

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA MÉDICA

Juan Valani Marques de Sousa

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR MECÂNICO DE OLHO PARA
CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO OCULAR PARA
TRATAMENTO DE MELANOMA DE COROIDE

Rio de Janeiro

2018

Juan Valani Marques de Sousa

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR MECÂNICO DE OLHO PARA
CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO OCULAR PARA
TRATAMENTO DE MELANOMA DE COROIDE

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr^a Simone Coutinho Cardoso
Co-orientador: Prof. Dr. Odair Dias Gonçalves

Rio de Janeiro

2018

CIP - Catalogação na Publicação

VS725d Valani Marques de Sousa, Juan
Desenvolvimento de um simulador mecânico de olho para calibração de um sistema de monitoramento ocular para tratamento de melanoma de coroide / Juan Valani Marques de Sousa. -- Rio de Janeiro, 2018.
116 f.

Orientadora: Simone Coutinho Cardoso.
Coorientador: Odair Dias Gonçalves.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Bacharel em Física Médica, 2018.

1. Melanoma de Coroide. 2. Eye tracking. 3. Simulador de olho. 4. Radioterapia estereotáxica. 5. Impressão 3d. I. Coutinho Cardoso, Simone, orient. II. Dias Gonçalves, Odair, coorient. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha avó Josefa marques de Sousa e ao meu avô João Valani.
Dedico também à minha mãe, Elisete Aparecida Valani, e ao meu pai, Marcio Alencar
Marques de Sousa, que sacrificaram a vida toda por mim.

*Bem que sonhei um dia
Ir para algum lugar.
Agora não sei quem vai
Não sei mais se quero andar.*

*Cada caminho torto que um dia eu tracei,
Agora si encontra louco pelo fruto que eu encontrei.*

*Meu estranho sonho agora se encontra branco.
É que esse estranho fruto que eu amo tanto,
Unificou meu mundo e me deixou no espanto.*

*Antes sabia tudo
Meus Deus! Agora não faço ideia,
Ontem eu queria o mundo
Reconheço agora, que eu só quero, ela.*

Juan Valani Marques de Sousa

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR MECÂNICO DE OLHO PARA
CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO OCULAR PARA
TRATAMENTO DE MELANOMA DE COROIDE

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da
Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Física Médica

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Simone Coutinho Cardoso (orientadora) – IF/UFRJ

Luiz Antonio Ribeiro da Rosa- IRD/CNEN

Bruno Souza de Paula – IF/UFRJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me carregou no colo durante todo esse tempo.

Agradeço à minha família que sempre esteve comigo me ajudando a cada passo. Em especial, ao meu avô José, minha avó Maria, minha mãezinha e padrinho e minha tia Rita.

Agradeço ao meu pai por ter me dado exemplo a vida toda de esforço, competência e amizade. Agradeço à minha mãe por me ensinar a questionar o mundo. Amo vocês!

Obrigado ao Renan Valani, espero ser sempre um exemplo bom para você.

Agradeço à minha noiva Bianca Macedo Guimarães. A mulher mais incrível que eu conheci. Cada palavra que eu escrevi tem o dedo dela. Foi a força que ela me emprestou que não me deixou desistir durante a graduação. Há 12 anos eu me orgulho de estar com ela. Eu agradeço a ela a cada dia e pretendo agradecer por todos os outros dias que eu viver.

Agradeço à professora Simone Cardoso Coutinho, minha orientadora, de quem tirei muitas horas de sono para corrigir meu TCC, por acreditar em mim, por ter me ensinado e por ter se dedicado a me tornar um profissional mais capaz.

Ao professor Odair Dias Gonçalves, peço obrigado por todo o empenho e dedicação para comigo, por todas as dicas e pela confiança.

Aos dois, o que fizeram por mim foi muito importante e nunca irei parar de agradecer.

Agradeço aos meus amigos Pedro Durão, Lucas Cavalcante, Dirceu Dias, Felipe Marques e a todos os outros que a física médica me levou a conhecer.

Agradeço aos professores Vitória Barthem, José Elder e Carlos Zarro por acreditarem e confiarem em mim durante a minha graduação.

Agradeço também aos funcionários do IF pelo apoio de sempre.

