

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEXANDRE DAL PIZZOL BREGOLIN

**INSTRUMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE
CABEÇA DURANTE A AVALIAÇÃO DE EQUILÍBRIO.**

Porto Alegre
2013

ALEXANDRE DAL PIZZOL BREGOLIN

**INSTRUMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE
CABEÇA DURANTE A AVALIAÇÃO DE EQUILÍBRIO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dario F. G. de Azevedo, Ph.D.

Porto Alegre
2013

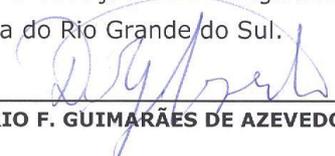


Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

INSTRUMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE CABEÇA DURANTE A AVALIAÇÃO DE EQUILÍBRIO

CANDIDATO: ALEXANDRE DAL PIZZOL BREGOLIN

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. DARIO F. GUIMARÃES DE AZEVEDO - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DR. VICENTE MARIANO CANALLI - FENG - PUCRS



DR. ALEXANDRE ROSA FRANCO - DO PPGEE/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3320.3540 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.eletrica@pucrs.br
www.pucrs.br/feng

Dedico este trabalho a meus pais,
Clóvis e Inês, que tanto
incentivaram e apoiaram o meu
crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e incentivo em minha educação e formação.

Agradeço ao meu orientador, Dario F. G. de Azevedo, Ph.D. por acreditar no meu potencial e ajudar em meu crescimento profissional.

Agradeço à Natasha Mendonça de Oliveira por me apoiar, ajudar, e estar sempre ao meu lado durante esta caminhada.

Agradeço aos meus colegas Lucas P. Prestes, Monica Martins, Vinícius H. Cene, Guilherme Sehnem, Saul e demais colegas do Laboratório de Imagens (LABIMA) que sempre estiveram dispostos em ajudar quando necessário.

Agradeço à PUCRS por ter financiado meu curso de mestrado.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um instrumento de auxílio à análise e pesquisa do equilíbrio humano. O instrumento atua fornecendo dados da quantificação dos movimentos seletivos de cabeça exercidos durante a medição do reflexo vestibulo-ocular (RVO).

O RVO atua na estabilização do olhar para assegurar uma visão clara durante os movimentos da cabeça. Uma das técnicas utilizadas na avaliação do sistema vestibular visa observar o RVO em resposta a movimentos seletivos da cabeça.

O algoritmo desenvolvido para este trabalho utiliza o processamento digital de dados tridimensionais adquiridos através de um sensor Kinect for Windows da Microsoft, e a detecção de marcas coloridas afixadas no dispositivo de quantificação do RVO em locais pré-determinados e com distâncias específicas entre as marcas.

O aplicativo desenvolvido permite a aquisição e exibição, de forma gráfica e sincronizada, dos dados adquiridos durante a quantificação dos estímulos utilizados durante a medição do RVO. Estes gráficos são correspondentes aos três possíveis sentidos de rotação de cabeça aos quais o RVO responde: horizontal (yaw), vertical (pitch) e de torção (roll). O aplicativo foi desenvolvido com a linguagem de programação C#.

Os testes para avaliar a robustez e precisão do instrumento foram realizados através de um dispositivo desenvolvido nesta tese, que desempenha de forma mecânica, através de movimentos controlados de um servomotor, o movimento das marcas. Estes movimentos foram programados de forma a simular os movimentos seletivos de cabeça em diferentes amplitudes e velocidades.

ABSTRACT

This thesis describes the development of an instrument in the analysis and research of human balance. The instrument operates by providing data quantifying the selective head movements performed during measurement of the vestibular-ocular reflex (VOR).

The VOR acts to stabilize the eye, to ensure a clear view during head movements. One of the techniques used in the evaluation of the vestibular system aims to observe the VOR in response to selective movements of the head.

The algorithm developed for this study uses digital signal processing of three-dimensional data acquired by a sensor Kinect for Windows from Microsoft, and the detection of colored marks affixed to the quantification device of VOR in predetermined locations and with specific distances between the marks.

The developed application allows the acquisition and display, graphically and synchronized, of the acquired data during the quantification of the stimuli used during the measurement of VOR. These graphs are corresponding to the three possible directions of rotation of the head where the VOR responds: horizontal (yaw), vertical (pitch) and torsional (roll). The application was developed with the C# programming language.

Tests to evaluate the robustness and accuracy of the instrument were conducted through a device developed in this thesis, which performs mechanically, by means of a servomotor controlled movements, the movement of the marks. These movements were programmed to simulate the selective movements of head at different amplitudes and velocities.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1 – Labirinto Membranoso e ósseo.....	18
Figura 2.1.2 – Reflexo vestibulo-ocular.....	19
Figura 2.1.3 – Determinação da frequência de impulsos conforme deflexão dos cílios da crista ampular.....	21
Figura 2.2.1 – Espectro da energia eletromagnética	22
Figura 2.2.2 – Esquema do cubo de cores RGB.....	23
Figura 2.2.3 – Ilustração de uma imagem colorida em RGB.....	24
Figura 2.2.4 – Modelo de cores HSV.....	25
Figura 2.2.5 – Ponto representando uma cor arbitrária.....	25
Figura 2.2.6 – Exemplo de uma <i>Depth Image</i>	26
Figura 2.2.7 – Histograma de uma imagem digital em tons de cinza.....	27
Figura 2.2.8 – Histograma de uma imagem digital colorida (HSV).....	28
Figura 2.2.9 – Ilustração da caixa indicando os valores de <i>thresholding</i> por cor.	30
Figura 2.2.10 – <i>Conectividade-4 e conectividade-8</i>	32
Figura 2.2.11 – Extração de BLOBs por conectividade-4 e conectividade-8.....	33
Figura 3.3.1 – Sensor <i>Kinect for Windows</i>	36
Figura 3.3.2 – Sensor Kinect sem carcaça.....	36
Figura 3.4.1 – Hardware do instrumento quantificador do RVO.....	37
Figura 3.4.2 – Diagrama Básico do Software.....	38
Figura 3.5.1 – Placa com as marcas coloridas afixadas em um mesmo plano...	41
Figura 3.5.2 – Orientação das coordenadas espaciais para o sensor Kinect.....	42
Figura 3.5.3 – Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido.....	42
Figura 3.5.4 – Calibração inicial do algoritmo.....	44
Figura 3.5.5 – Triângulo retângulo projetado no espaço tridimensional.....	45
Figura 3.5.6 – Inclinação da reta entre o centro das marcas.....	45
Figura 3.5.7 – Movimentos de cabeça <i>yaw, pitch e roll</i>	46
Figura 3.6.1 – Visão geral do dispositivo simulador de movimento das marcas fiduciárias.....	47
Figura 3.6.2 – Servomotor TowerPro MG995	48
Figura 3.6.3 – Placa Netduino Plus 2 localizada no dispositivo simulador de movimentos das marcas fiduciárias.....	48

Figura 3.6.4 – Dispositivo simulador com acessórios para fixação das placas com as marcas fiduciárias.....	49
Figura 3.7.1 – Fluxograma de utilização do aplicativo.....	50
Figura 3.7.2 – Login de Usuário.....	51
Figura 3.7.3 – Interface de thresholding do aplicativo.....	52
Figura 3.7.4 – Tela auxiliar com a exibição do histograma da imagem colorida..	53
Figura 3.7.5 – Imagem do aplicativo de quantificação do RVO utilizado nesta tese.....	55
Figura 3.7.6 – Ferramentas de suporte à análise do RVO.....	55
Figura 3.7.7 – Interface de calibração inicial das distâncias entre as marcas fiduciárias.....	57
Figura 3.7.8 – Interface de medição dos estímulos.....	60
Figura 3.7.9 – Interface de medição dos estímulos sendo recalibrada para quantificação dos estímulos com movimentos angulares <i>yaw</i> e uma inclinação <i>pitch</i> de 30 graus.....	61
Figura 3.7.10 – Representação da tela da ferramenta para análise de resultados.....	63
Figura 3.7.11 Campos de personalização na detecção de picos no gráfico dos estímulos.....	63
Figura 4.1.1 – Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos <i>yaw</i>	65
Figura 4.1.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i>	66
Figura 4.2.1 – Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos <i>pitch</i>	67
Figura 4.2.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>pitch</i>	68
Figura 4.3.1 – Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos <i>roll</i>	69
Figura 4.3.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>roll</i>	70
Figura 4.4.1 – Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração do teste para movimento <i>yaw</i> com inclinação <i>pitch</i> de 30°.....	71
Figura 4.4.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i> com inclinação <i>pitch</i> de 30°.....	72

Figura 4.5.1 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i> com velocidade estimada em 59,08°/s.....	73
Figura 4.5.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i> com velocidade estimada em 84,03°/s.....	73
Figura 4.5.3 – Gráfico correspondente à velocidade angular média, a cada dois picos detectados, do movimento angular simulado <i>yaw</i> com velocidade angular estimada em 59,08°.....	74
Figura 4.5.4 – Gráfico correspondente à velocidade angular média, a cada dois picos detectados, do movimento angular simulado <i>yaw</i> com velocidade angular estimada em 84,03°.....	74
Figura 4.6.1 – Imagem colorida no teste com iluminação incandescente.....	76
Figura 4.6.2 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i> no teste com iluminação incandescente.....	77
Figura 4.6.3 – Imagem colorida no teste com iluminação natural.....	78
Figura 4.6.4 – Gráfico correspondente ao movimento angular simulado <i>yaw</i> no teste com iluminação natural.....	78
Figura 4.7.1 – Instrumento quantificador do RVO adaptado para realização do teste integrado.....	80
Figura 4.7.2 – Gráfico do movimento ocular quantificado no teste integrado.....	81
Figura 4.7.3 – Gráfico correspondente ao movimento ocular sobreposto ao gráfico correspondente ao movimento de cabeça.....	81
Figura 4.7.4 – O gráfico correspondente à velocidade angular média a cada dois picos detectados no gráfico dos movimentos de cabeça.....	82
Figura 4.7.5 – Visão geral da ferramenta de análise de resultados durante a avaliação do teste integrado.....	82

LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1.1 – Módulos do Projeto..... 34

LISTA DE SIGLAS

FPS – *Frames Per Second*

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

LABIMA – Laboratório de Imagens - Faculdade de Engenharia da PUCRS

RGB – *Red, Green, Blue*

HSV – *Hue, Saturation, Value*

RVE – Reflexo vestibulo-espinhal

RVO – Reflexo vestibulo-ocular

USB – *Universal Serial Bus*

SNC – Sistema Nervoso Central

BLOB – *Binary Large Object*

IR – Iluminação Infravermelha

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1 SISTEMA VESTIBULAR.....	18
2.1.1 Canais Semicirculares	20
2.1.2 Processamento de Imagens da Vídeo-oculografia.....	21
2.2 IMAGEM	21
2.2.1 Imagem Colorida.....	22
<u>2.2.1.1 Modelo de Cores.....</u>	<u>22</u>
2.2.2 <i>Depth Image</i>	25
2.2.3 Histograma de uma Imagem.....	26
2.2.4 <i>Thresholding</i>	29
<u>2.2.4.1 <i>Thresholding</i> por Intensidade.....</u>	<u>29</u>
<u>2.2.4.2 <i>Thresholding</i> por Cor.....</u>	<u>29</u>
2.2.5 Relacionamento Básico entre Pixels.....	30
<u>2.2.5.1 Vizinhaça entre Pixels.....</u>	<u>31</u>
<u>2.2.5.2 Conectividade entre Pixels.....</u>	<u>31</u>
2.2.6 BLOB	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 PRINCIPAIS DISPOSITIVOS	33
3.2 FERRAMENTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE UTILIZADAS.....	34
3.3 SENSOR KINECT FOR WINDOWS.....	35
3.4 INSTRUMENTO QUANTIFICADOR DO RVO	37
3.4.1 Integração com Instrumento Quantificador do RVO.....	38
3.5 ALGORITMO PARA QUANTIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CABEÇA..	40
3.6 DISPOSITIVO PARA TESTES E VALIDAÇÃO DO INSTRUMENTO.....	47
3.7 APLICATIVO DESENVOLVIDO	49

3.7.1 Requisitos de Sistema	50
3.7.2 Telas de Interface do Aplicativo.....	51
<u>3.7.2.1 Login de Usuário.....</u>	51
<u>3.7.2.2 Thresholding.....</u>	51
<u>3.7.2.3 Calibração do Instrumento Quantificador do RVO.....</u>	53
<u>3.7.2.4 Calibração do Instrumento de Quantificação de Estímulos.....</u>	56
<u>3.7.2.5 Medição dos Estímulos.....</u>	58
<u>3.7.2.6 Ferramenta para Análise de Resultados.....</u>	61
4 RESULTADOS: TESTES E VALIDAÇÕES	64
4.1 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO YAW)	65
4.2 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO PITCH).....	67
4.3 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO ROLL).....	68
4.4 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO YAW COM INCLINAÇÃO PITCH DE 30°).....	70
4.5 TESTES DE CAPTURA EM MEDIÇÃO DE VELOCIDADE ANGULAR.....	72
4.6 TESTES DE CAPTURA COM DIFERENTES TIPOS DE ILUMINAÇÃO.....	75
4.6.1 Captura com Luz Fluorescente.....	75
4.6.2 Captura com Luz Incandescente.....	76
4.6.3 Captura com Luz Natural.....	77
4.7 TESTE INTEGRADO (QUANTIFICADOR DO RVO E DE ESTÍMULOS).....	79
5 CONCLUSÕES.....	83
5.1 APLICAÇÕES.....	83
5.2 ALGORITMO DESENVOLVIDO.....	83
5.3 APLICATIVO DESENVOLVIDO.....	84
5.4 INTEGRAÇÃO (INSTRUMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DO RVO E DE ESTÍMULOS).....	84
6 TRABALHOS FUTUROS.....	85

REFERÊNCIAS..... 86

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do sistema vestibular, responsável pela manutenção do equilíbrio humano, pode ser feita através de diversas técnicas que visam observar as respostas deste sistema a determinados estímulos externos.

Algumas das técnicas utilizadas visam observar o reflexo vestíbulo-ocular (RVO) em resposta a movimentos seletivos da cabeça na forma de movimentos oculares compensatórios a fim de manter a linha de visão. Estes movimentos oculares podem ser medidos através de técnicas de aquisição, digitalização e processamento de imagens que são adquiridas sob iluminação infravermelha (IR), por meio de câmeras adaptadas em um óculos afixado na cabeça do paciente.

Neste trabalho, foi desenvolvido um instrumento para quantificar movimentos de cabeça que são desempenhados durante a medição do reflexo vestíbulo-ocular. Este instrumento utiliza o processamento de dados tridimensionais adquiridos através de um sensor *Kinect for Windows* da Microsoft. A quantificação dos movimentos foi desenvolvida através da detecção de marcas coloridas afixadas no instrumento que quantifica o RVO em locais pré-determinados e com distâncias específicas entre as marcas.

O instrumento desenvolvido possui aplicabilidade em áreas como: Medicina (no apoio à análise de disfunções do sistema vestibular) e na área de pesquisas relacionadas ao sistema vestibular.

1.1 OBJETIVO

Desenvolver um instrumento para quantificar os movimentos seletivos da cabeça que são executados, como estímulo, durante o exame de quantificação do reflexo vestibulo-ocular (RVO). Os dados deverão ser obtidos de forma sincronizada para serem exibidos graficamente.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um algoritmo para quantificar os movimentos seletivos da cabeça;
- Desenvolver um aplicativo para exibir de forma gráfica os movimentos de cabeça isoladamente para cada um dos três eixos de rotação (em torno do eixo z – denominado de yaw, em torno do eixo y – denominado de pitch e em torno do eixo x – denominado de roll), e a extração de dados de velocidade angular e amplitudes dos movimentos de cabeça.
- Desenvolver um dispositivo de teste para simular de forma mecânica os movimentos das marcas.
- Integrar a aquisição de dados entre o exame de quantificação do RVO e o instrumento quantificador dos movimentos seletivos da cabeça de forma sincronizada.

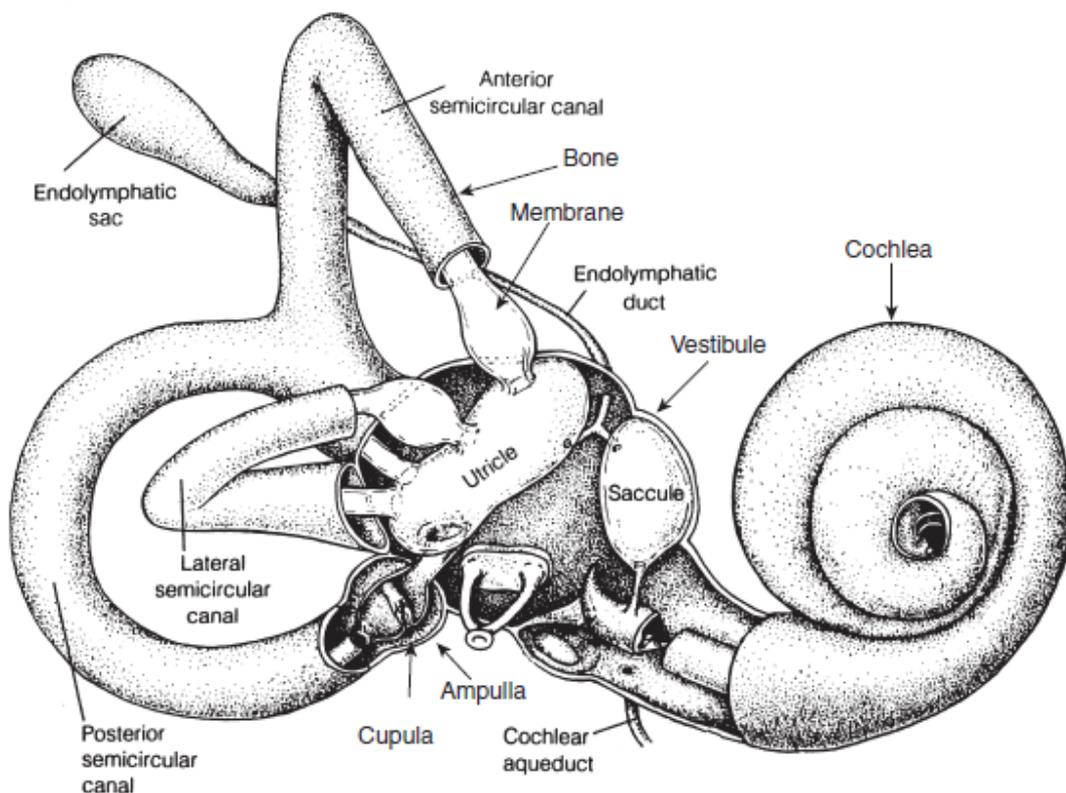
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 SISTEMA VESTIBULAR

O sistema vestibular humano possui componentes sensoriais periféricos que enviam informações ao sistema nervoso central (SNC), especificamente ao complexo nuclear vestibular e ao cerebelo, sobre velocidade angular e aceleração linear da cabeça (HERDMAN, 2007).

O sistema vestibular periférico (Figura 2.1.1) está situado no ouvido interno e é constituído por um labirinto membranoso, contido dentro de um labirinto ósseo, e amortecido por um líquido chamado perilíngua (HERDMAN, 2007) (ZEE, 1999). O labirinto membranoso possui cinco órgãos sensoriais: três canais semicirculares (que atuam como sensores de rotação de cabeça) e dois órgãos otólitos, o utrículo e o sáculo (que atuam como sensores de aceleração linear de cabeça) (HERDMAN, 2007) (ZEE, 1999).

Figura 2.1.1 - Labirinto Membranoso e ósseo



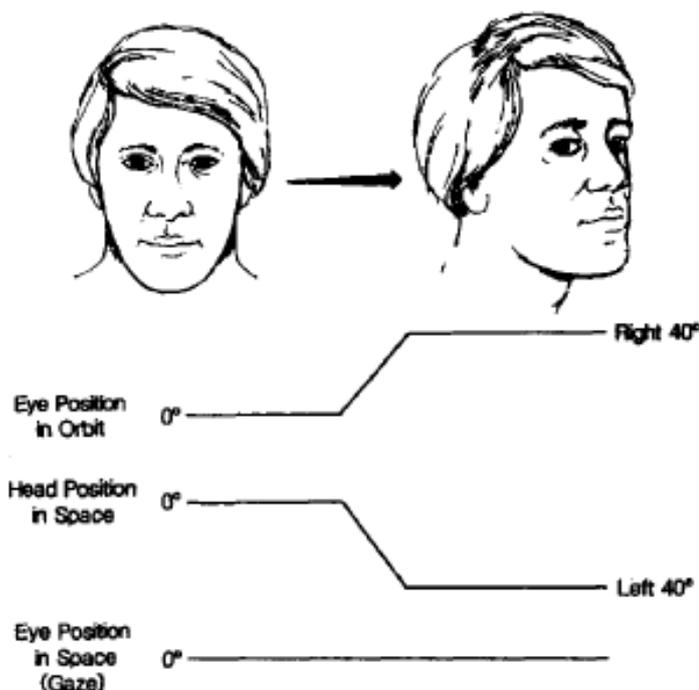
Fonte: Herdman (2007).

O processador central do sistema vestibular, composto pelo complexo nuclear vestibular e o cerebelo, processa os sinais recebidos através do SNC e os transmite para mecanismos de resposta motora - os músculos extraoculares e a medula espinhal - originando os reflexos vestibulo-ocular (RVO) e vestibulo-espinhal (RVE) (HERDMAN, 2007).

O RVO atua na estabilização do olhar (*gaze*) para assegurar uma visão clara durante os movimentos da cabeça, isto porque os movimentos de olho por estimulação vestibular são muito mais rápidos que os visualmente mediados. A Figura 2 exemplifica a atuação do RVO gerando um movimento ocular apropriado, referente a um movimento da cabeça, para o olhar ser mantido estável e a imagem visualizada permanecer relativamente estacionária na retina (ZEE, 1999).

O RVO responde a três possíveis sentidos de rotação da cabeça: horizontal (em torno do eixo z – denominado de *yaw*), vertical (em torno do eixo y – denominado de *pitch*) e torção (em torno do eixo x – denominado de *roll*). O centro de rotação da cabeça está situado excentricamente nas órbitas (ZEE, 1999).

Figura 2.1.2 - Reflexo vestibulo-ocular. À medida que a cabeça rotaciona 40° para a esquerda, os olhos se movem em um valor correspondente na órbita à direita. O gráfico mostra a posição da cabeça no espaço em relação ao tempo e a posição do olho na órbita em relação ao tempo.



Fonte: Zee (1999).

