos foram originados por falhas durante o processamento dos quadros do vídeo ao medir os diâmetros da pupila ou íris.



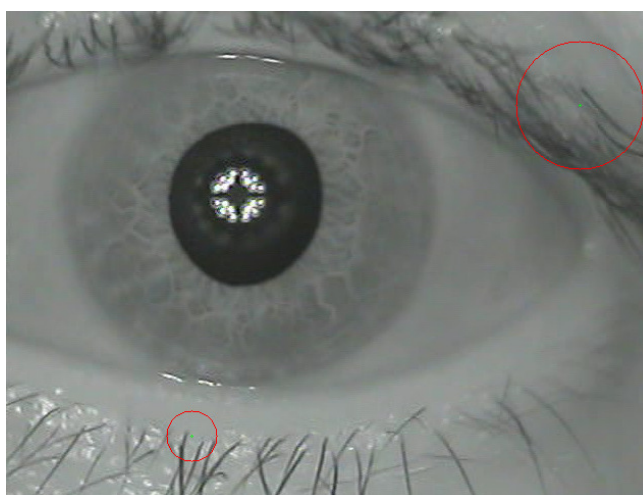
#### 4.2. ANÁLISE DOS DADOS DOS TESTES

A análise dos dados obtidos durante os testes da aplicação permitiu observar um comportamento comum da reação da pupila ao estímulo luminoso. Quando o olho é exposto à luz, a pupila se contrai rapidamente e em poucos instantes dilata até estabilizar em um diâmetro apropriado para a visão. Quando o estímulo luminoso é desligado, a ausência de luz faz com que a pupila volte a dilatar, mas ela não atinge o mesmo diâmetro que tinha no início do teste. Isso se repete a cada vez que o olho é submetido a luz e a ausência de luz e o diâmetro máximo sempre diminui.



**Figura 38 - Gráfico mostrando os momentos em que há estímulo luminoso no olho. Na ausência de luz, a pupila não volta a ter o mesmo diâmetro que tinha (linhas vermelhas)**

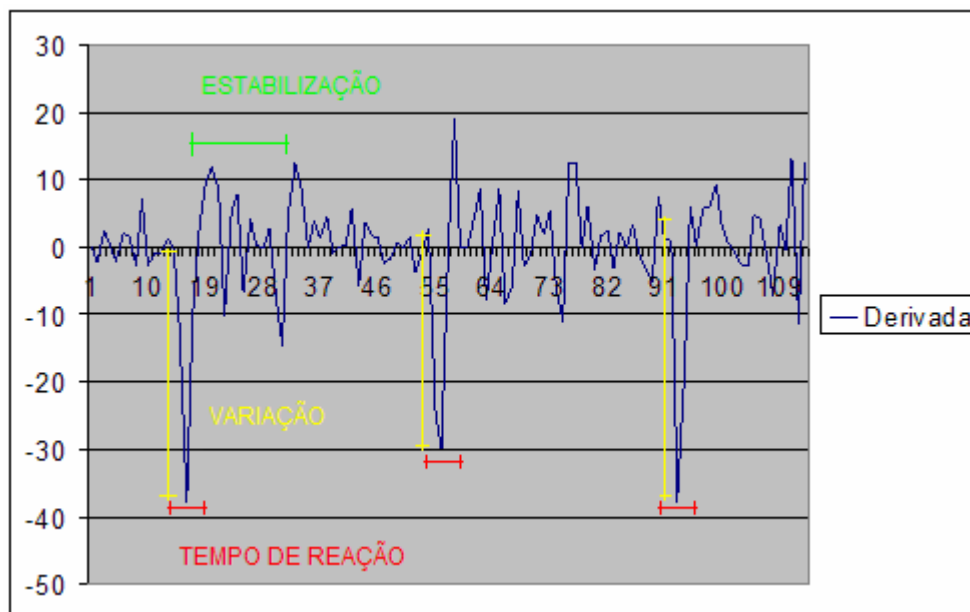
Em algumas amostras a circularidade da pupila se distancia do valor 1 (perfeitamente redonda) quando a pupila está dilatada. Essa alteração na circularidade pode indicar uma característica pessoal e sua correta medição poderia ser utilizada para fins biométricos.