RESUMO

O melanoma de coroide é um tipo de câncer que atinge de 6 a 7 pessoas por milhão de habitantes por ano nos EUA. Esse tumor tem grande probabilidade de se tornar metastático, aumentando o risco de óbito do paciente. A radioterapia estereotáxica pode ser aplicada para tratamento desses tumores mesmo que estejam em estágio avançado e/ou em regiões inacessíveis para os outros métodos. Por conta da movimentação do olho e da incerteza relacionada ao reposicionamento do paciente em dias diferentes de tratamento, a área irradiada aumenta, causando danos aos tecidos saudáveis vizinhos ao tumor. Utilizando um sistema de rastreamento do movimento do olho durante o tratamento é possível desligar o feixe quando o movimento do olho ultrapassar um determinado patamar, diminuindo os danos a tecidos saudáveis e aumentando as chances de se manter a capacidade visual do olho do paciente. Foi desenvolvido no LAFRAG um programa de *tracking* de olho capaz de obter, a partir dos vídeos feitos durante o tratamento de radioterapia, o deslocamento do olho do paciente com uma resolução de 0,1 mm. Com o software é possível obter informações sobre a movimentação ocular e automatizar o sistema de desligamento do feixe. Contudo, qualquer sistema que seja aplicado a tratamentos médicos deve ser testado, avaliado e calibrado. O objetivo desse trabalho foi construir um sistema mecânico que tenha características anatômicas que permitam mimetizar a movimentação do olho humano durante o tratamento de melanoma de coroide a fim de testar e calibrar o sistema de rastreamento de olho. O sistema construído utilizando impressão 3D foi capaz de calibrar o sistema de *tracking* desenvolvido no LAFRAG para acompanhar o movimento suave do olho humano em um tratamento de melanoma de coroide.

Palavras-chave: Melanoma de Coroide, *Eye tracking*, Simulador de olho, Radioterapia estereotáxica.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- DESENHO DO ARRANJO ANATÔMICO DO OLHO HUMANO (HTTPS://CASADOOCULOS.WORDPRESS.COM/2010/12/03/ANATOMIA-DO-OLHO-DIVERSOS , ACESSADO EM 7/12/2018).	21
FIGURA 2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA PLACA DA BRAQUITERAPIA DE MELANOMA DE COROIDE. (A) ISÓTOPOS RADIATIVOS, (B) REGIÃO DE COLOCAÇÃO DOS ISÓTOPOS E (C) PLACA QUE É CIRURGICAMENTE IMPLANTADA NO PACIENTE. (FINGER, 2009).....	24
FIGURA 3 - FOTOGRAFIA DA PLACA CONTENDO O RADIOISÓTOPO COLOCADA EM CONTATO COM O OLHO DO PACIENTE (COUTINHO ET AL., 2017).....	25
FIGURA 4 - FOTO DE UM ACELERADOR LINEAR COM A MESA PARA POSICIONAMENTO DO PACIENTE (HTTPS://WWW.CANCER.ORG.BR/FUNDAÇÃO-DO-CANCER-VAI-DAR-AULAS-DE-RADIOTERAPIA , ACESSADO EM 9/01/2018).	25
FIGURA 5- PACIENTE UTILIZANDO MÁSCARA DE IMOBILIZAÇÃO ESTEREOTÁXICA POSICIONADO EM MESA DE TRATAMENTO. (HTTPS://SETORSAUDE.COM.BR/RADIOTERAPIA-DO-MAE-DE-DEUS-INVESTE-EM-MASCARAS-PARA-TRATAMENTO-DE-CABECA-E-PESCOCO , ACESSADO EM 8/02/2018).....	26
FIGURA 6 - IMAGEM MOSTRA SISTEMA NÃO INVASIVO DE FIXAÇÃO ESTEREOTÁXICO COM MONITORAÇÃO OCULAR.....	27
FIGURA 7 - ANÁLISE DO MOVIMENTO DO OLHO DURANTE TELETERAPIA ESTEREOTÁXICA DE MELANOMA DE ÚVEA DE 23 PACIENTES. A DISTÂNCIA É MEDIDA BASEADO EM 1162 FRAMES RETIRADOS DOS VÍDEOS GRAVADOS. (A) DISTRIBUIÇÃO ACUMULATIVA (B) FREQUÊNCIA ACUMULADA (DIECKMANN ET AL., 2011).....	28
FIGURA 8 - GRÁFICO MOSTRANDO SOBREVIVÊNCIA DE PACIENTES LIVRE DE ENUCLEAÇÃO NOS PRIMEIROS 50 MESES PÓS-TRATAMENTO (DUNAVOELGYI ET AL., 2011).	28
FIGURA 9-SISTEMA REFERENCIAL PARA AS ROTAÇÕES OCULARES (A) PLANO HORIZONTAL ONDE AS ROTAÇÕES ESTÃO DEFINIDAS NO ENTORNO DO EIXO VERTICAL (SI); (B) PLANO SAGITAL ONDE ESTÃO DETERMINADAS AS ROTAÇÕES VERTICAIS EM TORNO DO EIXO TRANSVERSAL (LM); (C) PLANO FRONTAL ONDE AS ROTAÇÕES DE TORÇÃO ACONTECEM EM TORNO DO EIXO LONGITUDINAL (AP) (BICAS, 2003).....	29
FIGURA 10- PROCESSO DE CONSTRUÇÃO UTILIZANDO EXTRUSÃO DE UM MATERIAL PLÁSTICO. O EXTRUSOR E A BASE DE IMPRESSÃO TÊM A CAPACIDADE DE SE MOVIMENTAR, PERMITINDO COM ISSO A CONSTRUÇÃO DE VARIADOS TIPOS DE SUPERFÍCIES. FIGURA TRADUZIDA PELO AUTOR.	30
FIGURA 11 - VISÃO ESQUEMÁTICA FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE IMÃ PERMANENTE (FEIS FNESP, 2013).	31
FIGURA 12 - FIGURA ESQUEMÁTICA SOBRE O MODO DE FUNCIONAMENTO DE UM MEIO PASSO (MECA WEB, 2008).	32
FIGURA 13 - MOTOR DE PASSO 28BYJ-48, MODELO RIORAND, CONECTADO A PLACA CONTROLADORA COM O DRIVER ULN2003 (HTTPS://WWW.ARDUINOECIA.COM.BR/2014/04/CONTROLANDO-MOTOR-DE-PASSO-28BYJ-48.HTML , ACESSADO EM 12/12/2017).....	32