2.1.1 Canais Semicirculares

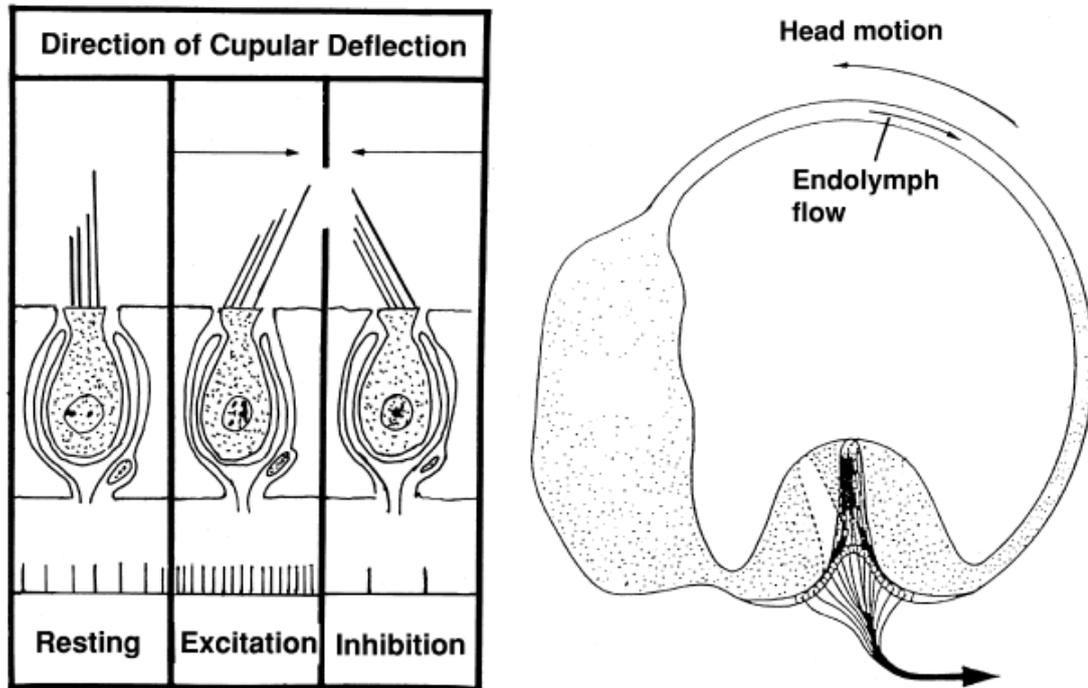
Os canais semicirculares estão localizados no ouvido interno e fazem parte dos cinco órgãos sensoriais do labirinto membranoso, como visto na Seção 2.1. Estes canais atuam fornecendo informações sensoriais sobre velocidade angular da cabeça ao SNC, de forma a permitir ao RVO gerar um movimento de olho adequado que seja compatível à velocidade do movimento de cabeça.

Cada canal semicircular é responsável por um plano de rotação da cabeça, e são denominados: canal lateral, canal anterior e canal posterior. Estes canais são preenchidos por um fluído chamado endolinfa.

Na extremidade de cada canal semicircular é encontrado um espaço mais largo do canal chamado de ampola. Na ampola estão contidos cílios especializados que convertem deslocamento, devido ao movimento da endolinfa (ocasionado por um movimento da cabeça), em impulsos neurais enviados ao SNC. Estes cílios especializados estão localizados em um aglomerado de vasos sanguíneos, fibras nervosas e tecido especial denominado crista ampular. Quando ocorre a deflexão dos cílios da crista ampular, impulsos são enviados ao SNC, de forma a decrementar ou incrementar a sua frequência de sinal referente ao estado de repouso, conforme ilustrado na Figura 2.1.3.

O canal semicircular lateral (referente ao plano horizontal) se encontra flexionado 30° para cima, de forma que ele pode ser estimulado de maneira independente quando a cabeça é flexionada 30° para baixo (HERDMAN, 2007).

Figura 2.1.3 - Determinação da frequência de impulsos conforme deflexão dos cílios da crista ampular



Fonte: Herdman (2007).

2.1.2 Processamento de Imagens da Vídeo-oculografia

A vídeo-oculografia tem como objetivo capturar as imagens oculares por meio de câmeras de vídeo sensíveis ao infravermelho. Esta técnica permite quantificar o movimento dos olhos em todo o seu limite orbital e o movimento rotacional, além de ser totalmente não invasivo ao paciente. Esta técnica tem a necessidade de alto esforço computacional (BALOH, 1990) (HEARDMAN, 2007).

2.2 IMAGEM

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional $f(x,y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais de um plano e o valor da amplitude de f é chamado de intensidade ou nível de cinza da imagem neste ponto. Quando os valores das coordenadas espaciais x e y , e da amplitude de f são quantidades finitas e discretas, esta imagem é definida como uma imagem digital.

Cada elemento de uma imagem digital possui uma localização e um valor específico, que são denominados de elementos pictóricos ou pixel (GONZALEZ, 2010).

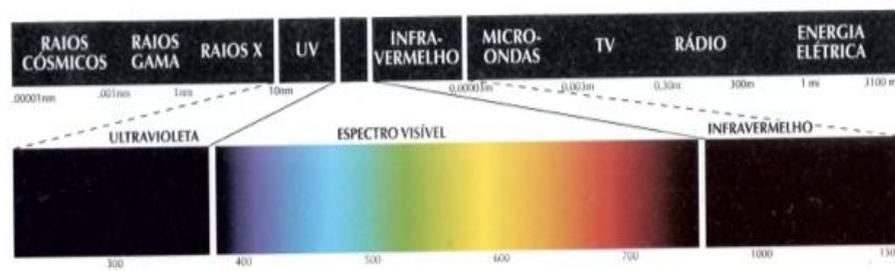
2.2.1 Imagem Colorida

A caracterização da luz é fundamental para a ciência das cores. Se a luz for acromática (sem cores) seu único atributo será a intensidade.

A luz cromática, que engloba o espectro visível da energia eletromagnética (aproximadamente 400 a 700 nm – ilustrado na Figura 2.2.1), pode ser descrita por três atributos: radiância, luminância e brilho (GONZALEZ, 2010):

- Radiância: Quantidade de energia que flui da fonte de luz, medida em watts(W).
- Luminância: Quantidade de energia percebida por um observador, medida em lumens (lm).
- Brilho: Noção acromática de intensidade da luz.

Figura 2.2.1 - Espectro da energia eletromagnética



Fonte: Gonzalez (2010).

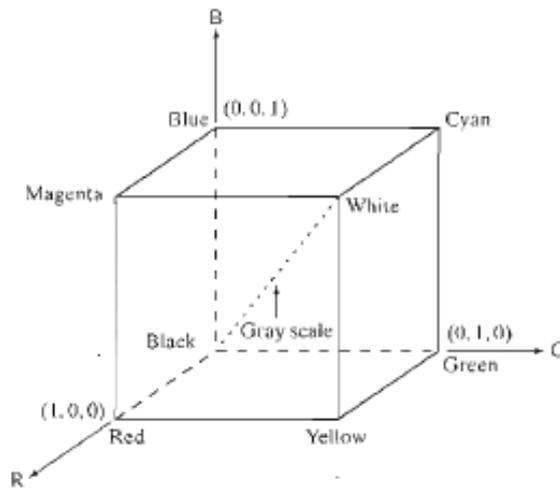
2.2.1.1 Modelo de Cores

Os modelos de cores foram criados com o propósito de padronização, de forma a facilitar as especificações das cores. A maioria destes modelos é voltada a implementação de hardware (câmeras, monitores, impressoras), ou para aplicações envolvendo manipulação de cores (criação de imagens coloridas). Alguns dos

modelos mais utilizados são RGB - vermelho, verde, azul - e HSV - matiz, saturação e valor (ou brilho) que corresponde ao modo como os seres humanos interpretam as cores (GONZALEZ, 2010).

O modelo de cores RGB baseia-se em um sistema de coordenadas cartesianas e cada cor é representada por seus componentes espectrais primários: vermelho, verde e azul. O subespaço de cores é o cubo apresentado na Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2 - Esquema do cubo de cores RGB

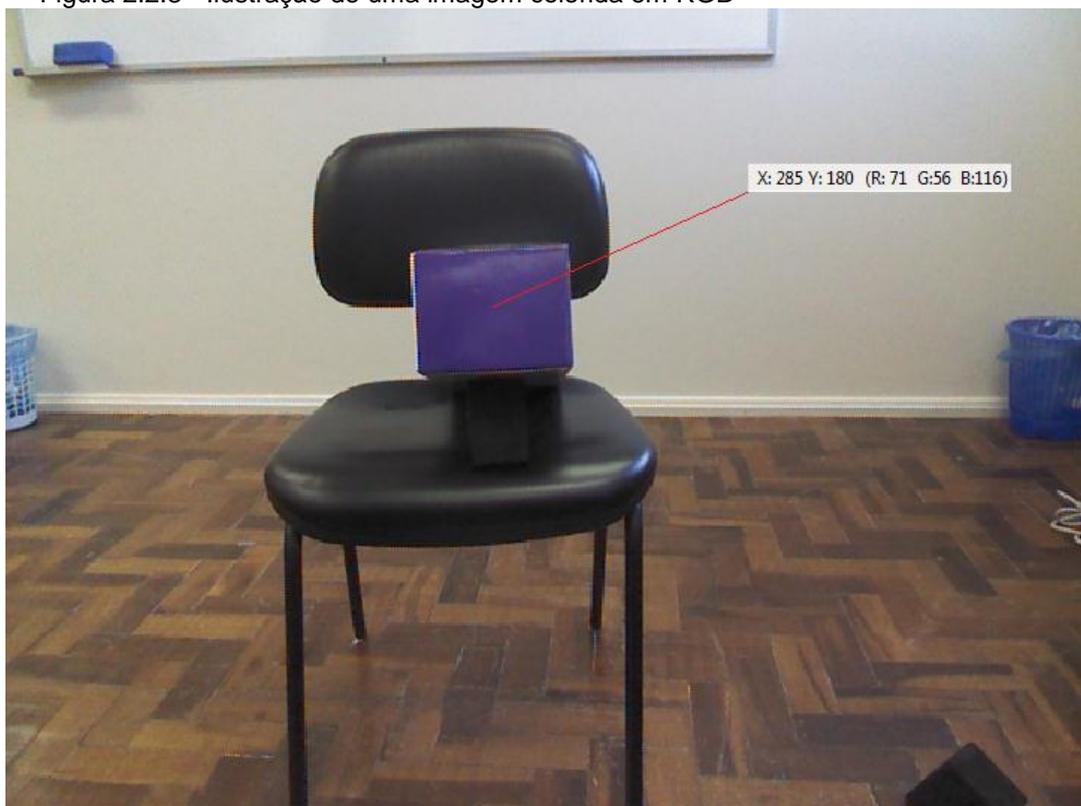


Fonte: Gonzalez (2010).

Cada cor corresponde a um ponto no cubo e é definida por um vetor que se estendem a partir da origem. Neste modelo a escala de cinza se estende do preto até o branco em uma reta diagonal maior do cubo (Figura 2.2.2).

O modelo RGB é amplamente utilizado em câmeras de vídeo coloridas, que medem a quantidade de luz vermelha, verde e azul incidida. Em uma imagem digital colorida em RGB, cada pixel consiste em três valores de amplitude referente a cada componente de cor primário, e o número de bits utilizado para representar cada pixel é denominado de profundidade do pixel. A Figura 2.2.3 ilustra uma imagem digital em RGB, com um valor de pixel indicado (GONZALEZ, 2010).

Figura 2.2.3 - Ilustração de uma imagem colorida em RGB

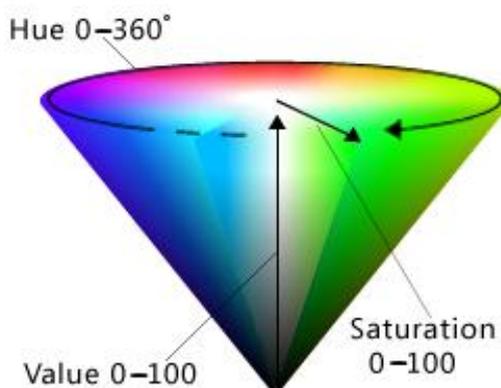


Fonte: O autor (2013).

O modelo de cores HSV - *matiz, saturação e valor (ou brilho)* – é o mais indicado para manipulação de cores (JACK, 2007). O valor de *matiz* indica o comprimento de onda dominante na luz e representa a cor percebida pelo observador. A *saturação* define a pureza desta cor, ou a quantidade de luz branca misturada a um matiz, e o *valor* define uma noção acromática (brilho), sendo um dos principais fatores na descrição da sensação de cores (GONZALEZ, 2010).

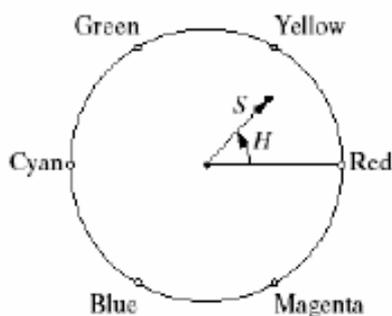
O modelo HSV pode ser ilustrado através da Figura 2.2.4, onde rotacionando o valor de *H* de 0° a 360° (a partir da posição referente à cor vermelha) pode-se obter qualquer valor do espectro de cores (Figura 2.2.5).

Figura 2.2.4 - Modelo de cores HSV



Fonte: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/aa511283.aspx>. Acesso em 08/11/2012.

Figura 2.2.5 - Ponto representando uma cor arbitraria



Fonte: Gonzalez (2010).

2.2.2 Depth Image

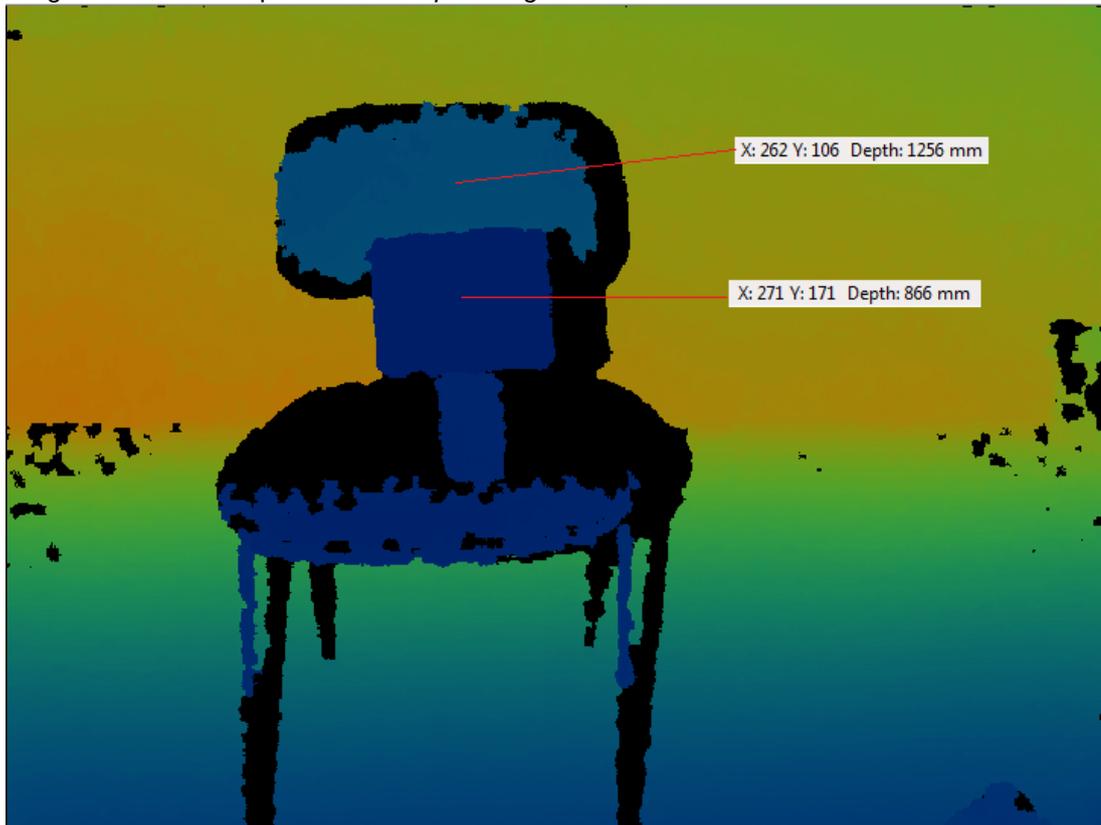
Uma imagem de profundidade (*depth image*), que é gerada por sensores como o *Kinect for Windows* da Microsoft, pode ser caracterizada como um “mapa de profundidades” de seu campo de visão. Cada pixel desta imagem é a medida da distância entre um ponto específico e o sensor.

A *depth image* é, de certo modo, parecida com uma imagem gerada por câmera de vídeo. Os dois tipos de imagem possuem pixels com valores específicos para coordenadas x e y , com a diferença de que uma *depth image* é constituída de valores de profundidade, e não valores de intensidades (considerando imagem em escala de cinza).

A Figura 2.2.6 exemplifica uma *depth image*. Esta imagem foi gerada utilizando um sensor *Kinect for Windows* e um software que acompanha seu kit de desenvolvimento. As distâncias foram renderizadas automaticamente através do

software utilizado, de forma a demonstrar de modo visível as diferentes distâncias dentro da mesma imagem. Um valor de pixel foi indicado para apresentação do valor de suas coordenadas espaciais (x e y) e sua distância para o sensor (em milímetros).

Figura 2.2.6 - Exemplo de uma *Depth Image*

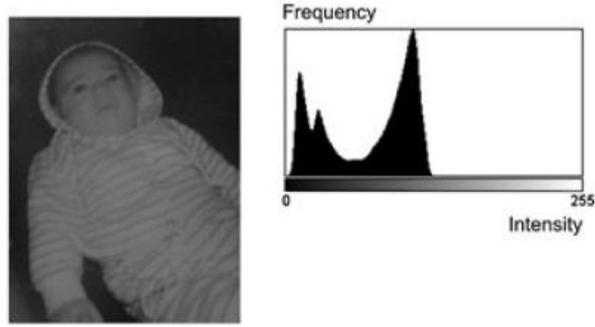


Fonte: O autor (2013).

2.2.3 Histograma de uma Imagem

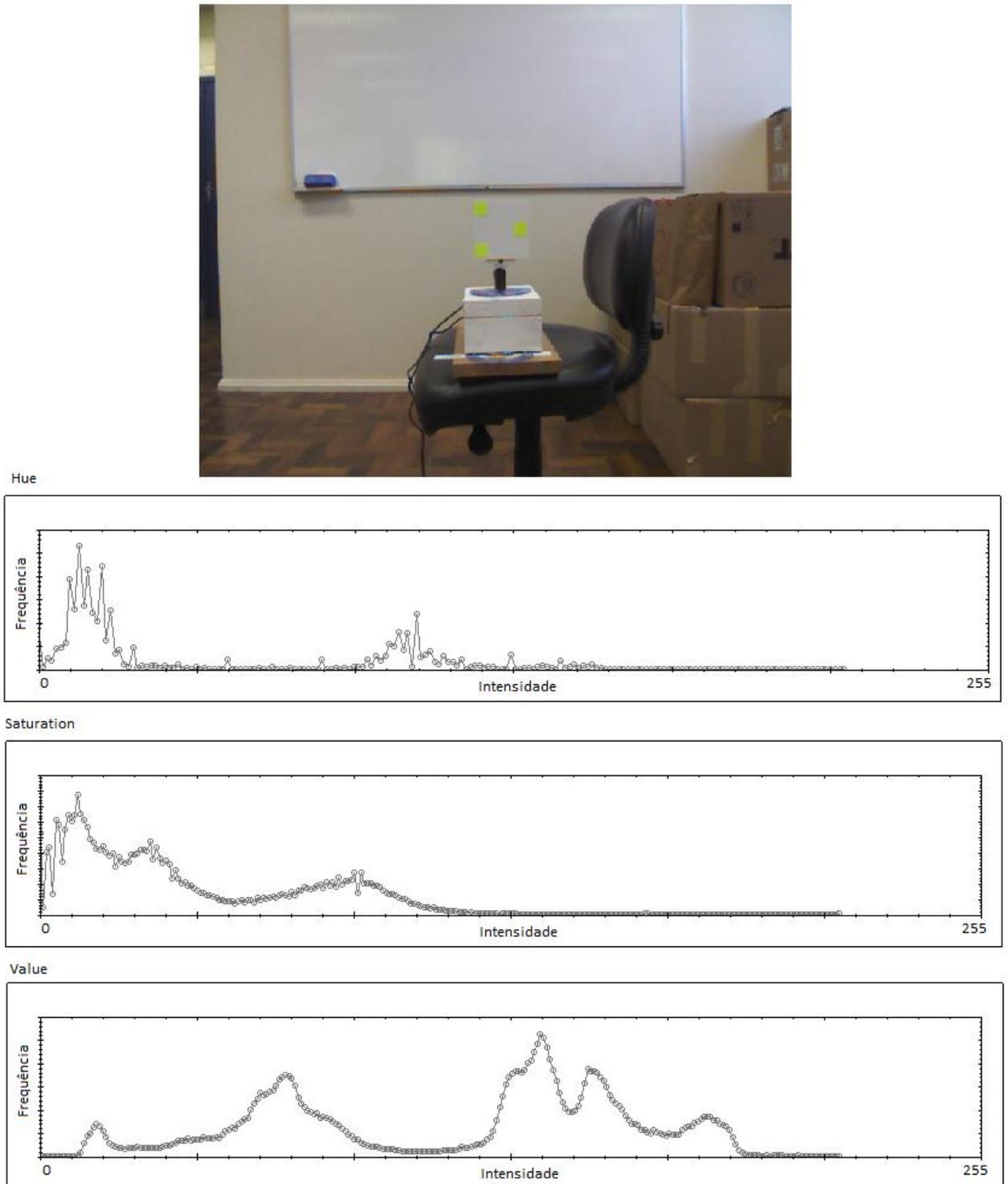
O histograma é uma representação gráfica da frequência de ocorrências de um determinado evento. Em uma imagem digital em tons de cinza, o histograma mostra a frequência de ocorrência de cada um dos tons, como pode ser exemplificado na Figura 2.2.7. O histograma de uma imagem digital colorida pode ser obtido da mesma forma, porém, separadamente para cada canal de cor (RGB ou HSV, por exemplo). A Figura 2.2.8 exemplifica um histograma de uma imagem digital colorida HSV (MOESLUND, 2012).

Figura 2.2.7 - Histograma de uma imagem digital em tons de cinza



Fonte: Moeslund (2012).

Figura 2.2.8 - Histograma de uma imagem digital colorida (HSV)



Fonte: O autor (2013).

2.2.4 *Thresholding*

Thresholding é um método de limiarização muito utilizado para segmentação de imagens.

2.2.4.1 *Thresholding por Intensidade*

Supondo uma imagem em tons de cinza $f(x, y)$ contendo objetos claros sobre um fundo escuro. Uma maneira de extrair os objetos do fundo é selecionando um limiar T que separe estes modos – claro e escuro. Desta forma, qualquer ponto na imagem em que $f(x, y) > T$ é chamado de ponto do objeto, caso contrário, é chamado de ponto do fundo (GONZALEZ, 2010).