**Figura 39 - Pupila Elíptica: circularidade distante de 1**

As informações obtidas com a derivada da curva que indica a variação da pupila no tempo também sugerem a existência de informações pessoais que podem ser usadas para fins

biométricos. A velocidade de reação da pupila ao estímulo de luz, o quanto ela se contrai, o tempo que leva para estabilizar em um diâmetro e a forma como reage a estímulos de luz sucessivos podem compor um cenário de informações únicas do indivíduo.



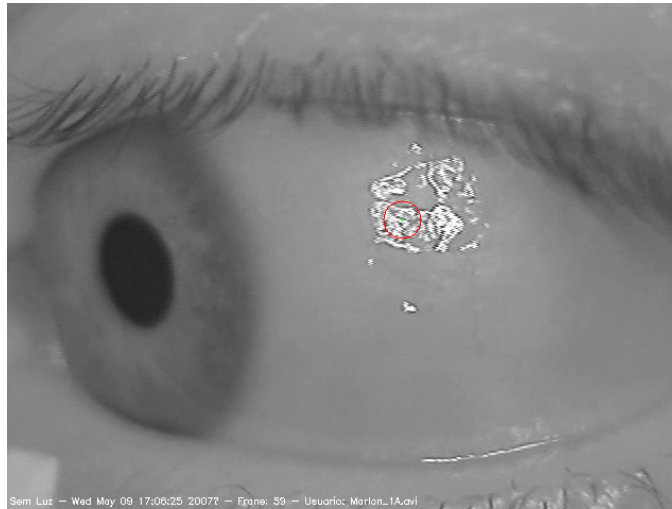
**Figura 40 - Medidas na curva da derivada**

Por fim, a melhor forma de avaliar a variação do diâmetro da pupila é utilizando a relação dos diâmetros da íris e da pupila. Como o diâmetro da íris é constante, utiliza-lo como referência evita que a aplicação reconheça variações na pupila que são originadas pela movimentação do globo ocular, que é uma superfície esférica que está representada em uma imagem plana.

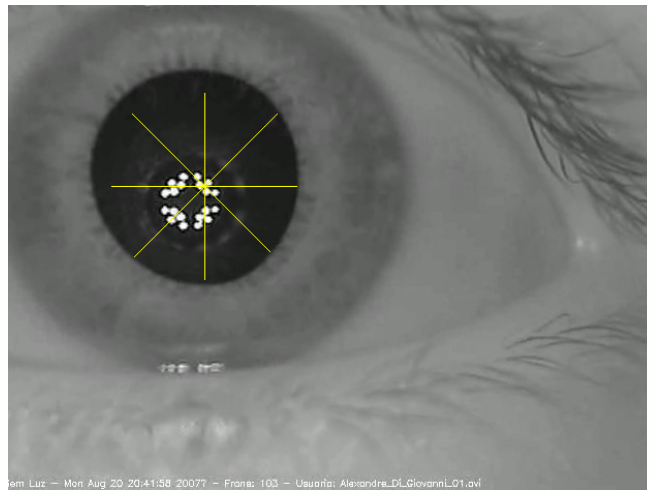
### **4.3. DIFICULDADES E LIMITAÇÕES**

A aplicação apresenta algumas dificuldades e limitações. Para obter todos os dados corretos é imprescindível que as estruturas do olho estejam bem definidas na imagem e sem cortes. Pálpebras cobrindo parte da pupila, parte da íris fora com campo da imagem, cílios muito escuros e que sobrepõem a íris ou pupila e filmes fora de foco dificultam a aplicação da transformada de Hough para localizar a pupila na imagem. Movimentar os olhos durante a captação e piscar podem gerar erros e dados incorretos.

A aplicação teve que ser ajustada para conseguir processar corretamente alguns filmes. Diferenças principalmente do brilho e da cor da pupila nos vídeos impedem que os mesmos parâmetros sejam utilizados pela transformada de Hough para localizar a pupila. O valor limite (*threshold*) utilizado para obter as imagens binárias também teve que ser ajustado para alguns filmes. Em algumas imagens de olhos a diferença de cor que definiria a área da íris, por exemplo, era mínima e qualquer variação no valor de *threshold* implicava em uma imagem binária distorcida. O reflexo branco que dos LEDs infravermelhos também afetaram o cálculo do valor de *threshold* para obter a imagem binária da pupila em alguns casos.