FIGURA 14 - ROTOR DO MOTOR DE PASSO 28BYJ-48 5V, FOTO MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS IMÃS AO REDOR DO EIXO (STATEHAM, 2015).....	33
FIGURA 15 - ETAPAS PARA DESMONTAGEM DO MOTOR. (A) MOTOR MONTADO; (B) MOTOR SEM A TAMPA SUPERIOR EXTERNA, VISÃO DAS ENGRENAGENS; (C) MOTOR SEM ENGRENAGENS. (D) MOTOR DA FIGURA C ABERTO, VISÃO DAS QUATRO SUPERFÍCIES DENTADAS.	33
FIGURA 16- SISTEMA DE ENGRENAGENS DO MOTOR DE PASSO 28BYJ-48. ESSE SISTEMA DE ENGRENAGENS TEM UMA RELAÇÃO DE 1 PARA 64 PASSOS, APROXIMADAMENTE (WIDEMAN, 2016).....	34
FIGURA 17- FOTO DO RASPBERRY PI 3 MODEL B (SRMOURASILVA, 2017).....	35
FIGURA 18 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA PLACA CONTROLADORA ULN2003 (PATSKO, 2006).....	35
FIGURA 19- ARRANJO UTILIZADO NO MODELO 1. MOTOR CONECTADO À PLACA CONTROLADORA, COM CHIP ULN2003, E ESTA CONECTADA A UM RASPBERRY PI 3 MODEL B(WWW.ARDUINOECIA.COM.BR/2015/	37
FIGURA 20- MODELO UNIDIMENSIONAL DO OLHO IMPRESSO NESSE TRABALHO.....	38
FIGURA 21- VISTA SUPERIOR DO MODELO UNIDIMENSIONAL, REFERENCIANDO O PROBLEMA DE IMPRESSÃO.	39
FIGURA 22 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA DEPOSIÇÃO DE PLA PELA IMPRESSORA 3D A FIM DE CONSTRUIR UM CÍRCULO. A SETA INDICA A PONTA DO EXTRUSOR E A ÁREA VERMELHA O QUE FOI OU ESTÁ SENDO DEPOSITADO.	39
FIGURA 23- IMAGEM DA MARCAÇÃO GRADUADA UTILIZADA PARA MEDIR ÂNGULOS. CÍRCULO TRANSFERIDOR K23511799. A TERCEIRA LINHA FOI UTILIZADA PARA FAZER AS MEDIÇÕES. RESOLUÇÃO 0,25° QUE CORRESPONDE AO MEIO ENTRE DUAS MARCAÇÕES (HTTP://WWW.FOTOSEARCH.COM/CSP145/K23511799/ , ACESSADO EM 10/08/2017).....	40
FIGURA 24- DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DE FIXAÇÃO DO MOTOR NA PLACA DE ISOPOR UTILIZADO NA MONTAGEM DO GONIÔMETRO.	41
FIGURA 25- ESTRUTURA DE FIXAÇÃO DO MOTOR MONTADA SOBRE UMA PLACA DE ISOPOR ONDE FOI INSTALADA A MARCAÇÃO GRADUADA EM GRAUS. (A) IMAGEM DA PLACA SUPERIOR ANTES DE SER FIXADA COM PARAFUSOS. (B) VISTA INFERIOR, MOSTRA O MOTOR FIXADO À PLACA INFERIOR. (C) VISTA SUPERIOR ANTES DA INSTALAÇÃO DA ÚLTIMA PLACA, MOSTRA O ROLAMENTO INFERIOR E A INSERÇÃO DA ESTRUTURA NO ISOPOR. (D) MONTAGEM FINAL COM O PONTEIRO SENDO COLOCADO.....	41
FIGURA 26- MODELO COM DOIS SISTEMAS DE HOME: (A) INDICA A ESTRUTURA ALINHADA ANTES DE SER COLOCADA NA PLACA DE MADEIRA. (B) ESTRUTURA COLOCADA NA PLACA DE MADEIRA. (C) CONTATOS DO SISTEMA DE HOME.	44
FIGURA 27- DESENHO ESQUEMÁTICO DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO USADA PARA VERIFICAR A MEDIDA ENTRE DUAS PLACAS.	51
FIGURA 28- FOTO DO OLHO MECÂNICO MONTADO SOBRE SUA BASE.....	59
FIGURA 29- DESENHO ESQUEMÁTICO DO MECANISMO DE GIRO DO OLHO MECÂNICO. ROLAMENTOS SÃO UTILIZADOS PARA POSSIBILITAR ESSA MOVIMENTAÇÃO. EM AZUL, CÍRCULO DE MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL E EM, VERDE, EIXO DE MOVIMENTAÇÃO VERTICAL.....	59