Sendo assim, a imagem segmentada é definida por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) > T \\ 0, & \text{se } f(x, y) < T \end{cases} \quad \text{eq. (1)}$$

2.2.4.2 *Thresholding por Cor*

Esta operação é semelhante à opção de *thresholding* citada no item 2.2.4.1, com a diferença de que cada pixel de cada canal de cor é comparado por dois valores de *threshold* (considerando limiares duplos). Cada cor de pixel contida no intervalo da limiarização é definida como ponto do objeto. Se não estiver contido no intervalo é definido como ponto de fundo (MOESLUND, 2012). O algoritmo que exemplifica esta operação é:

If

$R > R_{\min}$ and $R < R_{\max}$ and

$G > G_{\min}$ and $G < G_{\max}$ and

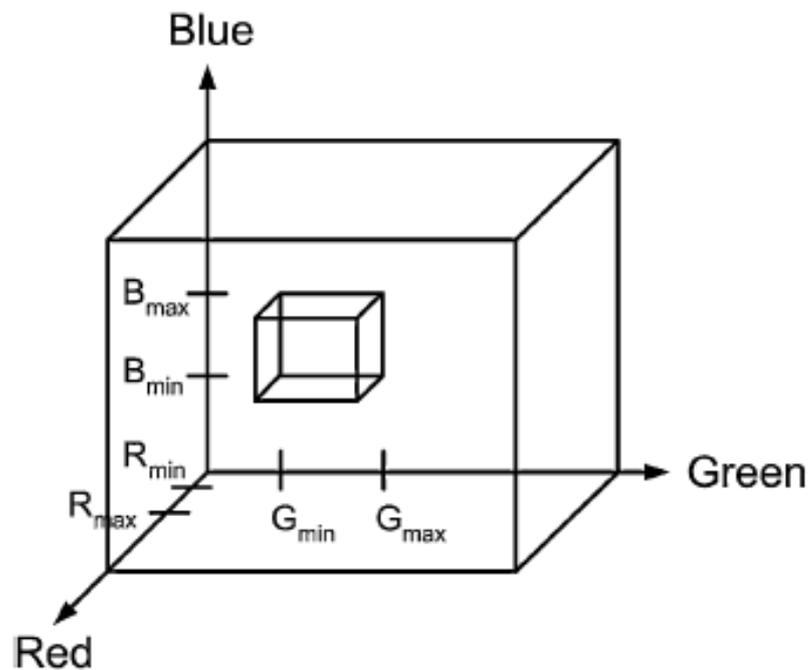
$B > B_{\min}$ and $B < B_{\max}$

Then $g(x, y) = 255$

Else $g(x, y) = 0$

Este algoritmo atua definindo uma “caixa” no espaço de cores RGB, como a ilustrada na Figura 2.2.9, onde os valores contidos nesta caixa são os pontos do objeto.

Figura 2.2.9 - Ilustração da caixa indicando os valores de *thresholding* por cor



Fonte: Moeslund (2012).

2.2.5 Relacionamento Básico entre Pixels

2.2.5.1 Vizinhança entre Pixels

Um dos principais conceitos no relacionamento entre pixels é o conceito de vizinhança. Um pixel p com coordenadas espaciais x e y tem quatro vizinhos horizontais e verticais, cujas coordenadas são dadas por (GONZALEZ, 2010):

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1)$$

Este conjunto de pixels é chamado de *vizinhança-4* do pixel p .

Os quatro vizinhos diagonais de p tem coordenadas:

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1)$$

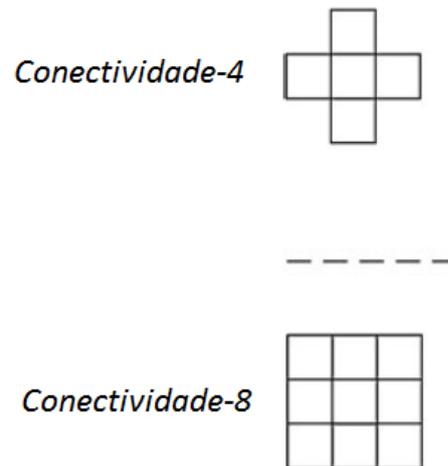
Esses pontos, juntamente com a *vizinhança-4*, são chamados de *vizinhança-8* de p (GONZALEZ, 2010).

2.2.5.2 Conectividade entre Pixels

Sendo S um conjunto de pixels em uma imagem, diz-se que dois pixels p e q são conectados em S quando houver um caminho entre eles consistindo inteiramente de pixels em S . Para qualquer pixel p em S , o conjunto de pixels conectados a ele, em S , é chamado de um *componente conectado* de S (GONZALEZ, 2010).

Utilizando os conceitos de *vizinhança-4* e *vizinhança-8* descritos na Seção 2.2.5.1, se os pixels destas vizinhanças forem conexos, são denominados de *conectividade-4* e *conectividade-8* (Figura 2.2.10).

Figura 2.2.10 - *Conectividade-4 e conectividade-8.*



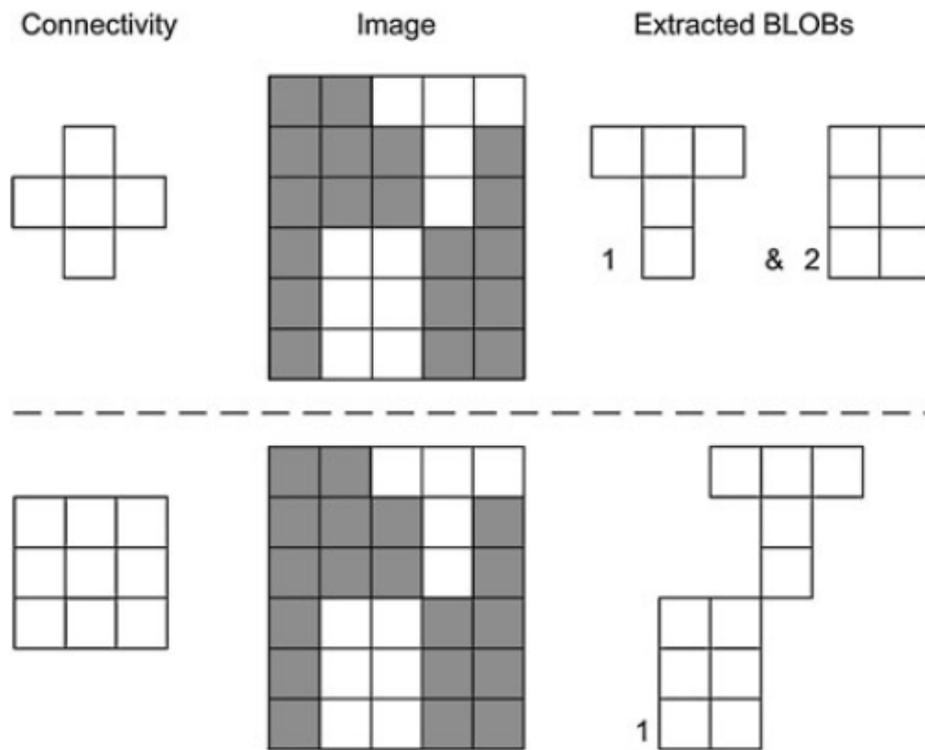
Fonte: Moeslund (2012).

2.2.6 BLOB

BLOB (*Binary Large Object*) consiste em um grupo de pixels conectados (*componentes conectados*) em uma imagem binária. O termo “*Large*” indica que apenas objetos do tamanho de interesse são considerados como um BLOB (MOESLUND, 2012). Desta forma, os demais componentes restantes da imagem são filtrados.

Os dois tipos de conectividade mais utilizados na detecção de BLOBs são *conectividade-4* e *conectividade-8*. A Figura 2.2.11 ilustra BLOBs detectados por estes tipos de conectividade.

Figura 2.2.11 - Extração de BLOBs por *conectividade-4* e *conectividade-8*



Fonte: Moeslund (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PRINCIPAIS DISPOSITIVOS

Os principais dispositivos e ferramentas utilizados no desenvolvimento do projeto foram:

- Óculos para quantificação do reflexo vestibulo-ocular (RVO) (Desenvolvido no Laboratório de Imagem – LABIMA – da PUCRS).
- Sensor Kinect for Windows da Microsoft.
- Computador para processamento de imagens.
- Software de desenvolvimento para a linguagem de programação C# (Visual Studio 2010).

Na Tabela 3.1.1 pode-se visualizar os módulos principais desenvolvidos

durante o projeto proposto.

Tabela 3.1.1 – Módulos do Projeto

Item	Nome	Especificação
1	Algoritmo para quantificação dos estímulos	Desenvolvimento do algoritmo para quantificar de forma adequada os movimentos seletivos da cabeça.
2	Aplicativo	Desenvolvimento do aplicativo para exibir de forma gráfica os movimentos de cabeça isoladamente para cada um dos três eixos de rotação (<i>yaw</i> , <i>pitch</i> e <i>roll</i>).
3	Dispositivo simulador de movimento das marcas fiduciárias	Desenvolvimento do dispositivo de teste para simular de forma mecânica os movimentos das marcas.
4	Integração (Quantificador do RVO e estímulo)	Integração da aquisição de dados entre o exame de quantificação do RVO e o instrumento quantificador dos movimentos seletivos da cabeça de forma sincronizada.

Fonte: O autor (2013).

3.2 FERRAMENTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE UTILIZADAS

- Visual Studio 2010

O aplicativo desta tese foi desenvolvido com a linguagem de programação C#, através do programa para desenvolvimento de software da Microsoft Visual Studio 2010.

- Kinect For Windows SDK

Kit de desenvolvimento para o Kinect da Microsoft. Contém um conjunto de bibliotecas que permite programar aplicações em uma variedade de plataformas de desenvolvimento da Microsoft utilizando o sensor Kinect como entrada de dados (WEBB, 2012).

- OpenCV

OpenCV é uma biblioteca de Computer Vision criada pela Intel. Foi desenvolvida para ter alta eficiência computacional e é fortemente focada em aplicações de tempo real. Esta biblioteca contém mais de 500 funções que cobrem grande parte das técnicas utilizadas em processamento de imagens (BRADSKI, 2008).

- Emgu CV

O Emgu CV é um “empacotador” de acesso à biblioteca OpenCV, permitindo a sua utilização através da linguagem de programação C#. Além disso, inclui novas bibliotecas de processamento de imagens focadas em técnicas como BLOB (Seção 2.2.6).

- ZedGraph

Ferramenta para desenvolvimento de gráficos escrita em C#. Permite customização detalhada de seu funcionamento.

3.3 SENSOR KINECT FOR WINDOWS

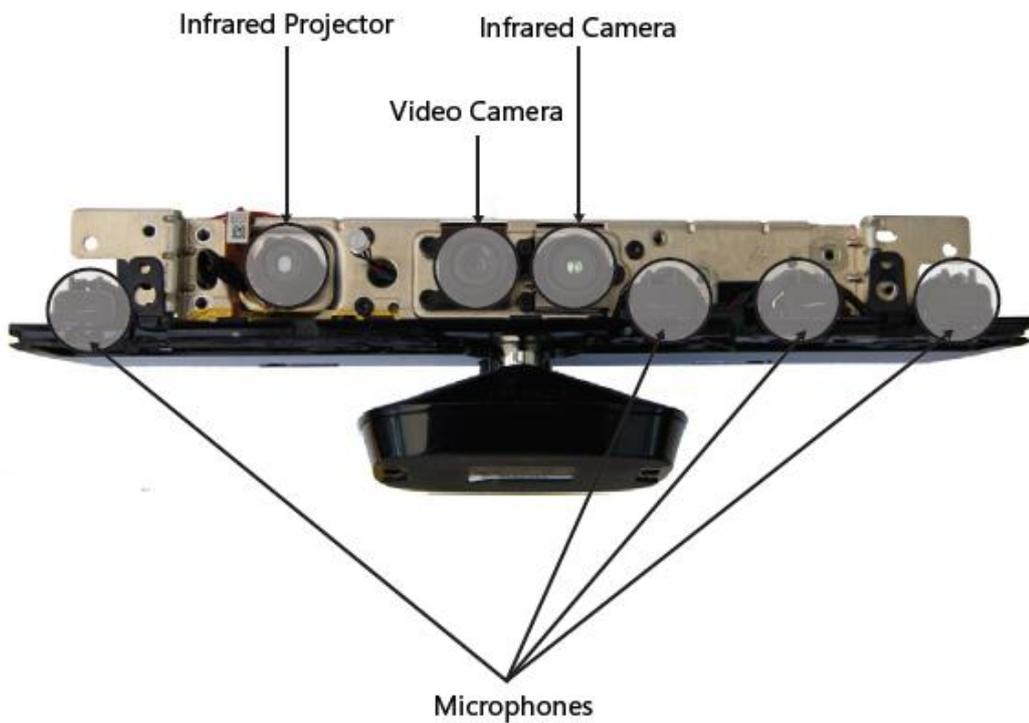
Diferentemente das câmeras de vídeo comuns, o sensor Kinect (Figura 3.3.1) é capaz de produzir um “mapa de profundidades” (*depth image* - Seção 2.2.2) da cena que está em seu campo de visão. O sensor possui um projetor e um sensor de infravermelho, uma câmera RGB, quatro microfones (utilizados para processamento de áudio), além de hardware de processamento de sinal. A Figura 3.3.2 contém a imagem do sensor sem a carcaça de proteção (MILES, 2012).

A tecnologia utilizada para construção da *depth image* consiste na projeção de luz infravermelha através do emissor de infravermelho e um sensor que capta a reflexão deste infravermelho emitido. O cálculo das profundidades e a geração da *depth image* são processados internamente ao sensor e transmitidos por um cabo USB ao computador (MILES, 2012).

Figura 3.3.1 - Sensor *Kinect for Windows*

Fonte: http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/purchase/sensor_setup.aspx.
Acesso em: 12/09/2012.

Figura 3.3.2 - Sensor Kinect sem carcaça



Fonte: Miles (2012).

3.4 INSTRUMENTO QUANTIFICADOR DO RVO

O instrumento quantificador do reflexo vestibulo-ocular utilizado nesta tese foi desenvolvido em teses de mestrado no laboratório de imagem (LABIMA) da faculdade de engenharia da PUCRS, nas teses de: (FIGUEIRA, 2007) e (PRESTES 2013). Este dispositivo utiliza a técnica de processamento de imagens da vídeo-oculografia (Seção 2.1.2) para quantificar os movimentos dos olhos, durante a realização de movimentos seletivos de cabeça, através de câmeras de vídeo adaptadas a um óculos posicionado na cabeça do paciente a ser examinado.

Este dispositivo é conectado ao computador através de uma porta USB por intermédio de uma placa de captura de imagens. O hardware do instrumento quantificador da RVO, juntamente com os óculos, está ilustrado na Figura 3.4.1, e possui os índices de acordo com a legenda (PRESTES, 2013):

Figura 3.4.1 - Hardware do instrumento quantificador do RVO



Fonte: Prestes (2013).

1. Óculos para captura de imagens.
2. Bateria de alimentação 12Vcc.
3. Fonte de alimentação 12Vcc.
4. Cabo de conexão da câmera para a placa de captura.
5. Placa de captura de imagens USB de 30fps com suporte para 4

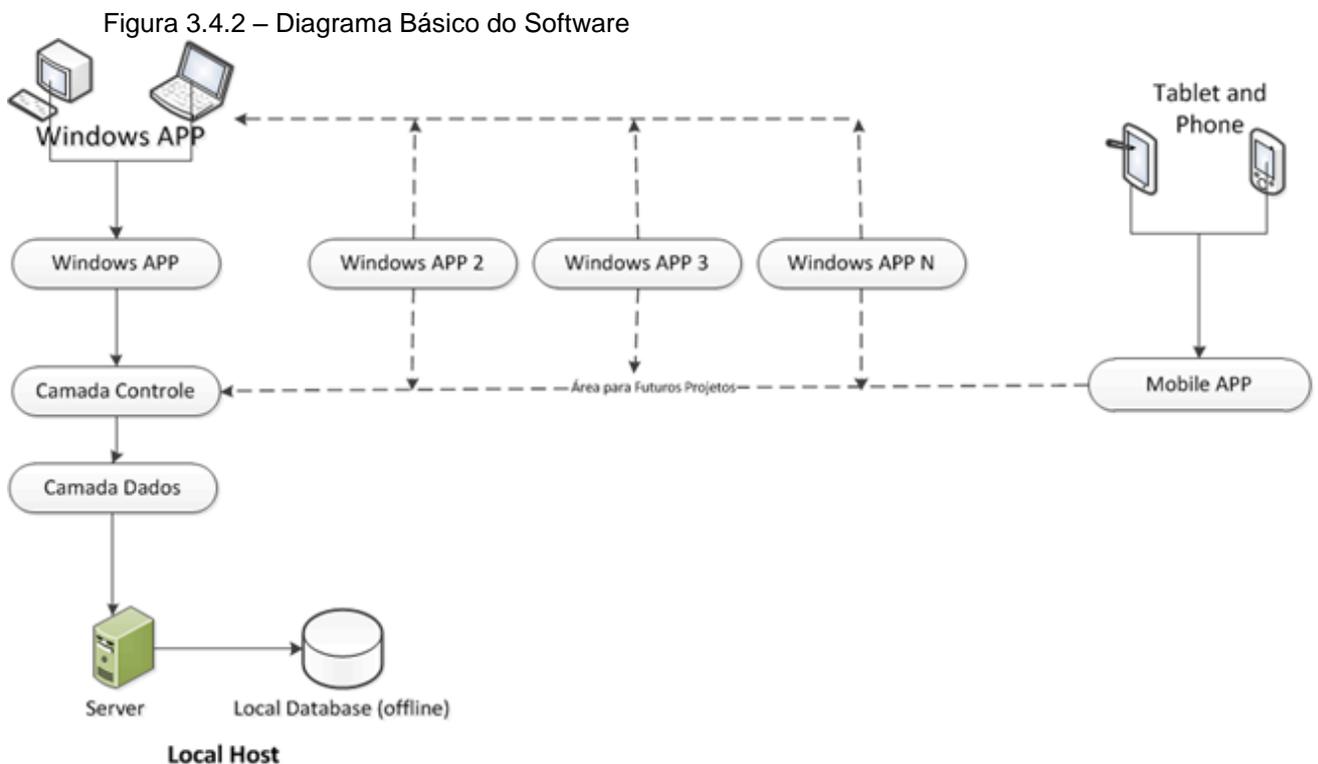
câmeras (sinal padrão de vídeo composto).

6. Placa de captura de imagens USB de 30fps com suporte para 1 câmera (sinal padrão de vídeo composto).

As referências 2 e 3, assim como as referências 5 e 6, são mutuamente excludentes.

3.4.1 Integração com o Instrumento Quantificador do RVO

A arquitetura do software desenvolvida na tese de L. Prestes (PRESTES, 2013), ilustrada na Figura 3.4.2, foi projetada de forma a possibilitar a reutilização de código em futuros projetos. Deste modo, a integração entre o aplicativo de quantificação de movimentos seletivos de cabeça com o aplicativo do instrumento de quantificação do RVO foi realizada com a sua inserção na arquitetura da Figura 3.4.2.



Fonte: Prestes (2013).

Os módulos desenvolvidos com base na Figura 3.4.2 são descritos abaixo (PRESTES, 2013):

- Camada Dados
Responsável pelo acesso ao banco de dados.
- Local Database
Banco de dados.
- Server
Local de instalação do banco de dados.
- Camada Controle

São todas as regras, classes, métodos e filtros de imagem aplicados no sistema desenvolvido. Toda esta camada de acesso estará disponível para qualquer projeto a ser criado com base na arquitetura proposta, indiferente da linguagem utilizada ou aplicação.

- Windows APP

Área visual do sistema que faz uso dos métodos e controles da Camada Controle. Nesta camada estão incluídos os aplicativos de quantificação do RVO e dos movimentos seletivos de cabeça.

A sincronização entre as aplicações foi desenvolvida com a criação de uma classe com funções de cronômetro adicionada à camada de controle desta arquitetura. Esta classe está disponível a todas as aplicações desta arquitetura, e funciona como uma interface para as funções de cronômetro (PRESTES, 2013).

A classe cronômetro possui funções de:

- Start
Inicia a medição do tempo decorrido do cronômetro.
- Stop
Para de medir o tempo decorrido do cronômetro.
- Reset

Interrompe a medição de intervalo de tempo do cronômetro e redefine o tempo decorrido para zero.

- Restart

Para a medição de intervalo de tempo do cronômetro, redefine o tempo decorrido para zero e começa a medir o tempo decorrido.

- Elapsed Time
Obtém o tempo total decorrido do cronômetro.

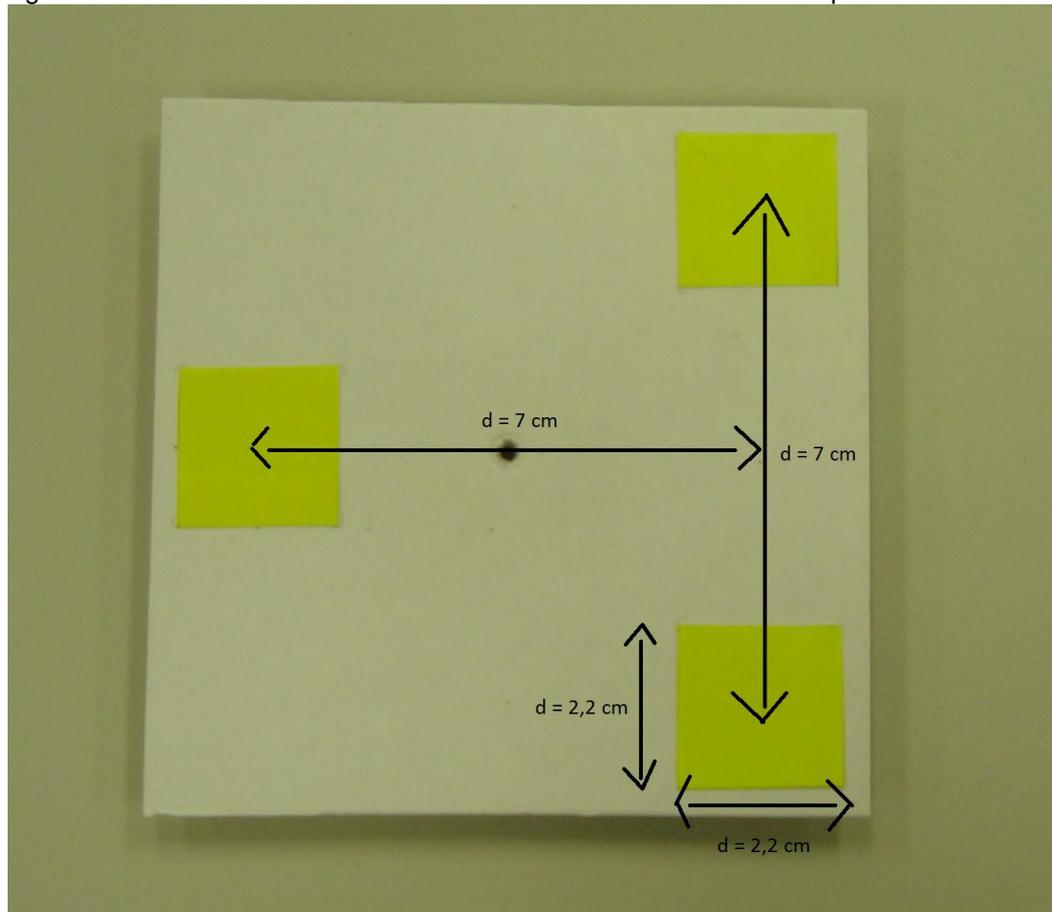
3.5 ALGORITMO PARA QUANTIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CABEÇA

O algoritmo desenvolvido para este projeto utiliza técnicas clássicas de processamento de imagens, como conversão de cores e *thresholding*, combinadas com novas técnicas desenvolvidas para processar os dados tridimensionais gerados pelo Kinect. Este algoritmo mapeia os movimentos de marcas coloridas (três no total) que são afixadas no instrumento quantificador do RVO.

As marcas foram produzidas por tinta de marca-textos por ser mais identificável do que as demais testadas, e o modelo de cores HSV foi o escolhido por ser o mais eficiente na segmentação de cores.

Como as marcas devem estar em um mesmo plano, elas foram afixadas em uma placa não flexível durante o movimento angular (Figura 3.5.1), para após serem usadas no instrumento quantificador do RVO. Como forma de padronização as marcas tem a mesma forma geométrica, tamanho, e cor específica, de forma a serem segmentadas por um processo de *thresholding* único.