**Figura 41 - Movimentação do olho impede identificação da posição da pupila**



**Figura 42 - Parte da íris fora do campo da imagem impossibilita medir seu diâmetro**

## 5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. DISCUSSÃO

A idéia de construção da Aplicação de Visão Computacional para Extração de características em Imagens do Olho Humano derivou de um trabalho desenvolvido por outro aluno de graduação durante a disciplina de Projeto de Sistemas Embarcados. O objetivo desse trabalho era construir um hardware com microprocessadores capaz de processar imagens do olho para medir o diâmetro da pupila. Juntamente com o projeto de hardware, o aluno em questão desenvolveu uma aplicação também utilizando o a biblioteca OpenCV que era capaz de identificar a pupila e medir seu diâmetro, mas sem nenhuma relação com o hardware.

Esse trabalho procurou evoluir a idéia de utilizar o OpenCV para extrair dados do olho. Houve um grande avanço na estruturação da aplicação, em dividir a execução em diversas rotinas e organizá-las. A documentação da aplicação também facilita o entendimento daqueles que eventualmente venham estudar a implementação. Outro grande avanço foi o desenvolvimento de rotinas para calcular os valores de *threshold* que são usados para obter as imagens binárias. Para cada filme de um olho, esses valores variam e calculá-los a partir das informações presentes no próprio quadro facilita o processamento.

A atual implementação é eficaz para identificar a pupila e os diâmetros para a maioria dos vídeos quando esses têm a qualidade requerida e não há sobreposição de partes (pálpebra sobre a pupila, íris fora do campo da imagem). Em alguns casos, porém, ajustes nos parâmetros que são utilizados pela transformada de Hough para identificar a pupila na imagem são necessários, o que faz que a aplicação não seja eficaz para 100% dos vídeos. As rotinas que calculam o *threshold* em alguns casos também necessitam de ajustes, normalmente multiplicar o valor limite por um fator de correção. O principal problema na rotina atual de cálculo do *threshold* da pupila é a interferência que o reflexo dos LEDs infravermelho causa.

A identificação da borda da íris com a utilização de *threshold* também é complexa em alguns casos. Algumas imagens do olho têm variação de cor muito suave na fronteira da íris com o corpo branco do olho. Por essa razão, a medida do diâmetro da íris muitas vezes é feita de maneira incorreta.

Os vídeos utilizados nos testes não seguiram nenhum padrão no tocante a tempos de exposição e acionamento dos estímulos luminosos. Não há também vídeos e nem dados suficientes para que seja feita alguma conclusão estatística sobre o comportamento da pupila em resposta aos estímulos. Os testes realizados permitem apenas sugerir possíveis padrões que, por ventura, possam existir no comportamento pupilar. Para chegar a conclusões, diversos testes devem ser feitos com dados e vídeos preparados de forma correta.

## **5.2. CONCLUSÃO**

Os objetivos deste trabalho foram atingidos. Uma aplicação capaz de identificar e medir o diâmetro da pupila foi desenvolvida. A aplicação pode ser utilizada para processar vídeos com imagens do olho humano e gerar informações para posterior análise. Porém, diversas melhorias ainda são bem vindas.

Os dados que são obtidos pela execução dessa aplicação podem indicar padrões e comportamentos anômalos de uma pupila. Porém, conclusões sobre o significado desses dados não podem ser feitas com base apenas na observação estatística e carecem de estudos de diversas áreas além da computação.

## **5.3. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

O curto tempo disponível para implementar essa aplicação impediu que estudos mais aprofundados e implementações mais complexas pudessem ser feitas.

Futuramente pode-se estudar a utilização de histogramas das imagens (distribuição dos pixels na imagem pela intensidade de cor) para calcular o valor de threshold. Picos nos histogramas indicam regiões com pixels com características similares. Os pixels da pupila têm valores de cor muito próximos e identificá-los em histogramas pode facilitar e aumentar a precisão do valor de threshold.

A aplicação ainda utiliza muita memória RAM para processar os vídeos. Implementações de alocação de memória dinâmica podem ajudar a diminuir o uso de memória, permitindo processar vídeos com maior duração em menor tempo.