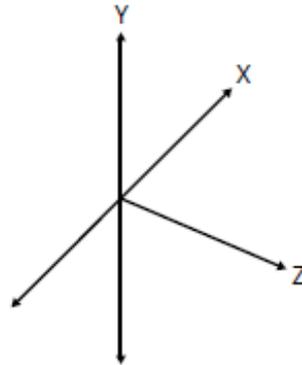
Figura 3.5.1: Placa com as marcas coloridas afixadas em um mesmo plano



Fonte: O autor (2013).

As marcas foram posicionadas em distâncias pré-definidas entre elas. O monitoramento destas distâncias tem fundamental importância - juntamente com a profundidade do ponto central de cada marca - para calcular o ângulo do movimento de cabeça nas coordenadas espaciais (x , y e z) do campo de visão do sensor Kinect, que segue as orientações espaciais conforme a ilustração da Figura 3.5.2.

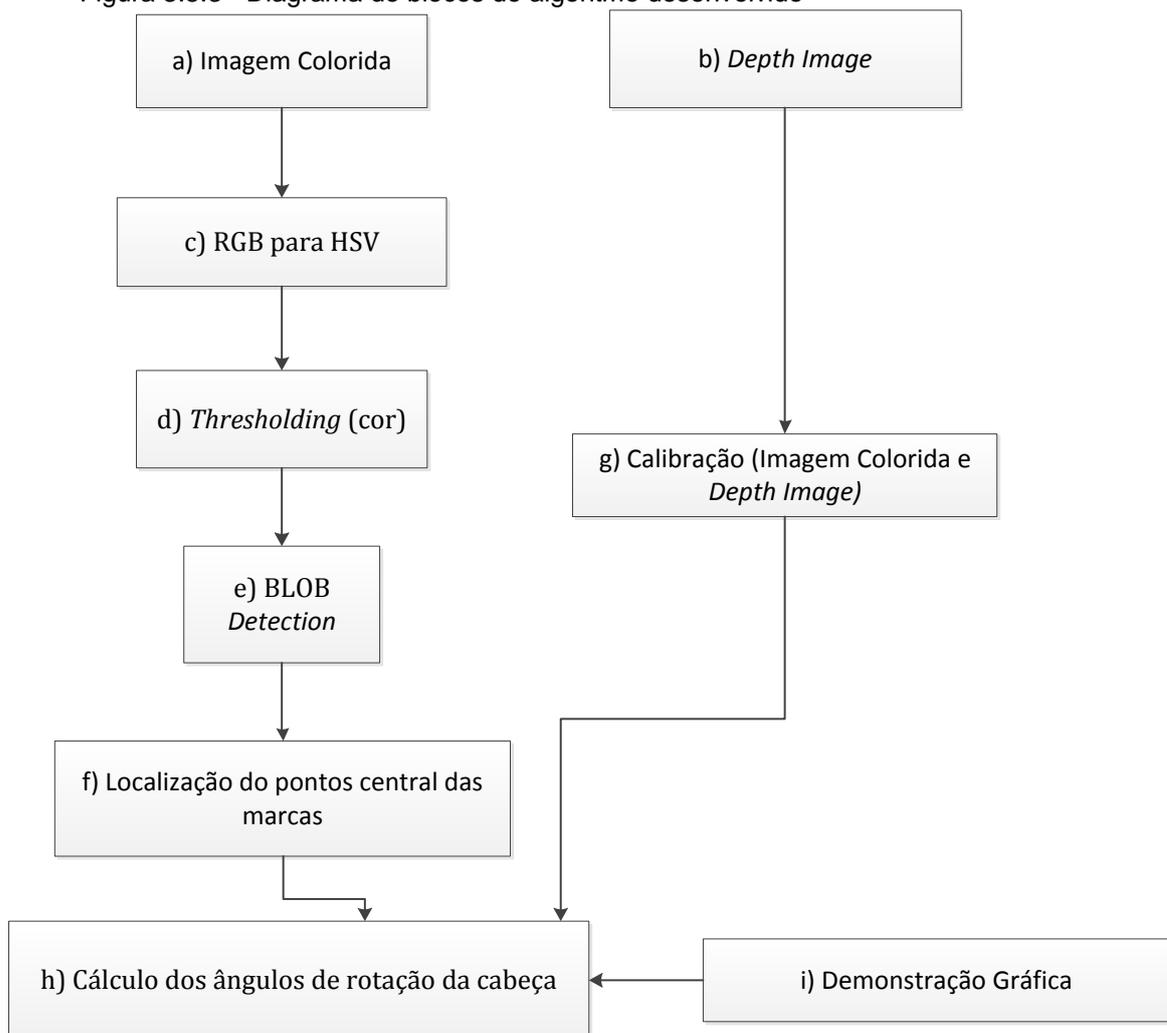
Figura 3.5.2 - Orientação das coordenadas espaciais para o sensor Kinect



Fonte: (MILES, 2012).

O algoritmo desenvolvido (ilustrado no diagrama de blocos da Figura 3.5.3) segue os seguintes passos:

Figura 3.5.3 - Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido



Fonte: O autor (2013).

- a) Imagem Colorida - A imagem colorida é gerada pelo sensor Kinect no modelo de cores RGB.
- b) *Depth Image* - A *Depth Image* ou “mapa de profundidades” da cena é gerada pelo sensor Kinect em paralelo com imagem colorida.
- c) RGB para HSV - A imagem colorida é convertida do modelo RGB para HSV com a finalidade de otimizar a segmentação das marcas referentes às cores desejadas.
- d) *Thresholding* - A imagem colorida HSV é submetida ao processo de *thresholding*, resultando em uma imagem binária que é utilizada na detecção de BLOBs.
- e) *BLOB Detection* - A detecção de BLOBs extrai os *componentes conectados* com a característica de *conectividade-8*. Esta detecção possui um filtro onde os BLOBs detectados serão filtrados para os tamanhos mínimos (e máximos) desejados, a fim de eliminar ruídos que possam ter resultado do processo de *thresholding*.
- f) Localização do ponto central das marcas - O centro de cada marca (x_c, y_c) é calculado através da média de todos os pixels das coordenadas x e y dos BLOBs detectados. O cálculo de cada centro é matematicamente expressado através das seguintes equações:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

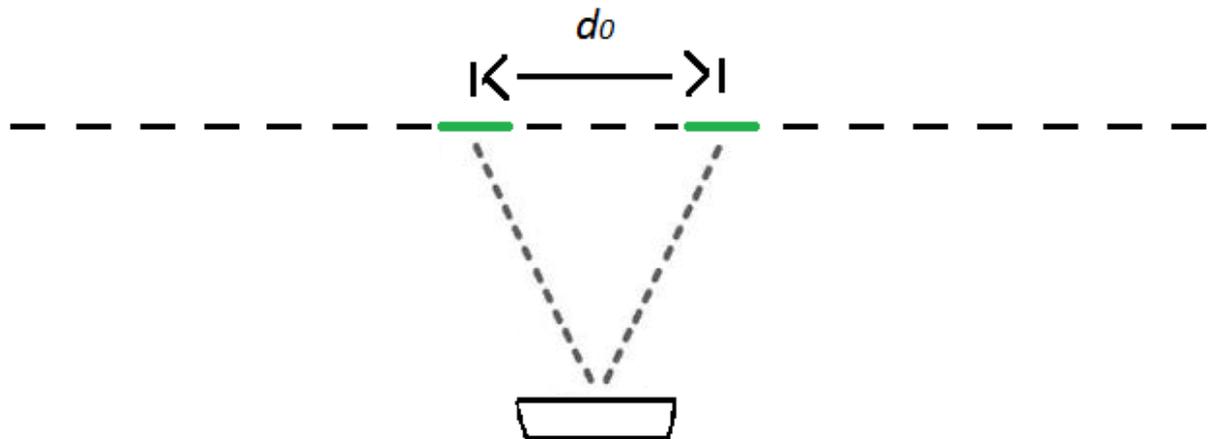
eq. (2)

- g) Calibração (Imagem Colorida e *Depth Image*) - Devido à pequena diferença no posicionamento da câmera colorida e do sensor de infravermelho, ao determinar a profundidade de cada pixel da imagem colorida ocorre um erro

causado pela paraláxia. Este erro é corrigido através da calibração por software utilizando uma função que faz parte do kit de desenvolvimento fornecido pelo fabricante do sensor (*Microsoft*).

- h) Cálculo dos ângulos de rotação de cabeça - O método para calcular os ângulos de rotação de cabeça *yaw* e *pitch* é dividido em dois momentos:
- 1) Quando os pontos centrais das marcas estiverem na mesma profundidade, e considerando que elas estão alinhadas em um mesmo plano, este será o ângulo inicial do movimento (0°) (Figura 3.5.4). Neste momento é feita uma calibração inicial para determinar o número de pixels da imagem colorida correspondente à distância entre as marcas. Este valor será denominado de d_0 .

Figura 3.5.4 - Calibração inicial do algoritmo



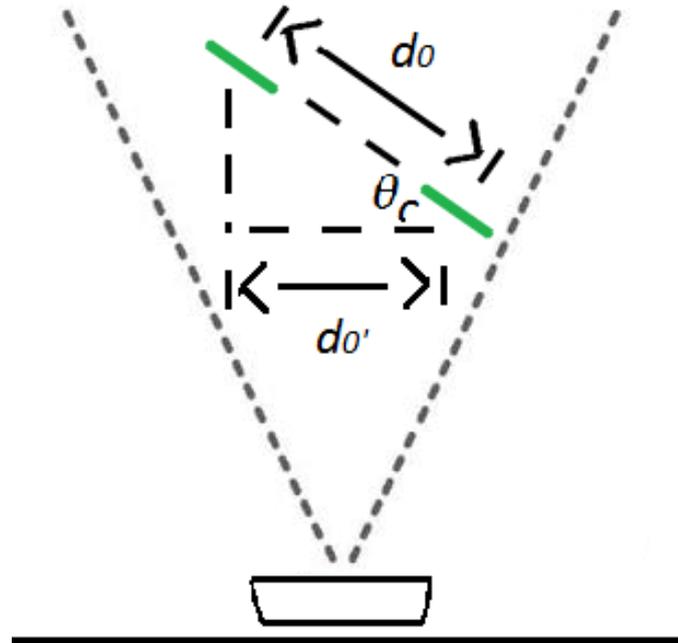
Fonte: O autor (2013).

- 2) Conforme forem desempenhados os movimentos de cabeça, será monitorado o posicionamento das marcas no plano projetado da câmera, de forma a medir a atual distância (em pixels) entre elas. Este valor será denominado de d_0' .

Ao projetar as distâncias d_0 e d_0' em um espaço tridimensional, de forma a gerar um triângulo retângulo onde d_0 é a hipotenusa e d_0' é o cateto adjacente (Figura 3.5.5), o ângulo θ entre as distâncias determinará o ângulo do movimento da cabeça, que pode ser calculado pela equação (3).

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{d_0'}{d_0}\right) \text{ eq. (3)}$$

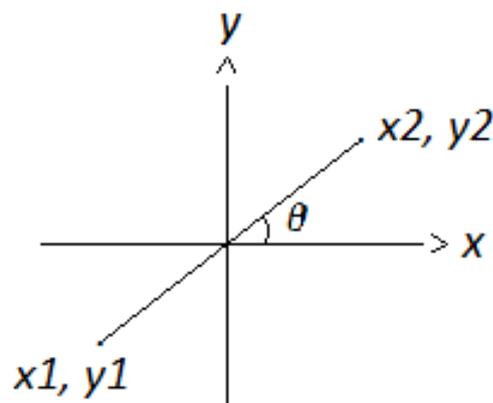
Figura 3.5.5 - Triângulo retângulo projetado no espaço tridimensional



Fonte: O autor (2013).

Para determinar o ângulo de rotação de cabeça *roll*, é calculada a inclinação da reta formada entre o centro das marcas (Figura 3.5.6). Neste cálculo, somente serão utilizadas as coordenadas espaciais x e y do espaço tridimensional. A equação (4) é utilizada para determinar a inclinação da reta.

Figura 3.5.6 - Inclinação da reta entre o centro das marcas

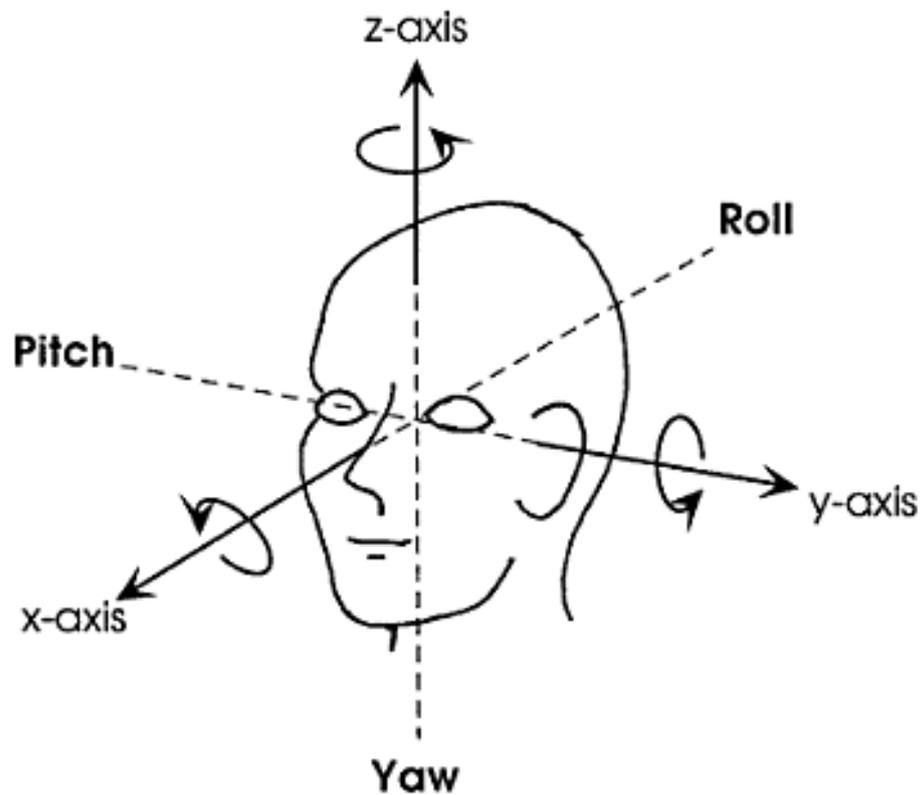


Fonte: O autor (2013).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad \text{eq. (4)}$$

- i) Demonstração gráfica - Os movimentos de cabeça mapeados (*yaw*, *pitch* e *roll* – ilustrados na Figura 3.5.7) são exibidos sincronizadamente, de forma gráfica e isoladamente em três gráficos, com os eixos graus [°] e tempo [milissegundos].

Figura 3.5.7 - Movimentos de cabeça *yaw*, *pitch* e *roll*

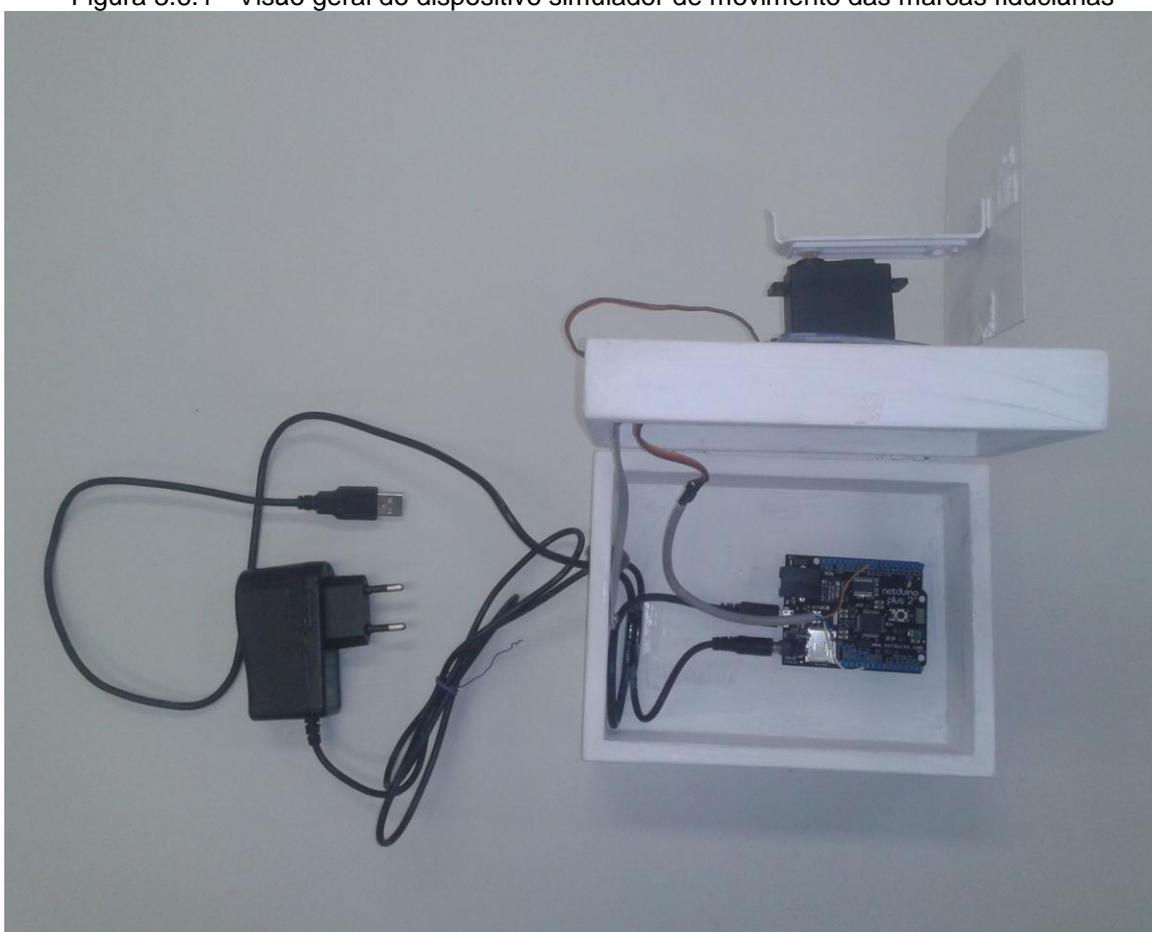


Fonte: Baloh (1990).

3.6 DISPOSITIVO PARA TESTES E VALIDAÇÃO DO INSTRUMENTO

De forma a avaliar o algoritmo e a eficiência do instrumento quanto a sua precisão na quantificação dos estímulos (movimentos seletivos de cabeça), foi desenvolvido um dispositivo que desempenha de forma mecânica os movimentos das marcas fiduciárias, simulando os movimentos de cabeça a serem executados durante o exame de quantificação do RVO. A Figura 3.6.1 ilustra o dispositivo simulador.

Figura 3.6.1 - Visão geral do dispositivo simulador de movimento das marcas fiduciárias



Fonte: O autor (2013).

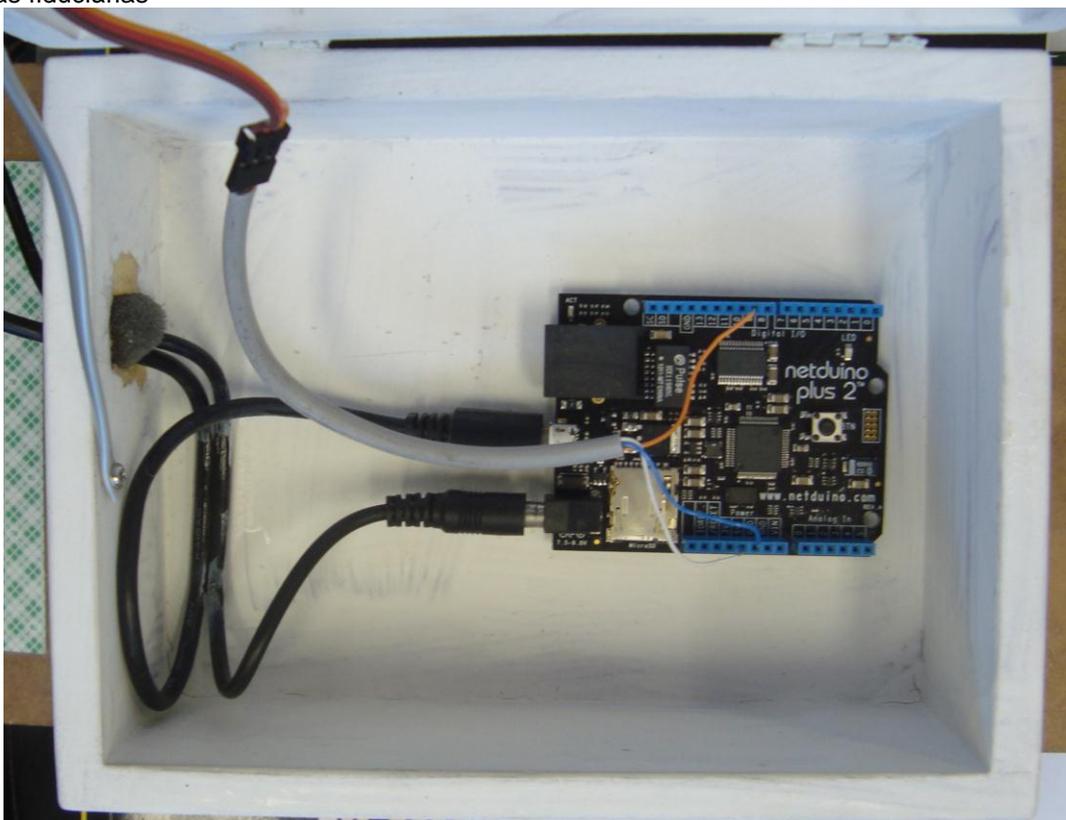
O dispositivo é constituído de uma caixa, onde estão contidos: um servomotor *TowerPro MG995* (que desempenha de forma mecânica os movimentos das marcas fiduciárias) (Figura 3.6.2), e uma placa *Netduino Plus 2* (Figura 3.6.3), contendo um microcontrolador ARM 32-bit Cortex-M4, que controla os movimentos do servomotor.

Figura 3.6.2: Servomotor TowerPro MG995



Fonte: O autor (2013).

Figura 3.6.3: Placa Netduino Plus 2 localizada no dispositivo simulador de movimentos das marcas fiduciárias



Fonte: O autor (2013).

O dispositivo simulador pode ser configurado para realizar os movimentos angulares nos três sentidos de rotação utilizados neste estudo (*yaw*, *pitch* e *roll*) através dos acessórios desenvolvidos para fixação das placas com as marcas fiduciárias no dispositivo, ilustrados na Figura 3.6.4.

Figura 3.6.4: Dispositivo simulador com acessórios para fixação das placas com as marcas fiduciárias



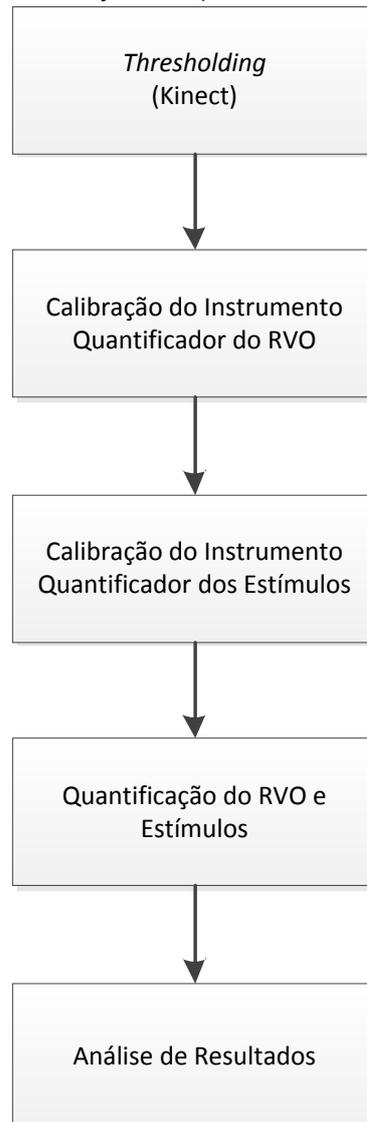
Fonte: O autor (2013).

O dispositivo simulador possui entrada para cabo micro - USB 2.0, utilizada para inserção do código embarcado à placa de controle, e entrada para fonte CC, onde foi utilizada uma fonte chaveada com saída de 12 Vcc e 500 mA para alimentação da placa. A Figura 3.6.1 mostra o cabo USB 2.0 e a fonte de alimentação conectadas na placa.

3.7 APLICATIVO DESENVOLVIDO

O aplicativo desenvolvido para este projeto foi criado com a utilização da linguagem de programação C#. O seu fluxo de utilização, bem como a descrição de suas telas de interface e ferramentas desenvolvidas, segue o fluxo de utilização descrito no fluxograma da Figura 3.7.1.

Figura 3.7.1: Fluxograma de utilização do aplicativo



Fonte: O autor (2013).

3.7.1 Requisitos de Sistema

Para a utilização do aplicativo desenvolvido foi estabelecida a seguinte configuração como requisito mínimo para sua execução:

- **Processador:** Core i5 2.4GHz ou superior (suporte a processadores AMD equivalente).
- **Memória:** 4Gb ddr3 1066 ou superior.
- **Espaço em Disco:** 2Gb.
- **Monitor:** Resolução HD 1600 x 900 pixels.
- **Sistema Operacional:** Windows 7 com SP3, Windows 8 ou superior.

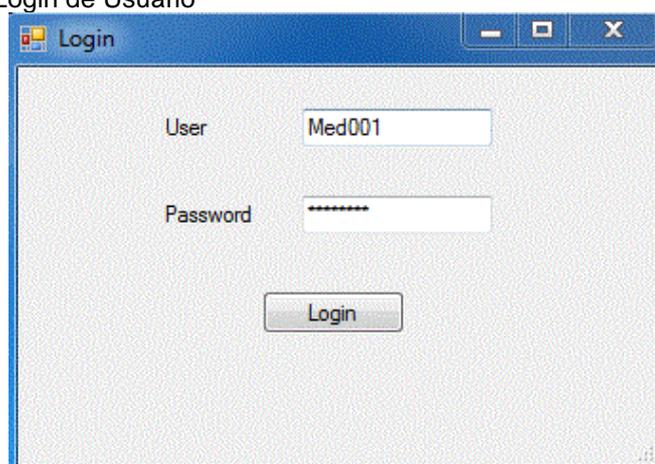
3.7.2 Telas de Interface do Aplicativo

O aplicativo possui as seguintes telas de interface, seguindo o fluxo determinado no diagrama de blocos ilustrado na Figura 3.7.1.

3.7.2.1 Login de Usuário

Para o usuário acessar o sistema onde se encontra a interface de acesso aos aplicativos do quantificador do RVO e o quantificador de estímulos, este deverá logar-se no sistema em sua abertura. Este sistema está ligado a um banco de dados e estrutura de programação desenvolvidos na tese de L. Prestes (PRESTES, 2013) (Seção 3.4.1). A imagem da interface de login de usuário está ilustrada na Figura 3.7.2.

Figura 3.7.2 - Login de Usuário



Fonte: O autor (2013).

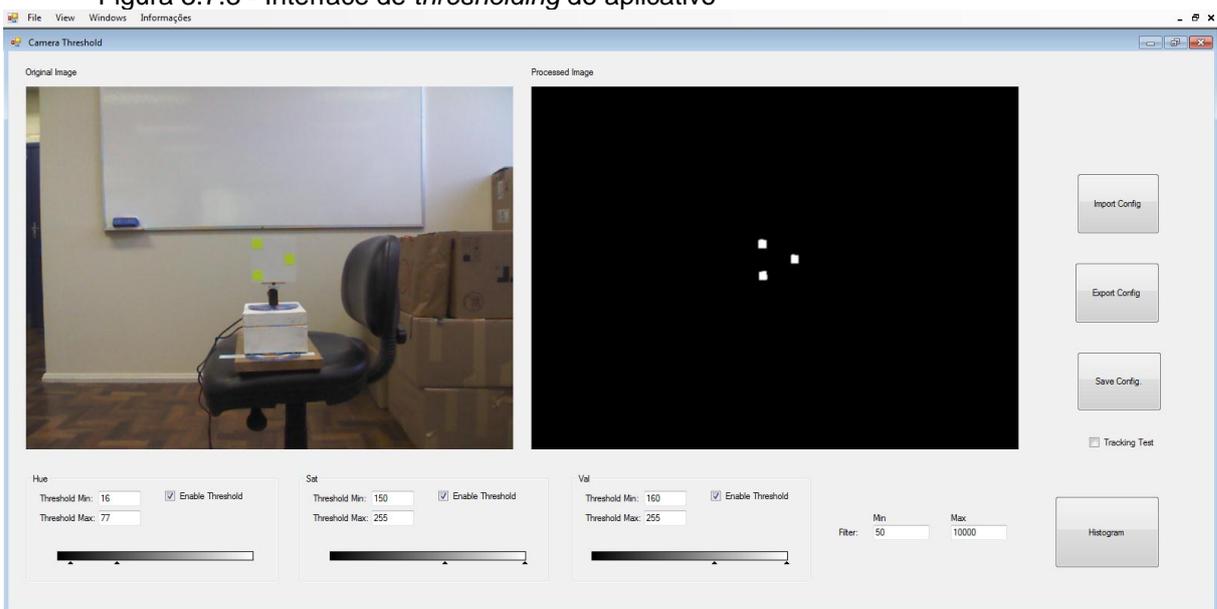
3.7.2.2 Thresholding

Na interface *thresholding*, ilustrada na Figura 3.7.3, é feita a segmentação das marcas fiduciárias na imagem colorida do instrumento de quantificação de estímulos. As ferramentas desenvolvidas para esta interface são:

- **Original Image:** Mostra a imagem colorida (modelo de cores HSV – Seção 2.3.1.2) obtida através do sensor Kinect.
- **Processed Image:** Mostra a imagem segmentada pelo processo de *thresholding*.

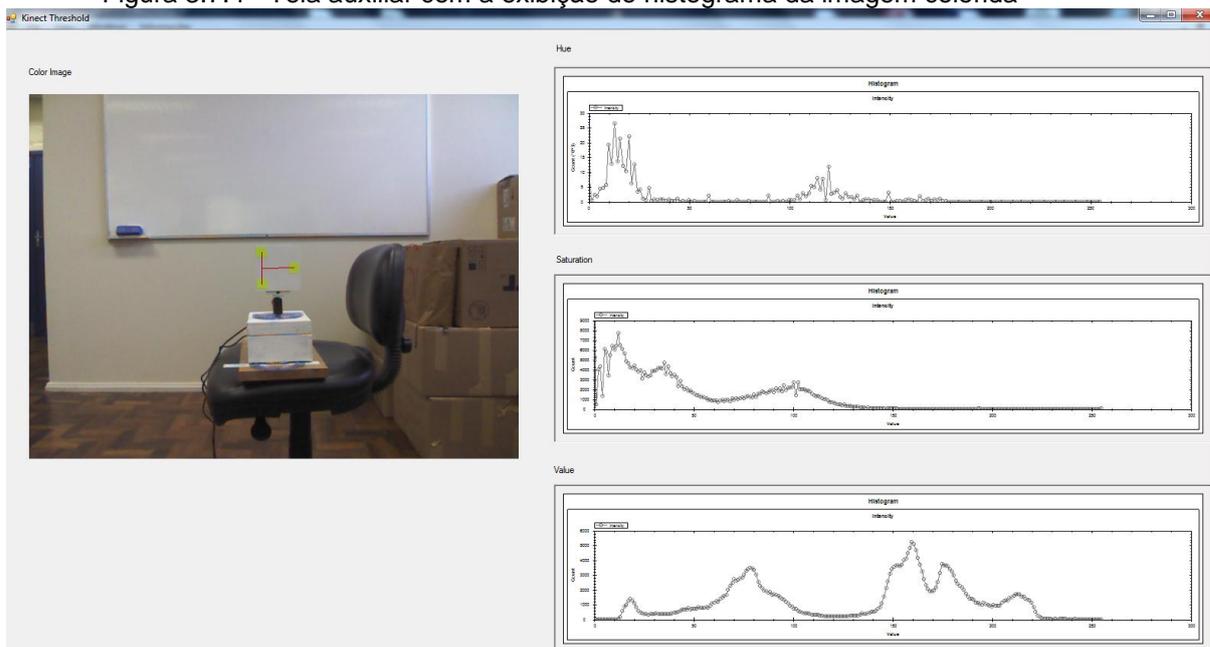
- **Histogram:** Através desta ferramenta pode ser acessada a visualização do histograma (Seção 2.2.3) da imagem colorida. O histograma é mostrado em uma tela auxiliar ilustrada na Figura 3.7.4.
- **Seleção de valores de *thresholding*:** Os valores mínimos e máximos utilizados no processo de *thresholding* na imagem colorida podem ser selecionados nas barras de seleção desta ferramenta. Os valores máximos e mínimos podem também ser digitados nas caixas de texto onde são exibidos os valores selecionados.
- **Filter (filtro de BLOBs):** A configuração do filtro de BLOBs (Seção 2.2.6) permite a exclusão de BLOBs que não estiverem contidos na faixa de aceitação do filtro.
- **Importação/Exportação dos valores de configuração:** Esta função permite importar e exportar os valores de configurações de *thresholding* e filtros definidos nesta interface.
- **Tracking Test (teste de detecção):** O teste de detecção das marcas fiduciárias pode ser ativado nesta interface. Este teste permite verificar a eficiência na detecção das marcas com as configurações definidas nesta interface, com todos os movimentos possíveis a serem detectados.

Figura 3.7.3 - Interface de *thresholding* do aplicativo



Fonte: O autor (2013).

Figura 3.7.4 - Tela auxiliar com a exibição do histograma da imagem colorida



Fonte: O autor (2013).

3.7.2.3 Calibração do Instrumento Quantificador do RVO

Nesta etapa ocorre a calibração do instrumento quantificador do RVO. Nesta interface, ilustrada na Figura 3.7.5, o usuário pode utilizar as seguintes ferramentas (PRESTES, 2013):

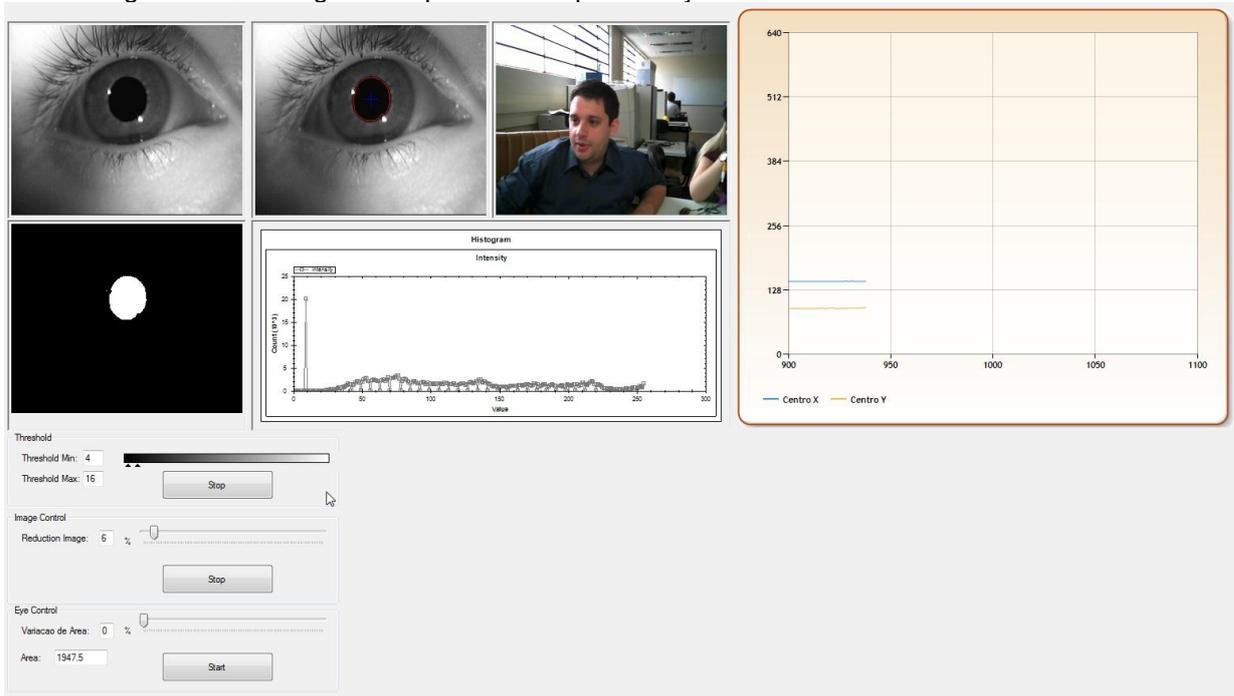
- **Imagem do olho:** Devido ao dispositivo possuir atual configuração com captura de apenas um olho (esquerdo ou direito), somente a imagem de um dos olhos do paciente é mostrada e analisada por esta interface. Esta imagem é adquirida em tons de cinza e mostrada por esta interface.
- **Imagem da Sala:** A imagem da sala onde é feito o exame também é mostrada nesta interface.
- **Histograma:** O histograma em tons de cinza da imagem do olho do paciente é mostrado nesta interface.
- **Thresholding (imagem do olho):** O *thresholding* da imagem do olho é feita com base no histograma da imagem em tons de cinza. Esta calibração tem como objetivo isolar a pupila da imagem ocular com o menor número possível de artefatos. A imagem do olho com a pupila isolada e detectada também é mostrada nesta interface.

- **Controle de redução de imagem:** Através desta ferramenta o usuário pode reduzir a área de processamento da imagem do olho do paciente. A redução é definida pelo usuário através de um valor de porcentagem de redução da área analisada da imagem do olho, com início nos quatro vértices em direção ao centro. Com esta redução o processamento torna-se mais rápido, e reduz o número de artefatos que podem ocorrer nas extremidades da imagem, excluindo eventuais falhas nas bordas da imagem por utilização de câmeras de baixa qualidade.
- **Controle de Área:** Nesta ferramenta pode-se limitar a variação máxima de área permitida para a pupila. Em tempo real, o usuário solicita ao paciente que realize movimentos oculares com o objetivo de calibrar a variação máxima permitida da elipse da pupila. Com esta calibragem é possível aferir o máximo nível de ruído aceito durante os testes, detectar piscadas e movimentos em que ocorra interferência dos cílios entre a pupila e a câmera.
- **Visualização do Gráfico de Centro da Pupila:** A visualização do gráfico referente à variação da posição do centro da pupila pode ser visto, em tempo real, pelo usuário nesta interface. O centro da pupila é mostrado em dois gráficos, correspondentes à posição das coordenadas do eixo X do centro da pupila e à posição das coordenadas do eixo Y do centro da pupila. Os eixos correspondentes aos gráficos são: Eixo X (posição – em pixels) e eixo Y (número do frame atual).
- **Suporte à Análise de Variação do Movimento do Olho:** Neste campo, ilustrado na Figura 3.7.6, o usuário possui controles que permitem personalizar e exportar a captura dos dados do movimento ocular. Os controles disponíveis possuem as seguintes ações:
 1. **Start** – Determina o período em que o algoritmo salva os pontos centrais da pupila em memória.
 2. **Clear Data** – Limpa a lista de pontos salvos em memória que foram armazenados.
 3. **Export CSV** – Exporta os dados adquiridos para um arquivo com extensão “.CSV”. Esta extensão de arquivo é utilizada para exportação de dados gráficos, compatível com o programa *Microsoft Excel*.
 4. **Plot** – Mostra o gráfico com as informações armazenadas em memória.

5. **Clear** – Apaga a visualização do gráfico atual, mantendo as informações armazenadas em memória.

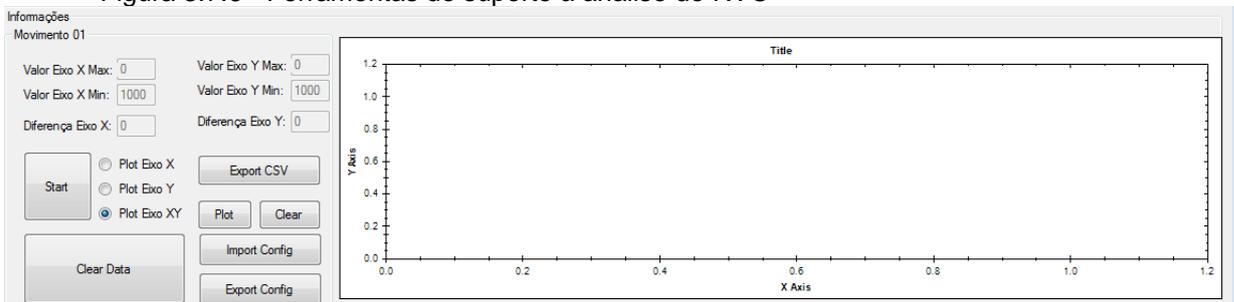
O algoritmo que salva a lista dos pontos centrais da pupila, e o gráfico mostrado nesta ferramenta, foram modificados de forma a armazenar, juntamente com o ponto central da pupila e número do frame, o tempo decorrido da variável de sincronismo desenvolvida nesta tese (Seção 3.4.1).

Figura 3.7.5 - Imagem do aplicativo de quantificação do RVO utilizado nesta tese



Fonte: Prestes (2013).

Figura 3.7.6 - Ferramentas de suporte à análise do RVO



Fonte: Prestes (2013).

3.7.2.4 Calibração do Instrumento de Quantificação de Estímulos

Nesta interface, ilustrada na Figura 3.7.7, o usuário tem acesso à calibração inicial das distâncias entre as das marcas fiduciárias. Este processo é referente à calibração inicial do algoritmo (Seção 3.5). Como definido anteriormente na Seção 3.5, esta calibração deve ser feita quando as três marcas fiduciárias utilizadas no algoritmo têm a mesma distância referente ao sensor.

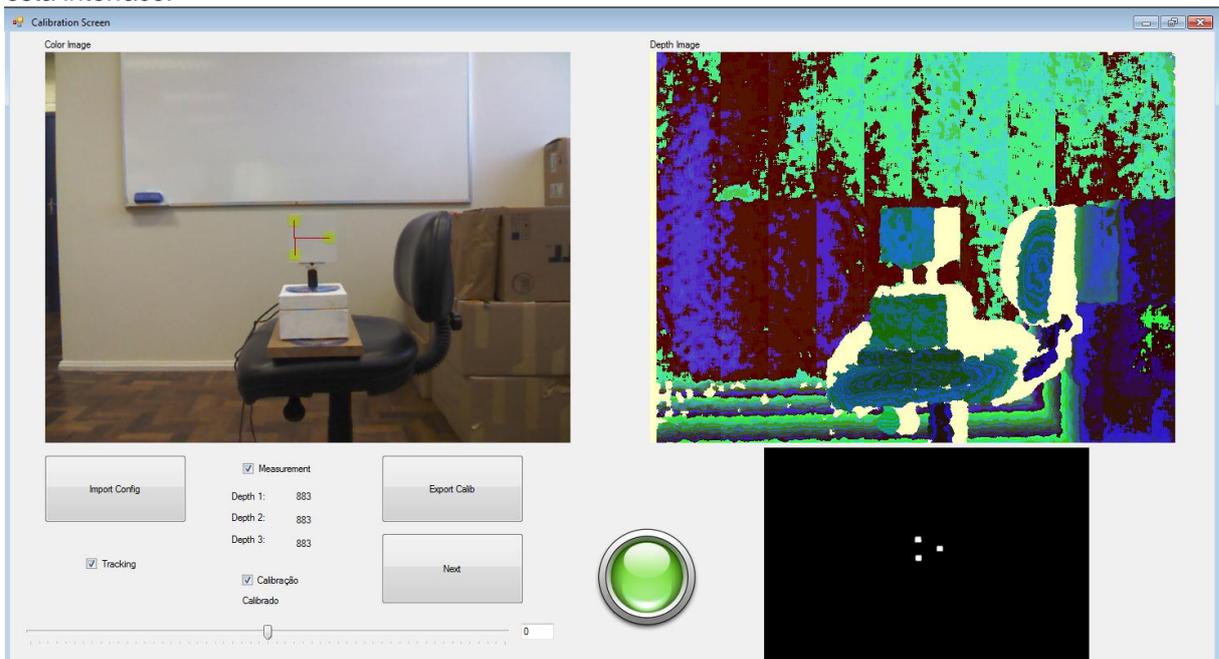
As ferramentas disponíveis nesta interface são:

- **Color Image:** Mostra a imagem colorida adquirida através do sensor Kinect.
- **Depth Image:** Mostra a imagem renderizada com as diferentes profundidades da cena imageada (Seção 2.2.3).
- **Import Config.:** Importa os valores de configuração de *thresholding* e filtros para a detecção das marcas fiduciárias.
- **Processed Image:** Mostra a imagem segmentada pelo processo de *thresholding*.
- **Tracking:** A ativação da ferramenta *tracking* inicia o processo de detecção das marcas fiduciárias.
- **Measurement:** A ativação da ferramenta *measurement* inicia a medição da distância entre o ponto central de cada marca em relação ao sensor. Quando as três marcas estiverem com mesma distância em relação ao sensor, a luz indicativa desta interface passará da cor vermelha para a cor verde (ilustrada na Figura 3.7.7).
- **Calibração:** Com a ativação da ferramenta de calibração o usuário define que a partir deste momento, com as marcas fiduciárias estando com a mesma profundidade em relação ao sensor, as distâncias entre as marcas fiduciárias referentes à calibração inicial do algoritmo serão armazenadas em memória. Esta ferramenta permite um maior controle para a calibração, e a confirmação de que as distâncias foram armazenadas aparece com a visualização do texto “Calibrado” abaixo do local de ativação desta ferramenta.
- **Controle do Ângulo de Imageamento do Sensor:** Esta interface possui um controle do ângulo do sensor em relação a sua base, de forma a auxiliar a calibração inicial do algoritmo desenvolvido. Este valor pode ser definido por uma barra de seleção localizada nesta interface (ilustrada na Figura 3.7.7), ou

por uma caixa de texto ao lado desta barra de seleção. O valor do ângulo de imageamento do sensor é exportado automaticamente (juntamente com os valores das calibrações das distâncias entre as marcas) em um arquivo de configuração.

- **Next:** O botão *next* desta interface possui as seguintes ações: salva o arquivo de configuração contendo a calibração inicial do algoritmo - juntamente com o ângulo de imageamento do sensor Kinect -, fecha a interface de calibração e abre a interface de medição dos estímulos.
- **Export Calib.:** Esta ferramenta exporta o mesmo arquivo de configuração criado através do botão *next*, mas não finaliza a interface de calibração, e permite salvar o arquivo de configuração no local desejado pelo usuário.