Por fim, uma aplicação para controlar o aparelho de captura deve ser desenvolvida. Com uma aplicação desse tipo, pode-se controlar precisamente os instantes em que o estímulo luminoso é ativado e em que intensidades. Com esse controle, diversos vídeos podem ser feitos com parâmetros fixos e conhecidos, deixando como variável apenas a reação da pupila, que é o objetivo de estudo. Com uma gama de vídeos para teste, conclusões estatísticas podem ser feitas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 
- <sup>1</sup> LAU, Jeffrey C. H.; *Development of a Pupilometer*. Departament of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, Auckland, Nova Zelândia. Disponível em <[http://www.ele.auckland.ac.nz/archives/reports2005/pdfs/Image%20Processing/proj\\_127\\_jlau027.pdf](http://www.ele.auckland.ac.nz/archives/reports2005/pdfs/Image%20Processing/proj_127_jlau027.pdf)> Acesso em 01 de novembro de 2007
- <sup>2</sup> CARVALHO, P. C. et al.; *Visão Computacional, Imageamento e Computação Gráfica*. Instituto de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro. Disponível em <[http://milenioimpa.br/novo/portugues/areas\\_visao.htm](http://milenioimpa.br/novo/portugues/areas_visao.htm)> Acesso em 05 de novembro de 2007
- <sup>3</sup> Wikipédia, A enciclopédia Livre. *Verbete Biometria*. Website visitado em 05 de novembro de 2007.
- <sup>4</sup> Wikipédia, A enciclopédia Livre. *Verbete Olho Humano*. Website visitado em 05 de novembro de 2007.
- <sup>5</sup> CARVALHO, L. A. V. de, ROMÃO, A. C.; 2003. *Instrumentação para Digitalização e Processamento Computacional da Pupila in vivo*. Instituto de Física de São Carlos – USP
- <sup>6</sup> LE GRAND Y., EL HAGE S. G. *Physiological Optics*. Springer Series in Opetical Sciences, Springer-Verlag, 1980;13
- <sup>7</sup> OKUNO E., IBERÊ L., CHOW C. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*, Ed. Harper & Row (1982)
- <sup>8</sup> GULLSTRAND A. In Helmholtz. *Treatise on Physiological Optics*. Ed. 3, 1 (1980)
- <sup>9</sup> RUSS, John C. *The Image Processing Handbook*. Quarta Edição. CRC Press, 2002
- <sup>10</sup> FORD, A., ROBERTS, A. *Color Spave Conversions*. 1998. Disponível em <<http://www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf>> Acesso em 14 de novembro de 2007
- <sup>11</sup> ALBUQUERQUE, M. P. de, ALBUQUERQUE, M. P. de. *Processamento de Imagens: Métodos e Análises*. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.cbpf.br/cat/pdsi/pdf/ProcessamentoImagens.PDF>> Acesso em 14 de novembro de 2007.

---

<sup>12</sup> JAMUNDÁ, T. *Reconhecimento de Formas: A transformada de Hough*. Seminário de Visão Computacional – CPGCC/UFSC, 2000. Disponível em  
<<http://www.inf.ufsc.br/~visao/2000/Hough/index.html>> Acesso em 15 de novembro de 2007

<sup>13</sup> DUDA, R. O.; HART, P. E. *Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures*. *Graphics and image processing* v. 15, n. 1, pp. 11-15. Janeiro 1988

<sup>14</sup> PEREIRA, Ademir S. 1995. *Processamento de Imagens Médicas utilizando a Transformada de Hough*. Tese apresentada ao Instituto de Física de São Carlos para obtenção do título de doutor em ciências físicas aplicadas. IFSC – USP, São Carlos.

<sup>15</sup> Página de referência do Bloodshed DEV-C++. Disponível em  
<<http://www.bloodshed.net/devcpp.html>> Acesso em 11 de setembro de 2007

<sup>16</sup> Página de referência da Open Source Computer Vision Library. Disponível em  
<<http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm>>. Acesso em 25 de agosto de 2007.

<sup>17</sup> Laboratório Ótico Rigor; *O Olho Humano – Anatomia*. Disponível em  
<<http://www.laboratoriorigor.com.br/anatomia.html>> Acesso em 15 de novembro de 2007