Figura 3.7.7: Interface de calibração inicial das distâncias entre as marcas fiduciárias. Esta Figura mostra o dispositivo simulador de movimentos angulares desenvolvido nesta tese calibrado por esta interface.



Fonte: O autor (2013).

3.7.2.5 Medição dos Estímulos

Na interface de medição dos estímulos, ilustrada na Figura 3.7.8, é possível medir os estímulos desempenhados durante a quantificação do RVO, determinando o sentido do movimento seletivo de cabeça executado pelo paciente (*yaw*, *pitch*, *roll*). Esta interface importa os dados dos arquivos de configuração criados pelas interfaces anteriores (*thresholding* e calibração de distâncias iniciais) para a realização dos cálculos de medição dos estímulos.

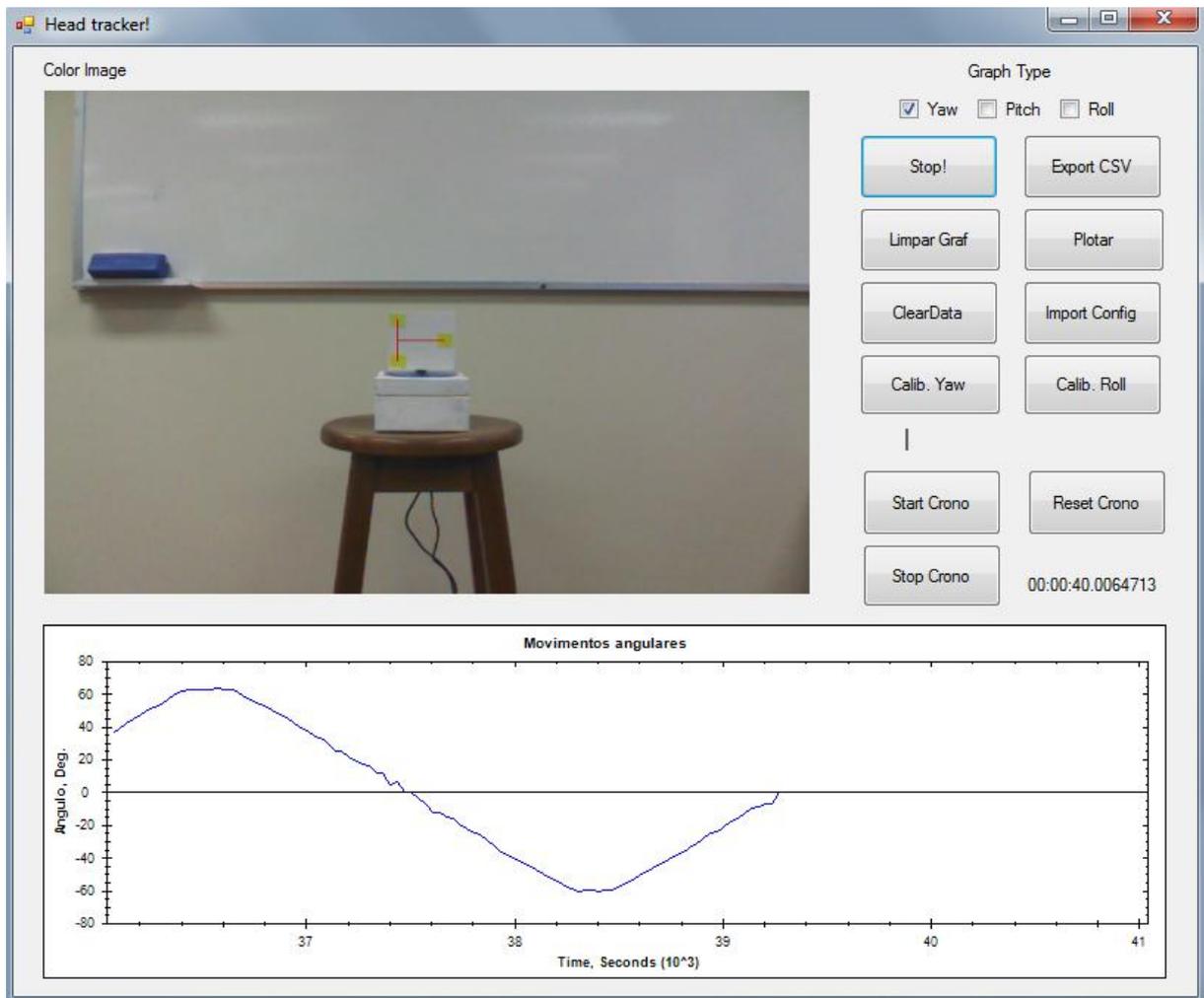
Esta interface possui as seguintes ferramentas:

- **Color Image:** Mostra a imagem adquirida através do sensor Kinect.
- **Graph Type:** Caixa de seleção para o tipo de movimento seletivo de cabeça a ser quantificado (*yaw*, *pitch*, *roll*).
- **Movement Start:** Inicia o cálculo do ângulo do plano selecionado. Este ângulo é plotado no gráfico desta interface.
- **Visualizador de Gráficos:** O visualizador de gráficos desta interface mostra em tempo real o gráfico do estímulo que está sendo quantificado, conforme a seleção do tipo de movimento desempenhado (*yaw*, *pitch*, *roll*). Os eixos deste gráfico são: eixo X (segundos [s]) e eixo Y (graus [°]).
- **Clear Data:** Limpa os pontos da lista com a quantificação dos estímulos guardados em memória.
- **Limpar Graf.:** Limpa o gráfico mostrado no seu local de visualização.
- **Calib. Yaw:** O botão *Calib. Yaw* é utilizado para recalibrar a quantificação do movimento de cabeça *yaw* em qualquer ângulo desejado de inclinação (*pitch*) da cabeça. Esta função permite ao examinador flexionar a cabeça do paciente 30° para baixo, para que o canal semicircular lateral (referente ao plano horizontal) do paciente pode ser estimulado de maneira independente (Seção 2.1.1). Ao clicar neste botão, o ângulo de inclinação da cabeça é mostrado em uma caixa de texto localizada abaixo do botão de recalibração *Calib. Yaw* (Figura 3.7.9). Quando o ângulo de inclinação *pitch* estiver no valor desejado pelo examinador, a recalibração é concluída ao clicar-se novamente no botão *Calib. Yaw*, e a quantificação, então, pode ser iniciada.

- **Calib. Roll.:** O botão *Calib. Roll* poderá ser utilizado pelo examinador para que o posicionamento da cabeça do paciente, definida pelo processo de calibração inicial (definida na interface anterior – Seção 3.7.2.4), seja definido como o ângulo referencial (0°) para a quantificação do movimento de rotação da cabeça (*roll*).
- **Import Config.:** Com o botão *Import Config.* o examinador pode importar para o processo de medição dos estímulos novas configurações de calibração do *thresholding*.
- **Export CSV:** Ferramenta de exportação dos dados de quantificação dos estímulos em formato “.csv”, mesmo formato utilizado para a exportação dos dados de quantificação do RVO. O gráfico exportado utiliza a variável de sincronização, desenvolvida nesta tese (seção 3.4.1), para análise dos dados em sincronismo com os dados de quantificação do RVO posteriormente.
- **Controles do Cronômetro:** Nesta interface foram criados os seguintes botões para o controle do cronômetro de sincronização desenvolvido nesta tese (seção 3.4.1):
 1. **Start Chrono.:** Inicia a medição do tempo decorrido do cronômetro.
 2. **Stop Chrono.:** Para de medir o tempo decorrido do cronômetro.
 3. **Reset Chrono.:** Interrompe a medição de intervalo de tempo do cronômetro e redefine o tempo decorrido para zero.

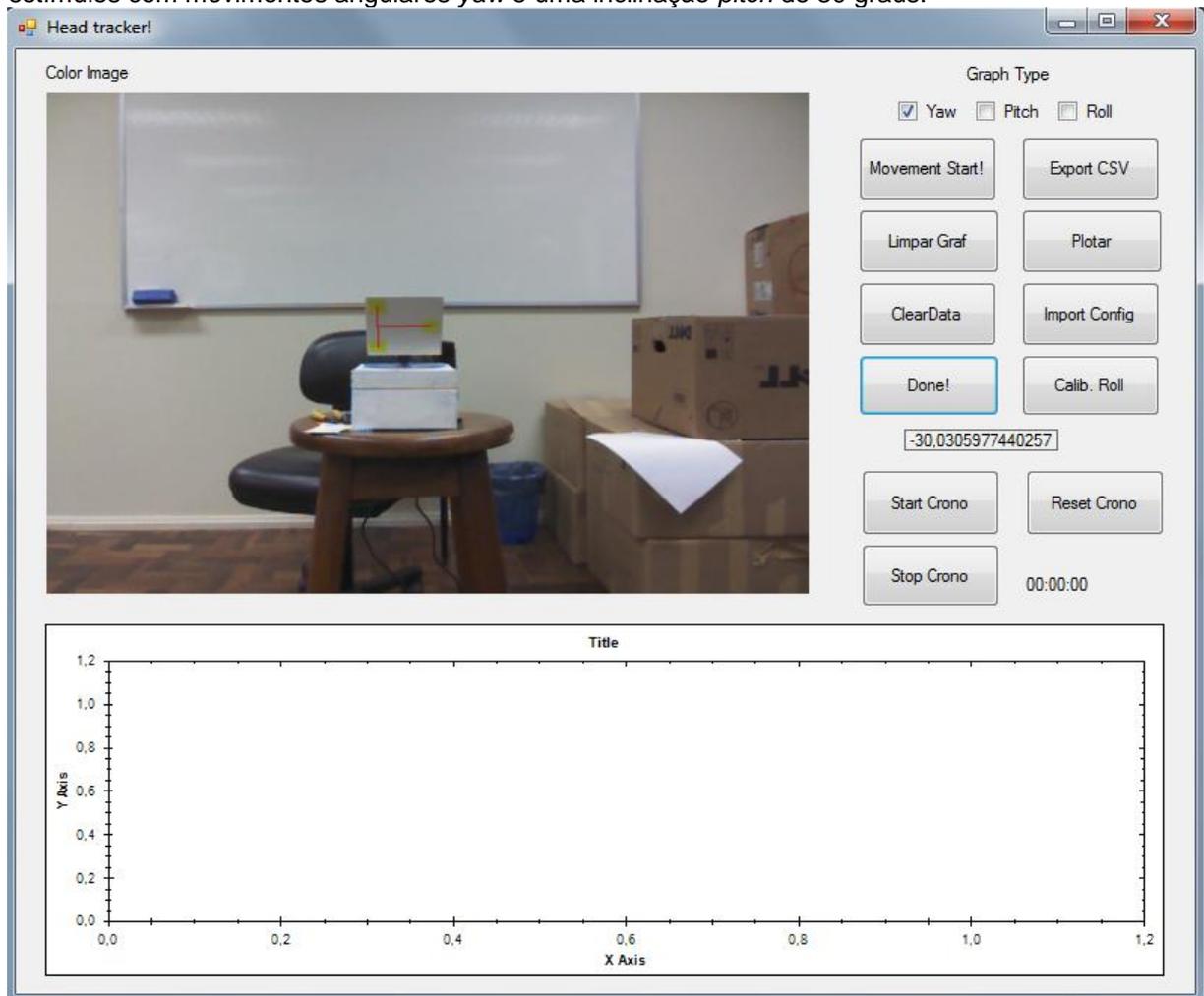
O tempo atual decorrido do cronômetro é mostrado em uma caixa de texto abaixo do botão *Reset Chrono*, nesta mesma interface. O tempo é fornecido pelo cronômetro em milissegundos, mas o gráfico mostrado é reescalado em segundos.

Figura 3.7.8 - Interface de medição dos estímulos



Fonte: O autor (2013).

Figura 3.7.9 - Interface de medição dos estímulos sendo recalibrada para quantificação dos estímulos com movimentos angulares *yaw* e uma inclinação *pitch* de 30 graus.



Fonte: O autor (2013).

3.7.2.6 Ferramenta para Análise de Resultados

A ferramenta para análise de resultados desenvolvida nesta tese permite a importação dos gráficos adquiridos nos instrumentos de quantificação do RVO e de quantificação de estímulos para uma análise detalhada dos resultados. Esta ferramenta está ilustrada na Figura 3.7.10.

Esta ferramenta possibilita ao examinador visualizar os gráficos com uma série de funções como: *Zoom (in e out)*, seleção de área de zoom, *autoscale*, *show point values* – que permite visualizar os valores específicos de um ponto do gráfico onde o cursor está sobreposto-, e permite exportar o gráfico da visualização atual como imagem. É possível também sobrepor o gráfico do movimento dos olhos ao gráfico do estímulo de modo a gerar uma melhor comparação na análise dos

resultados.

Além de funções para visualização de gráficos, esta ferramenta permite a extração de parâmetros de velocidade angular do gráfico do estímulo quantificado. Como os movimentos seletivos de cabeça acontecem de forma senoidal, a extração da velocidade angular é feita a partir de análise dos picos da senoide.

Na Figura 3.7.11, estão destacados os campos que podem ser utilizados para a extração dos parâmetros de velocidade angular dos estímulos. Estes campos permitem uma personalização na detecção de picos, disponibilizando ao examinador flexibilidade através da escolha da região de interesse na análise do gráfico, através da definição dos seguintes parâmetros:

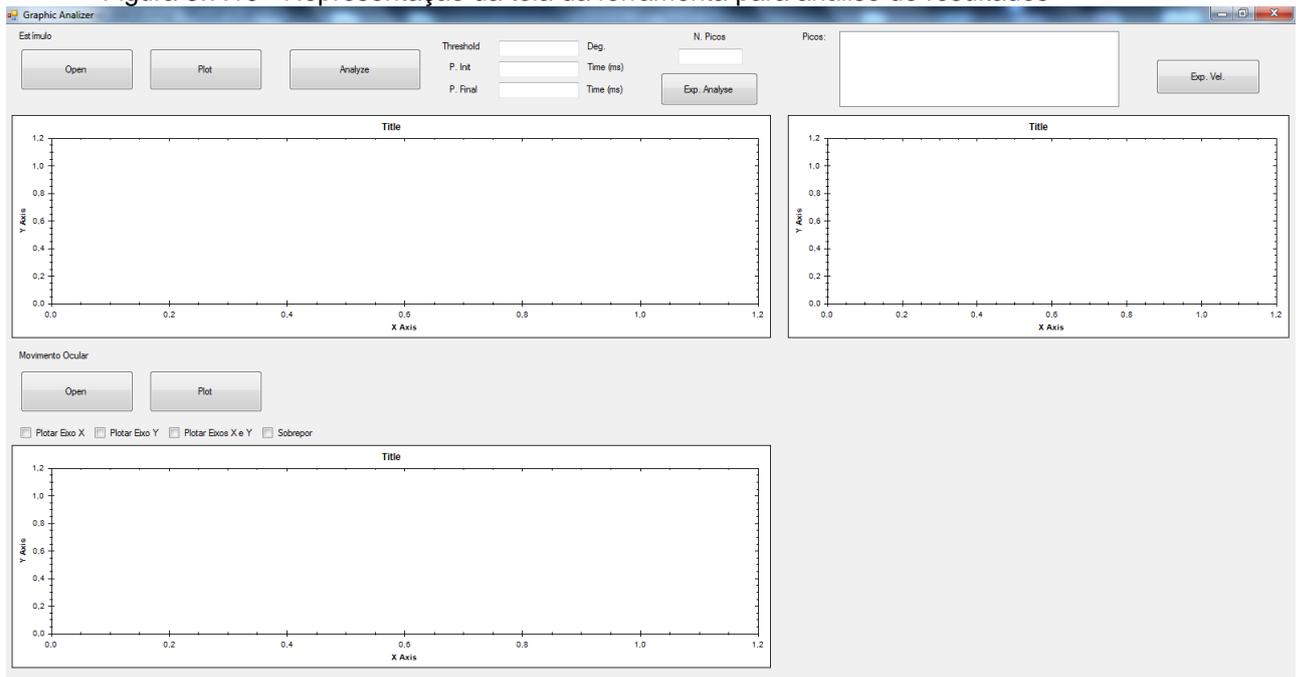
- **Threshold:** Neste campo o examinador define o limiar (em módulo) de detecção de picos no gráfico (em graus). Desta forma, somente picos acima deste limiar serão detectados.
- **P. Init.:** Tempo inicial da análise do gráfico (em milissegundos).
- **P. Final:** Tempo final da análise do gráfico (em milissegundos).

O botão *analyse* desta interface inicia a detecção dos picos, personalizada através dos campos da Figura 3.7.11, e calcula a velocidade média angular a cada dois dos picos detectados, adicionando-as em uma lista armazenada em memória. A lista com as velocidades angulares extraídas é exibida através um gráfico nesta interface, e pode ser exportada através do botão *Exp. Vel.* para um arquivo no formato “.CSV”.

Os picos detectados também são exibidos em uma lista acima do gráfico com as velocidades angulares. Estes valores podem ser exportados para um arquivo de texto, juntamente com os valores utilizados na personalização da detecção de picos, através do botão *Exp. Analyse*.

A personalização na detecção de picos desta interface pode ser considerada também como sendo uma função de filtro, por permitir analisar somente valores dentro da região de interesse de tempo e rejeitar picos fora do limiar de aceitação.

Figura 3.7.10 - Representação da tela da ferramenta para análise de resultados



Fonte: O autor (2013).

Figura 3.7.11 - Campos de personalização na detecção de picos no gráfico dos estímulos



Fonte: O autor (2013).

4 RESULTADOS: TESTES E VALIDAÇÕES

Os testes realizados nesta tese foram desenvolvidos de forma a avaliar a precisão e robustez do instrumento na quantificação dos movimentos seletivos de cabeça. Para realização dos testes foram utilizados: o dispositivo simulador de movimento de cabeça, mostrado na Seção 3.6, e o instrumento de quantificação do RVO, mostrado na Seção 3.4.

O dispositivo para simulação dos movimentos de cabeça foi configurado de forma a gerar os movimentos angulares - *yaw*, *pitch* e *roll* - para gerar estímulos com amplitude e velocidade controlados. Também foi realizada a simulação referente ao movimento angular *yaw* com inclinação *pitch* de 30 graus com o objetivo de realizar testes simulando a obtenção da resposta do canal semicircular lateral de forma isolada (Seção 2.1.1). Este teste foi desenvolvido com 20 repetições para cada amplitude testada, nos três movimentos desejados, e os resultados destes testes foram analisados para definir a precisão do instrumento desenvolvido.

O teste de captura em medição de velocidade angular buscou definir a precisão relativa à medição da velocidade angular dos estímulos. Este teste também foi realizado com a utilização do simulador de movimentos de cabeça, com 20 repetições.

Para testar a robustez do instrumento quanto ao tipo iluminação utilizada, foram realizados testes com o simulador de movimentos de cabeça em diferentes situações de iluminação. Foram testadas as iluminações com luz natural, luz fluorescente e luz incandescente, em 20 repetições.

O teste integrado entre o instrumento quantificador do RVO e instrumento quantificador de movimentos de cabeça foi realizado de forma a demonstrar a sua utilização conjunta.

4.1 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO YAW)

Nesta etapa dos testes foi medida a precisão do instrumento na quantificação dos estímulos, utilizando o dispositivo simulador configurado para o movimento angular yaw. A Figura 4.1.1 ilustra o dispositivo configurado para realização deste movimento.

Figura 4.1.1 - Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos yaw



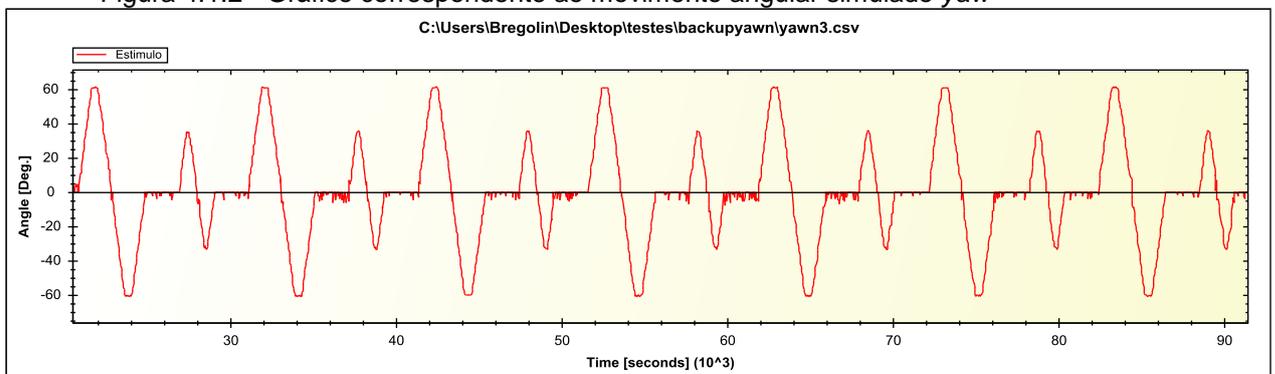
Fonte: O autor (2013).

O teste foi realizado com movimentos senoidais com origem no ângulo de referencia (0°), em diferentes valores de amplitude, com 20 repetições para cada amplitude testada. Os valores das amplitudes testadas foram medidas manualmente, através de um transferidor com precisão de um ângulo, resultando nos seguintes valores:

- Amplitude 1: 61°;
- Amplitude 2: -60°;
- Amplitude 3: 35°;
- Amplitude 4: -34°.

No gráfico do movimento angular *yaw* o semiciclo positivo representa o movimento para esquerda, e o semiciclo negativo, para a direita. O gráfico correspondente aos valores quantificados durante o movimento pode ser visualizado na Figura 4.1.2.

Figura 4.1.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *yaw*



Fonte: O autor (2013).

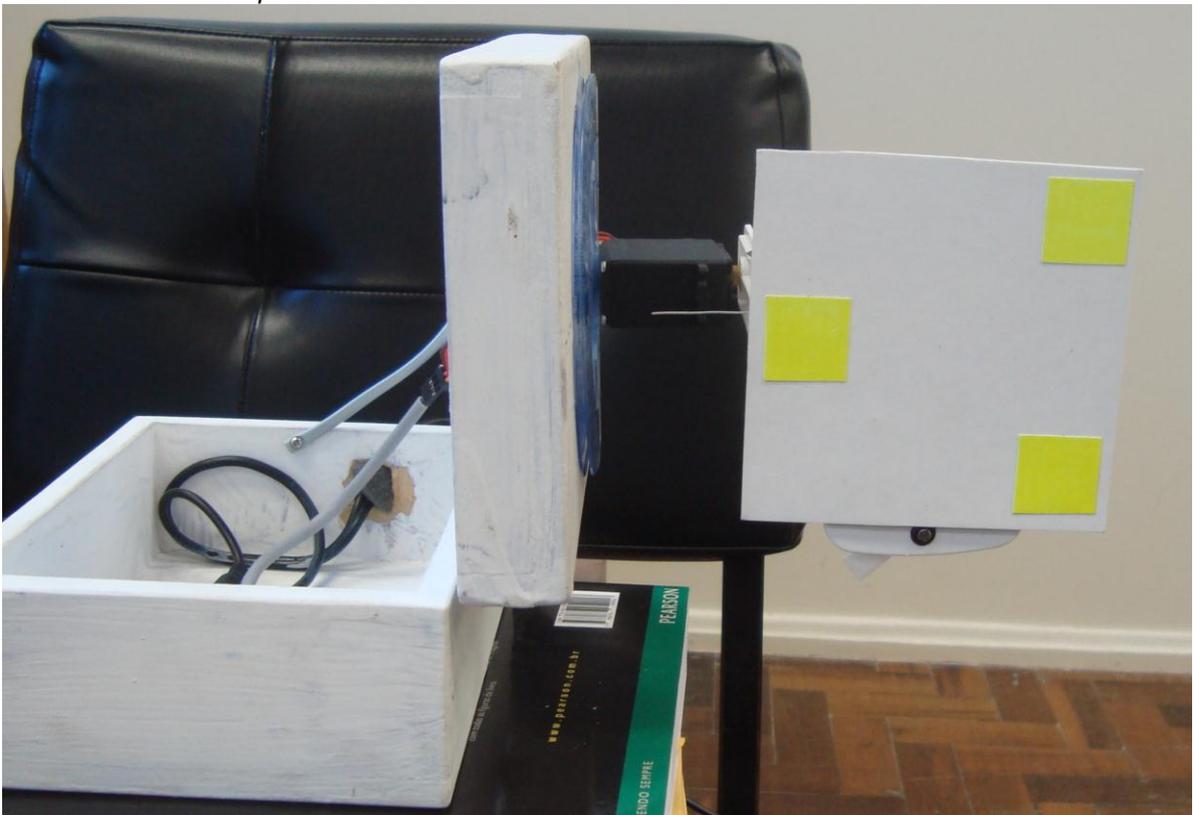
Utilizando a ferramenta de detecção de picos (Seção 3.7.2.6), foram seleccionados os picos do movimento senoidal quantificado referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares, e calculados o seus valores médios e desvio padrão, resultando nos seguintes valores:

- Amplitude 1: 60,9487° +- 0,4867°
- Amplitude 2: -60,5799° +- 0,3664°
- Amplitude 3: 35,2097° +- 0,8610°
- Amplitude 4: -33,9087° +- 1,1883°

4.2 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO *PITCH*)

Neste teste foi medida a precisão do instrumento na quantificação dos estímulos, utilizando o dispositivo simulador configurado para o movimento angular *pitch*. A Figura 4.2.1 ilustra o dispositivo configurado para realização deste movimento.

Figura 4.2.1 - Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos *pitch*



Fonte: O autor (2013).

O teste foi realizado com movimentos senoidais com origem no ângulo de referencia (0°), em diferentes valores de amplitude, com 20 repetições para cada amplitude testada. Os valores das amplitudes testadas foram medidas manualmente, através de um transferidor com precisão de um ângulo, resultando nos seguintes valores:

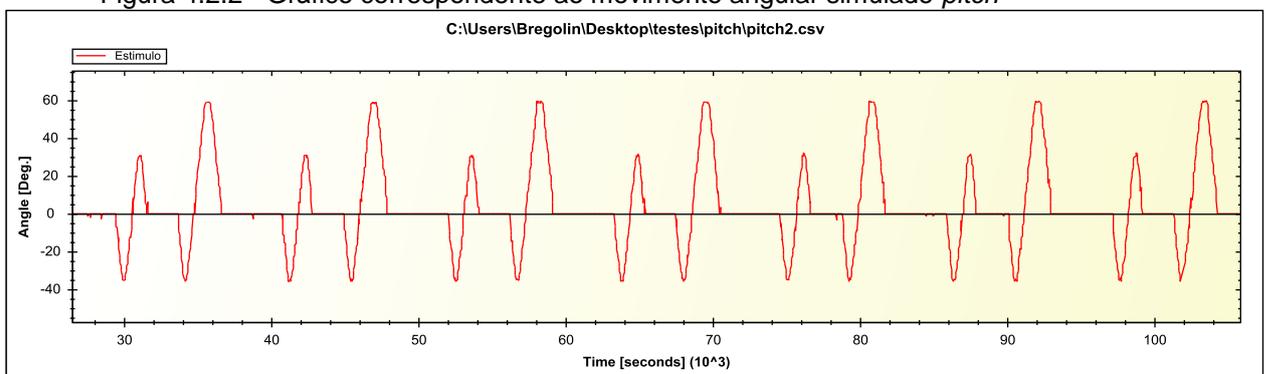
- Amplitude 1: -35° ;
- Amplitude 2: 31° ;
- Amplitude 3: -35° ;

- Amplitude 4: -59° .

No gráfico do movimento angular *pitch* o semiciclo positivo representa o movimento para cima, e o semiciclo negativo, para baixo. O ângulo de amplitude *pitch* testado tem como limite, em seu semiciclo negativo, o ângulo -35° devido ao campo de visão da câmera no sensor Kinect.

O gráfico correspondente aos valores quantificados durante o movimento pode ser visualizado na Figura 4.2.2.

Figura 4.2.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *pitch*



Fonte: O autor (2013).

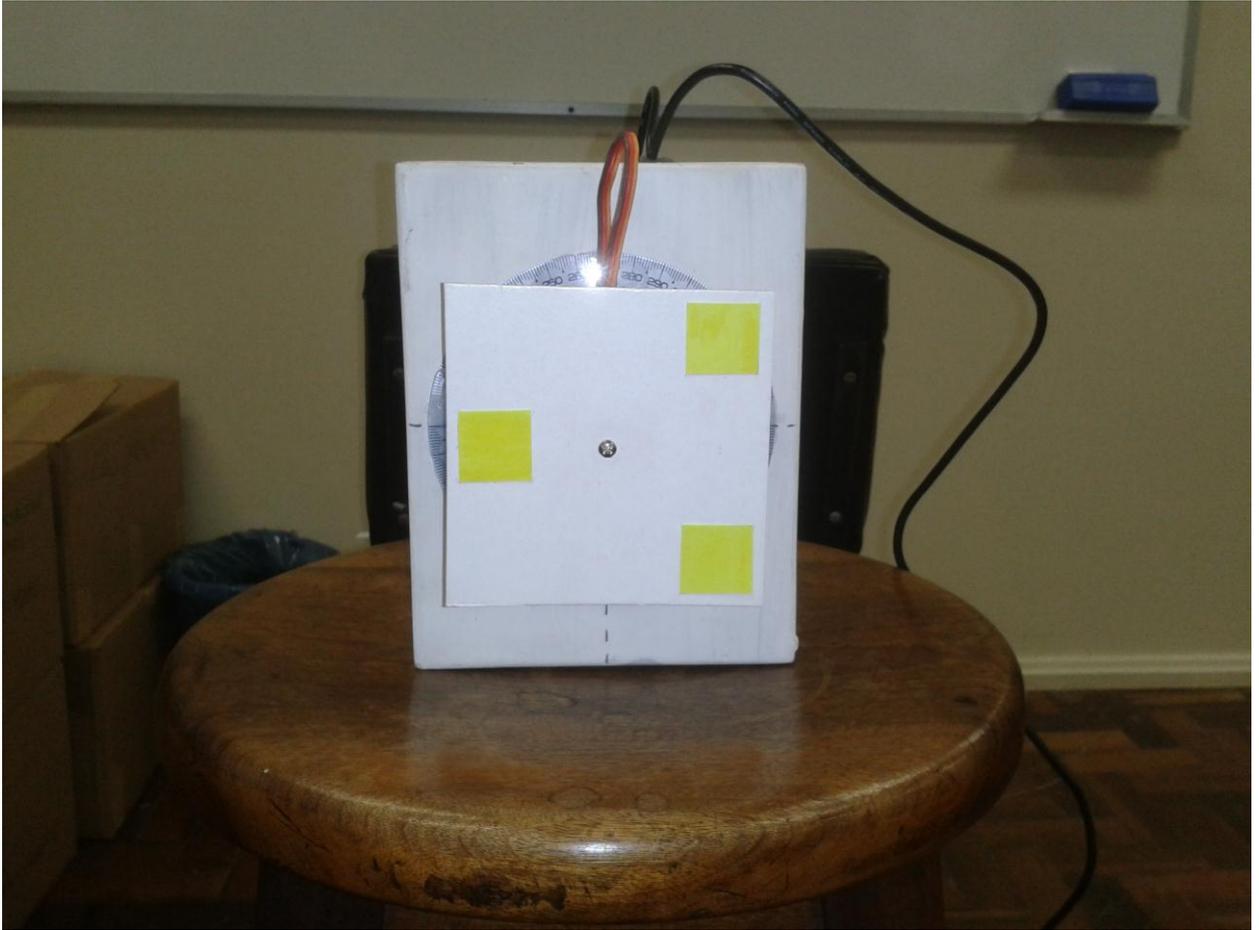
Utilizando a ferramenta de detecção de picos, foram selecionados os picos do movimento senoidal quantificado referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares, e calculados o seus valores médios e desvio padrão, resultando nos seguintes valores:

- Amplitude 1: $-35,4637^\circ \pm 1,3168^\circ$
- Amplitude 2: $31,3752^\circ \pm 1,8379^\circ$
- Amplitude 3: $-35,2151^\circ \pm 1,3721^\circ$
- Amplitude 4: $59,1461^\circ \pm 0,9158^\circ$

4.3 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO *ROLL*)

Neste teste foi medida a precisão do instrumento na quantificação dos estímulos, utilizando o dispositivo simulador configurado para o movimento angular *roll*. A Figura 4.3.1 ilustra o dispositivo configurado para realização deste movimento.

Figura 4.3.1 - Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração para o teste de movimentos *roll*



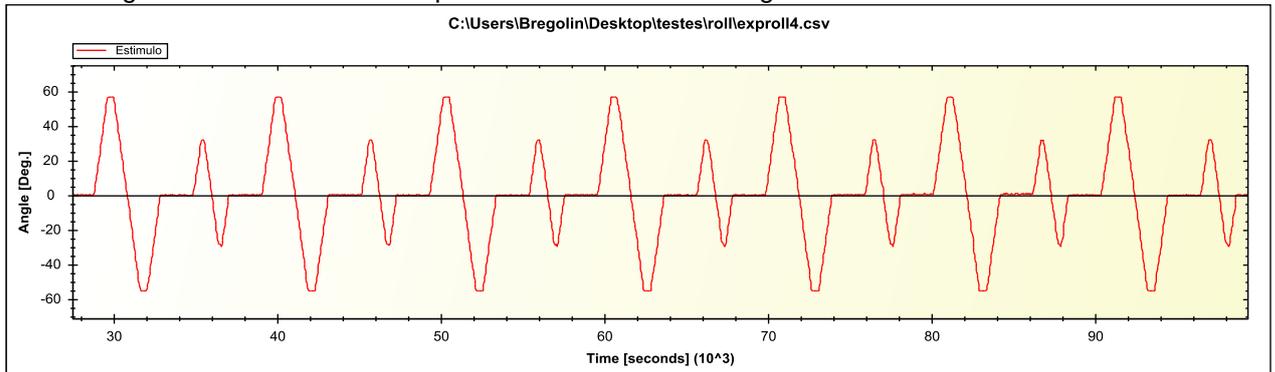
Fonte: O autor (2013).

O teste foi realizado com movimentos senoidais com origem no ângulo de referencia (0°), em diferentes valores de amplitude, com 20 repetições para cada amplitude testada. Os valores das amplitudes testadas foram medidas manualmente, através de um transferidor com precisão de um ângulo, resultado nos seguintes valores:

- Amplitude 1: 57° ;
- Amplitude 2: -55° ;
- Amplitude 3: 32° ;
- Amplitude 4: -30° .

No gráfico do movimento angular *roll* o semiciclo positivo representa o movimento para esquerda, e o semiciclo negativo, para a direita. O gráfico correspondente aos valores quantificados durante o movimento pode ser visualizado na Figura 4.3.2.

Figura 4.3.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *roll*



Fonte: O autor (2013).

Utilizando a ferramenta de detecção de picos, foram selecionados os picos do movimento senoidal quantificado referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares, e calculados o seus valores médios e desvio padrão, resultando nos seguintes valores:

- Amplitude 1: $56,6952^\circ \pm 0,2100^\circ$
- Amplitude 2: $-55,3700^\circ \pm 0,1900^\circ$
- Amplitude 3: $31,6929^\circ \pm 0,1803^\circ$
- Amplitude 4: $-29,5951^\circ \pm 0,4377^\circ$

4.4 TESTES DE PRECISÃO COM A UTILIZAÇÃO DO DISPOSITIVO SIMULADOR (MOVIMENTO YAW COM INCLINAÇÃO *PITCH* DE 30°)

O teste de simulação referente ao movimento angular *yaw* com inclinação *pitch* de 30 graus teve como objetivo realizar testes que simulassem a obtenção da resposta do canal semicircular lateral de forma isolada (Seção 2.1.1). A Figura 4.4.1 ilustra o dispositivo simulador configurado para realização deste movimento.

Figura 4.4.1 - Dispositivo simulador de movimentos angulares com a configuração do teste para movimento *yaw* com inclinação *pitch* de 30°.

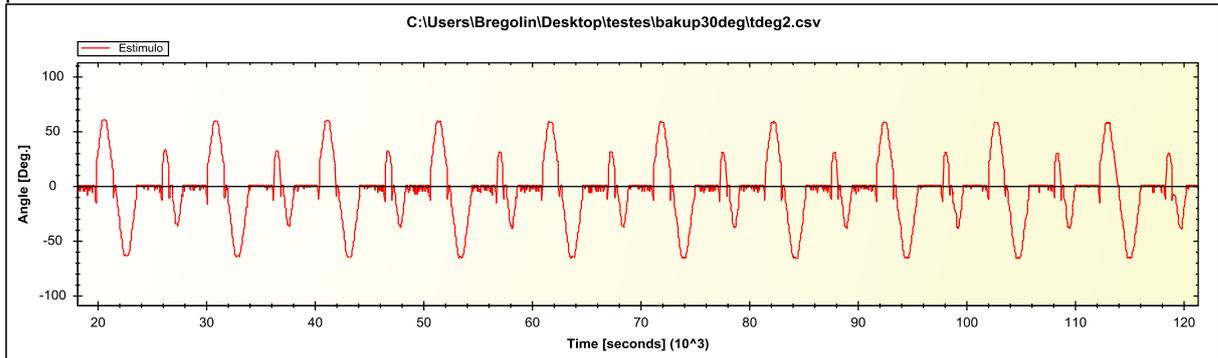


Fonte: O autor (2013).

O teste foi realizado com movimentos senoidais com origem no ângulo de referencia (0°), com as mesmas amplitudes testadas no movimento angular *yaw* do teste na Seção 4.1, com 20 repetições para cada amplitude testada.

O gráfico correspondente aos valores quantificados durante o movimento pode ser visualizado na Figura 4.4.2.

Figura 4.4.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado yaw com inclinação pitch de 30°



Fonte: O autor (2013).

Utilizando a ferramenta de detecção de picos, foram selecionados os picos do movimento senoidal quantificado referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares, e calculados o seus valores médios e desvio padrão, resultando nos seguintes valores:

- Amplitude 1: 60,8875° +- 1,8023°
- Amplitude 2: -60,2069° +- 1,3690°
- Amplitude 3: 35,1095° +- 1,7839°
- Amplitude 4: -33,8289° +- 1,3127°

4.5 TESTE DE CAPTURA EM MEDIÇÃO DE VELOCIDADE ANGULAR

O teste de captura em medição da velocidade angular foi desenvolvido de forma a medir a precisão do instrumento relativa à medição deste parâmetro.

Este teste foi realizado com a utilização do dispositivo simulador de movimentos de cabeça. Como os movimentos do servomotor contido no dispositivo desenvolvido possuem amplitude e velocidade controladas, pode-se estimar a velocidade desempenhada pelo servomotor em duas velocidades testadas.

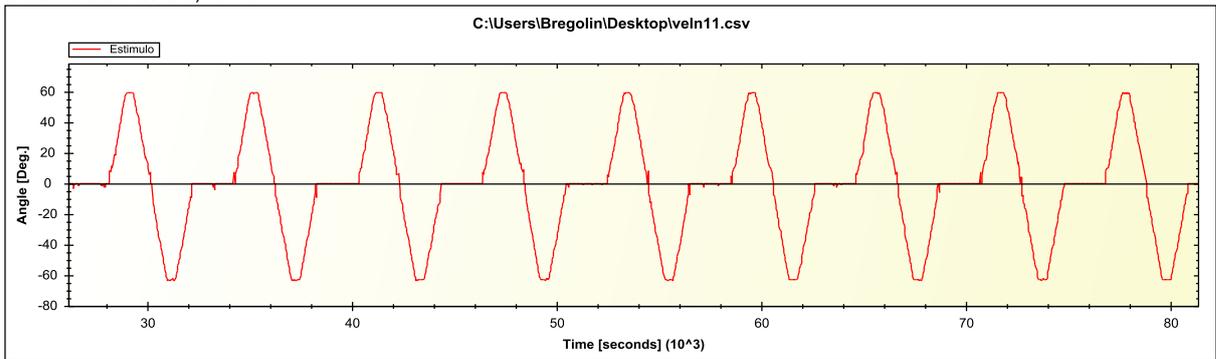
Com a utilização de *timers* utilizados no código de controle do servomotor, foi possível estimar sua velocidade média angular, a cada dois picos, utilizando a equação (5):

$$v = \left(\frac{d_o - d_i}{t_o - t_i} \right) [^\circ/s] \text{ eq. (5)}$$

As duas velocidades testadas foram estimadas em $59,08^\circ/\text{s}$ e $84,03^\circ/\text{s}$.

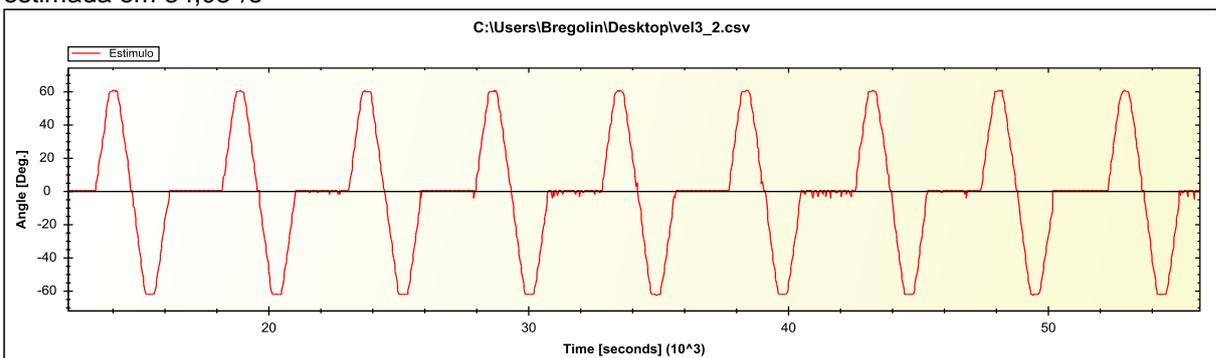
Os movimentos senoidais *yaw* foram utilizados neste teste, em 20 repetições, gerando os gráficos ilustrados nas Figuras 4.5.1 e 4.5.2.

Figura 4.5.1 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *yaw* com velocidade estimada em $59,08^\circ/\text{s}$



Fonte: O autor (2013).

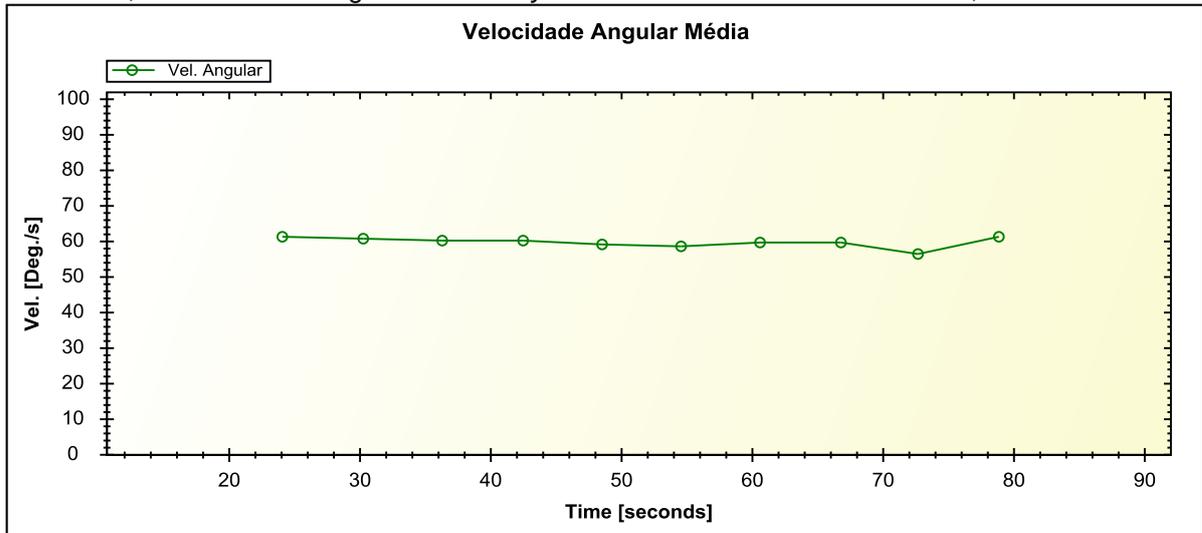
Figura 4.5.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *yaw* com velocidade estimada em $84,03^\circ/\text{s}$



Fonte: O autor (2013).

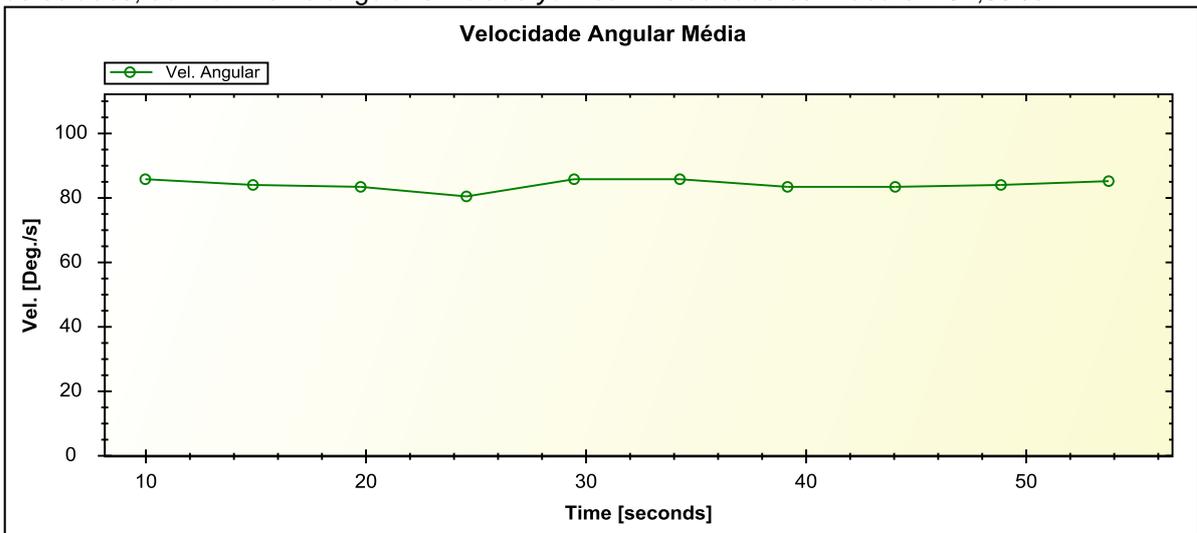
Para calcular a velocidade angular média a cada dois picos, foi utilizada a ferramenta para análise de dados desenvolvida nesta tese (Seção 3.7.2.6). Os gráficos correspondentes às duas velocidades angulares testadas com este movimento angular podem ser visualizados nas Figuras 4.5.2 e 4.5.3.

Figura 4.5.3 - Gráfico correspondente à velocidade angular média, a cada dois picos detectados, do movimento angular simulado yaw com velocidade estimada em 59,08°/s



Fonte: O autor (2013).

Figura 4.5.4 - Gráfico correspondente à velocidade angular média, a cada dois picos detectados, do movimento angular simulado yaw com velocidade estimada em 84,03°/s.



Fonte: O autor (2013).

Utilizando a ferramenta para análise de resultados desenvolvida nesta tese, foram calculados a média e desvio padrão dos dados de velocidade angular extraídos de cada uma das velocidades testadas, estimadas em 59,08°/s (vel. 1) e 84,03°/s. (vel. 2), resultando nos seguintes valores:

- Vel. 1: 59,5096°/s +- 4,1716°/s.
- Vel. 2: 83,9161°/s +- 4,9998°/s.

4.6 TESTES DE CAPTURA COM DIFERENTES TIPOS DE ILUMINAÇÃO

Neste teste foi medida a robustez do instrumento na quantificação dos estímulos quanto à utilização de diferentes tipos de iluminação: fluorescente, incandescente e natural.

As lâmpadas utilizadas neste teste foram: GE 60W (Incandescente) e Osram 32W (fluorescente).

O movimento angular de referência utilizado neste teste foi o *yaw*, desempenhado através do dispositivo simulador desenvolvido nesta tese.

4.6.1 Captura com Luz Fluorescente

Devido à captura dos demais testes realizados nesta tese serem com iluminação fluorescente, o teste de precisão com movimento angular *yaw*, da Seção 4.1, foi utilizado como referência para este teste. Os valores médios e desvio padrão, referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares deste teste, resultaram nos seguintes valores:

- Amplitude 1: $60,9487^\circ \pm 0,4867^\circ$
- Amplitude 2: $-60,5799^\circ \pm 0,3664^\circ$
- Amplitude 3: $35,2097^\circ \pm 0,8610^\circ$
- Amplitude 4: $-33,9087^\circ \pm 1,1883^\circ$

Os valores, mínimos e máximos, da calibração do *thresholding* do modelo de cores HSV utilizados neste tipo de iluminação foram:

- **Hue:** 22-92.
- **Saturation:** 118-255.
- **Value:** 102-255.

4.6.2 Captura com Luz Incandescente

No teste com iluminação incandescente foi utilizado o movimento *yaw*, em 20 repetições, com as mesmas amplitudes do movimento angular *yaw* realizado na Seção 4.1. A imagem colorida mostrada pelo sensor durante este teste pode ser visualizada na Figura 4.6.1.

Figura 4.6.1 - Imagem colorida no teste com iluminação incandescente



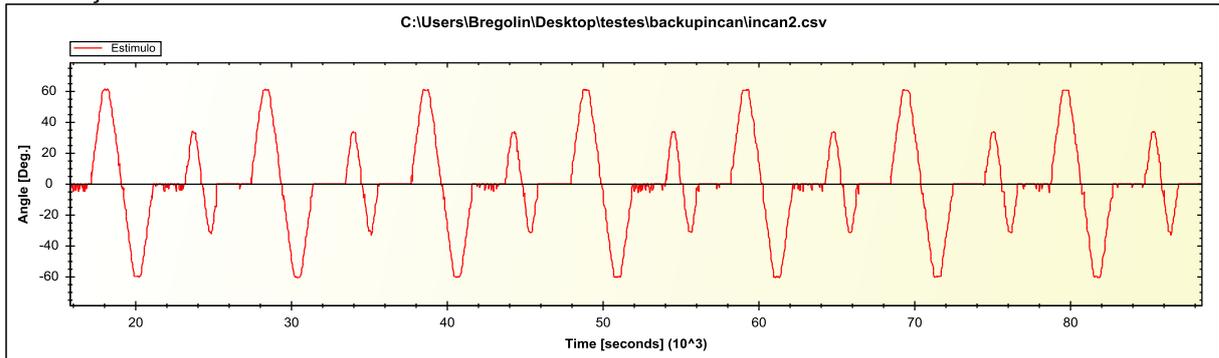
Fonte: O autor (2013).

Os valores, mínimos e máximos, da calibração do *thresholding* do modelo de cores HSV utilizados neste tipo de iluminação foram:

- **Hue:** 19-86.
- **Saturation:** 68-255.
- **Value:** 116-255.

O gráfico correspondente aos valores quantificados durante o movimento pode ser visualizado na Figura 4.6.2.

Figura 4.6.2 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado *yaw* no teste com iluminação incandescente



Fonte: O autor (2013).

Os valores médios e desvio padrão, referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares deste teste, resultaram nos seguintes valores:

- Amplitude 1: $60,7909^\circ \pm 0,4805^\circ$
- Amplitude 2: $-60,4332^\circ \pm 0,2738^\circ$
- Amplitude 3: $35,1512^\circ \pm 1,1257^\circ$
- Amplitude 4: $-33,2927^\circ \pm 1,4118^\circ$

4.6.3 Captura com Luz Natural

No teste com iluminação natural foi utilizado o movimento *yaw*, em 20 repetições, com as mesmas amplitudes do movimento angular *yaw* realizado na Seção 4.1. Como o teste com esta iluminação foi realizado em ambiente interno (laboratório), era fornecida uma iluminação irregular.

A imagem colorida mostrada pelo sensor durante este teste pode ser visualizada na Figura 4.6.3.

Figura 4.6.3 - Imagem colorida no teste com iluminação natural



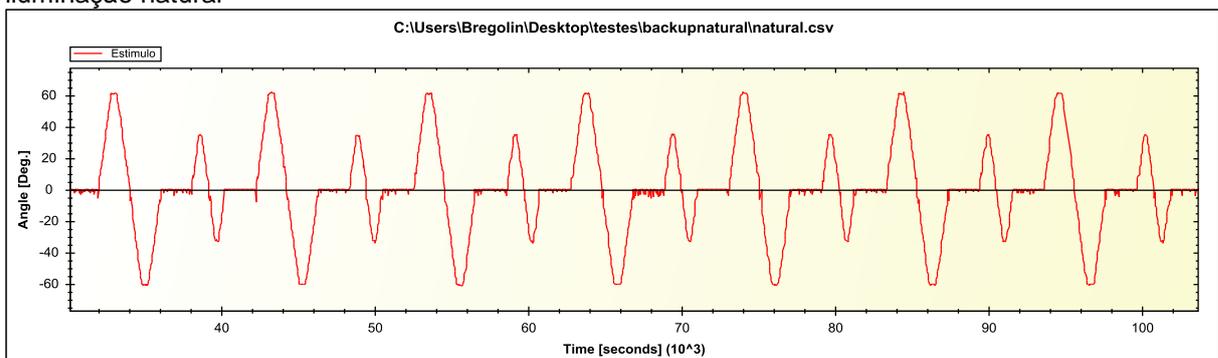
Fonte: O autor (2013).

Os valores, mínimos e máximos, da calibração do *thresholding* do modelo de cores HSV utilizados neste tipo de iluminação foram:

- **Hue:** 19-86.
- **Saturation:** 98-255.
- **Value:** 46-255.

O gráfico correspondente ao movimento angular quantificado com esta iluminação pode ser visualizado na Figura 4.6.4.

Figura 4.6.4 - Gráfico correspondente ao movimento angular simulado yaw no teste com iluminação natural



Fonte: O autor (2013).

Os valores médios e desvio padrão, referente a cada amplitude testada pelo simulador de movimentos angulares deste teste, resultaram nos seguintes valores:

- Amplitude 1: $61,4600^{\circ} \pm 0,7689^{\circ}$
- Amplitude 2: $-60,6258^{\circ} \pm 0,7246^{\circ}$
- Amplitude 3: $34,9667 \pm 1,0908^{\circ}$
- Amplitude 4: $-33,4398^{\circ} \pm 1,1162^{\circ}$

4.7 TESTE INTEGRADO (QUANTIFICADOR DO RVO E DE ESTÍMULOS)

De forma a demonstrar a utilização conjunta dos instrumentos de quantificação do reflexo vestibulo-ocular (RVO) (descrito na Seção 3.4) e dos movimentos de cabeça (estímulos), foi realizado um teste funcional com os dois instrumentos, utilizando os movimentos angulares de cabeça *yaw*.

O instrumento quantificador do RVO, adaptado para realização deste teste, está ilustrado na Figura 4.7.1.

Figura 4.7.1 - Instrumento quantificador do RVO adaptado para realização do teste integrado



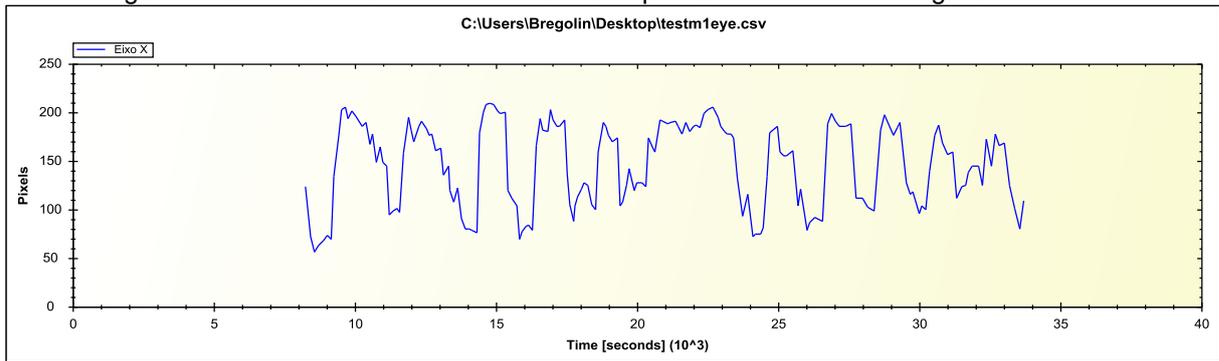
Fonte: O autor (2013).

Para realização deste teste, foram utilizados os seguintes valores de calibração do aplicativo de quantificação do RVO, sugeridos nos testes da tese de L. Prestes (PRESTES, 2013):

- **Thresholding:** 0 – 15.
- **Varição de Área Olho:** 41%.
- **Redução de Imagem:** 10%.

O gráfico correspondente ao movimento do olho quantificado neste teste pode ser visualizado na Figura 4.7.2.

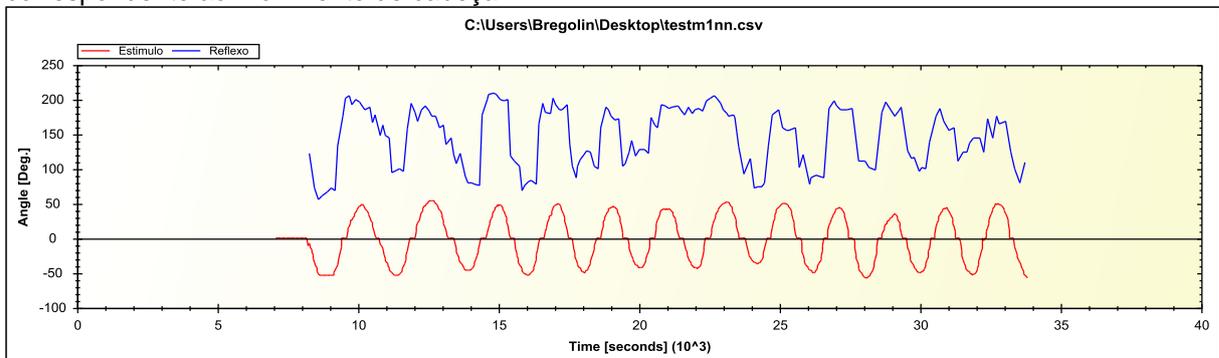
Figura 4.7.2 - Gráfico do movimento do olho quantificado no teste integrado



Fonte: O autor (2013).

O gráfico dos movimentos de cabeça desempenhados durante a quantificação do movimento do olho, ilustrado na Figura 4.7.2, pode ser visualizado na Figura 4.7.3. Pode-se visualizar na Figura 4.7.3, que o gráfico do movimento do olho foi sobreposto ao gráfico dos estímulos, e que os dois gráficos estão sincronizados pela variável tempo do cronômetro de sincronização, desenvolvido nesta tese (Seção 3.4.1).

Figura 4.7.3 - Gráfico correspondente ao movimento do olho sobreposto ao gráfico correspondente ao movimento de cabeça

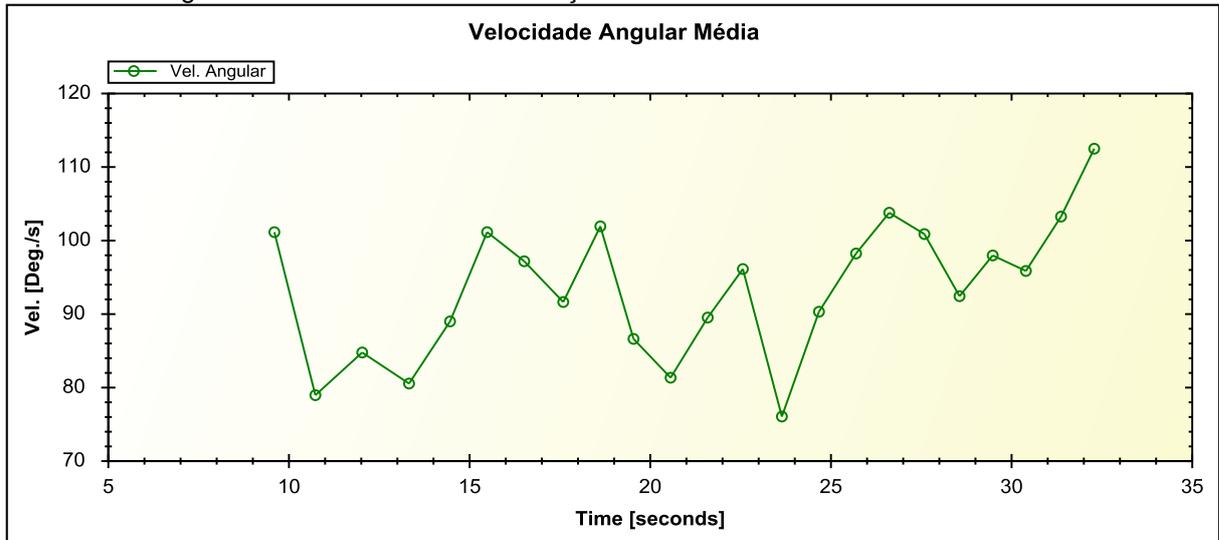


Fonte: O autor (2013).

Pode-se verificar o sincronismo entre os picos dos dois gráficos ilustrados na Figura 4.7.3 (RVO e estímulo).

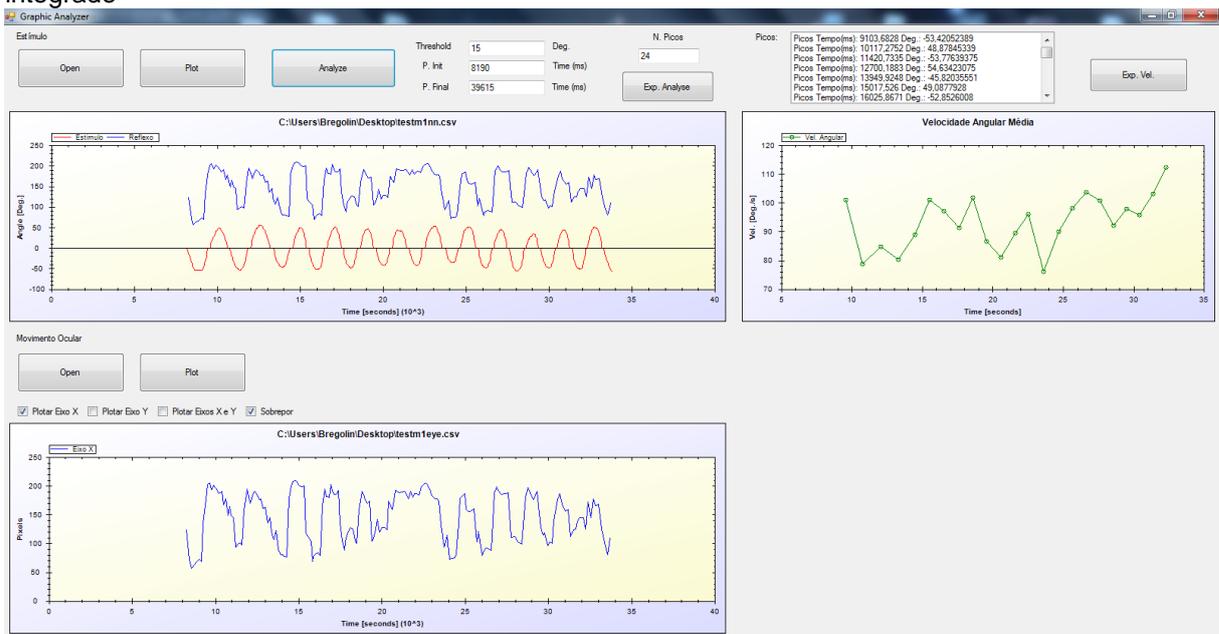
Para extrair o parâmetro de velocidade angular dos movimentos de cabeça desempenhados, foi utilizada a ferramenta para análise de dados desenvolvida nesta tese (Seção 3.7.2.6). O gráfico correspondente à velocidade angular média a cada dois picos detectados no gráfico dos movimentos de cabeça está ilustrado na Figura 4.7.4. A visão geral da ferramenta de análise de resultados durante a avaliação deste teste é encontrada na Figura 4.7.5.

Figura 4.7.4 - O gráfico correspondente à velocidade angular média a cada dois picos detectados no gráfico dos movimentos de cabeça



Fonte: O autor (2013).

Figura 4.7.5 - Visão geral da ferramenta de análise de resultados durante a avaliação do teste integrado



Fonte: O autor (2013).

5 CONCLUSÕES

5.1 APLICAÇÕES

O instrumento desenvolvido possui aplicabilidade em áreas como:

- Medicina

Apoio à análise de disfunções do sistema vestibular, auxiliando a busca de causas diagnósticas em queixas como vertigens ou perda de equilíbrio. Além disso, pode auxiliar na diferenciação entre causas centrais e periféricas de sintomas relacionados ao sistema vestibular.

- Pesquisas

O instrumento possibilitará desenvolver novas pesquisas relacionadas ao sistema vestibular. Como exemplo, auxiliando na busca de curvas de normalidade.

- Farmacêutica

Apoio à análise dos efeitos de medicamentos que atuam no sistema vestibular, em problemas como perda de equilíbrio e desorientação.

- Fisioterapia

No apoio à análise da evolução do paciente, de modo a avaliar sua efetiva melhora no uso da fisioterapia em sua recuperação.

5.2 ALGORITMO DESENVOLVIDO

O algoritmo desenvolvido com o objetivo de quantificar os movimentos seletivos da cabeça demonstrou valores de amplitudes detectados, em média, iguais aos valores das amplitudes medidos manualmente, e com um desvio padrão (mínimo e máximo entre todos os testes), em relação ao valor esperado (média), entre $0,1803^\circ$ e $1,8023^\circ$, como demonstrado nos diversos testes com a utilização do dispositivo simulador de movimentos angulares desenvolvido nesta tese.

O algoritmo demonstrou robustez quanto à utilização de diferentes tipos de iluminação na captura dos dados, mesmo com iluminação irregular, atingindo resultados semelhantes entre todos os tipos de iluminação testados (fluorescente,

incandescente e natural).

5.3 APLICATIVO DESENVOLVIDO

O aplicativo desenvolvido realizou o processamento das imagens capturadas pelo sensor Kinect, permitindo o correto funcionamento do algoritmo quantificador dos estímulos, e a exibição de forma gráfica dos movimentos de cabeça isoladamente para cada um dos três eixos de rotação (*yaw*, *pitch* e *roll*).

A extração de parâmetros de velocidade angular realizada por este aplicativo resultou, em média, em valores muito próximos aos desempenhado pelo servomotor durante os testes, de $59,5096^{\circ}/s \pm 4,1716^{\circ}/s$ para velocidade estimada em $59,08^{\circ}/s$ (velocidade 1) e $83,9161^{\circ}/s \pm 4,9998^{\circ}/s$. para a velocidade estimada em $84,03^{\circ}/s$. (velocidade 2). O instrumento poderá obter melhores resultados na extração deste parâmetro utilizando um sensor com uma taxa maior de frames por segundo (FPS), em comparação com o sensor utilizado nesta tese, de 30 FPS, além da utilização de um motor mais preciso e com controle óptico para a realização dos testes.

O aplicativo desenvolvido permitiu a exportação e importação dos dados quantificados, e dos parâmetros de calibração utilizados.

5.4 INTEGRAÇÃO (INSTRUMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DO RVO E DE ESTÍMULOS)

A integração da aquisição de dados entre o exame de quantificação do RVO e o instrumento quantificador dos movimentos seletivos da cabeça, bem como a exibição dos gráficos de forma sincronizada, foi demonstrada no teste integrado (Seção 4.7).

Pode-se visualizar na Figura 4.7.3 que o gráfico do movimento do olho quantificado (olho direito) foi sobreposto ao gráfico dos estímulos (movimentos de cabeça), e que os dois gráficos estão sincronizados pela variável tempo do cronômetro de sincronização, desenvolvido nesta tese (Seção 3.4.1), e há sincronismo entre os picos dos dois gráficos.

6 TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta tese permitirá a realização de diversos estudos, como:

- Pesquisas ligadas ao sistema vestibular, provendo dados de apoio à identificação e definição de padrões, através do fornecimento de parâmetros de referência aos dados obtidos pela quantificação do reflexo vestibulo-ocular.
- Desenvolver a gravação do áudio do exame, de forma sincronizada à quantificação dos estímulos e do RVO, de forma a fornecer mais informações sobre ambiente da sala do exame.
- Utilização do algoritmo desenvolvido nesta tese em outras áreas que necessitem da quantificação de movimentos em três dimensões.
- Desenvolvimento de testes com motores de maior precisão, utilizando controle por sensores ópticos (Encoder).

REFERÊNCIAS

Lucas P.; **Instrumento Portátil para Aquisição, Digitalização e Processamento de Imagens a ser Aplicado na Avaliação do Sistema de Equilíbrio Humano.** Porto Alegre: PUCRS, 2013. Tese (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2013.

Márcio V; **Instrumento de Aquisição e Processamento de Imagens de Olhos.** Porto Alegre: PUCRS, 2007. Tese (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

Herdman, Suzan J.; **Vestibular Rehabilitation.** Philadelphia: F. A. Davis Company, 2007.

Gonzalez, Rafael C.; Woods, Richard E. **Processamento de Imagens Digitais.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

Leigh, R. John; Zee, David S.; **The Neurology of Eye Movements.** New York: Oxford University Press, 1999.

Moeslund, Thomas B.; **Introduction to Video and Image Processing.** London: Springer, 2012.

Miles, Rob.; **Start Here! Learn the Kinect API.** California: Microsoft Press, 2012.

Webb, Jarrett; Ashley, James; **Beginning Kinect Programming with the Microsoft Kinect SDK.** Apress, 2012.

Bradski, Gary.; Kaehler, Adrian.; **Learning OpenCV.** Sebastopol: O'Reilly Media, 2008.

Jack, Keith.; **Video Demystified: A Handbook for the Digital Engineer.** Oxford: Elsevier, 2007.

Baloh, Robert W.; Honrubia, Vicente. **Clinical Neurophysiology of the Vestibular System.** Philadelphia: F.A.Davis. 1990.