FIGURA 30- MECANISMO UTILIZADO PARA MOVIMENTAÇÃO DO EIXO VERTICAL DE FORMA QUE A VARIÇÃO ANGULAR CAUSADA PELO EIXO DO MOTOR SEJA IGUAL À MOVIMENTADA PELO OLHO	60
FIGURA 31 – (A) EIXO VERTICAL COM ESTRUTURA SUPORTE PARA O MODELO ANATÔMICO DO OLHO. (B) MODELO ANATÔMICO DO OLHO COM SUPORTE PARA ENCAIXÁ-LO NO EIXO.....	61
FIGURA 32- FOTO DO CÍRCULO DE MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL, PÓS-IMPRESSO. A E B SÃO METADES QUE FORAM UNIDAS PARA A CONSTRUÇÃO DA PEÇA FINAL, EM (C).	61
FIGURA 33 - SUPORTE PARA GIRO VERTICAL; (A) TODOS OS TRÊS SUPORTES, BARRA B CONECTADA AO EIXO DO MOTOR; (B) MECANISMO EM ETAPA FINAL ESPERANDO O PINO QUE SERÁ ENCAIXADO NO ROLAMENTO DO SUPORTE VERTICAL; (C) MÉTODO DE CONSTRUÇÃO UTILIZANDO UM PADRÃO DE DISTÂNCIA PARA EVITAR QUE PEÇAS FIQUEM NO FINAL ENCOSTADAS, CAUSANDO ATRITO; (D) PINOS E SUPORTE PARA PINO.....	62
FIGURA 34 - (A) ESTRUTURA DE GIRO COM OS SUPORTES QUE SERÃO CONECTADOS AO SISTEMA DE HOME HORIZONTAL; (B) VISUALIZAÇÃO DO SISTEMA PARA O GIRO VERTICAL.	63
FIGURA 35 - SUPORTE PARA OS MOTORES E SISTEMA DE HOME. (A) DOIS SUPORTES PARAFUSOS DE FIXAÇÃO E SISTEMA DE HOME INFERIOR. (B) SUPORTE MOTOR 1. (C) SUPORTES MONTADOS (D) SISTEMA DE HOME E EIXO MOTOR 2.....	63
FIGURA 36 - EIXO MOTOR 2 SEM JUMPER PARA CONTATO.	64
FIGURA 37- DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA PARA MEDIÇÃO DO MOVIMENTO DO OLHO NA DIREÇÃO HORIZONTAL.	66
FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO TRIÂNGULO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA VARIÇÃO ANGULAR DO OLHO.	66
FIGURA 39 - FIGURA ILUSTRANDO OS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DA VARIÇÃO ANGULAR. (A) ELEMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO INICIAL. (B) CONDIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA VARIÇÃO ANGULAR PÓS-MOVIMENTAÇÃO DOS PASSOS ONDE Θ É A DIFERENÇA ENTRE Θ_0 E Θ_f	67
FIGURA 40 - MEDIDA DO VALOR B ATRAVES DO SOFTWARE AUTOCAD®.	67
FIGURA 41 - FOTOS DA ESTRUTURA E ARRANJO PARA MEDIÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL. EM (A) É POSSÍVEL VISUALIZAR A RÉGUA UTILIZADA PARA MEDIR AS DISTÂNCIAS ENTRE AS ESTRUTURAS E COMO REFERÊNCIA PARA FAZER O ALINHAMENTO DA ESTRUTURA COM O OLHO MECÂNICO; (B) FOTO FRONTAL DA ESTRUTURA, A RÉGUA B FOI UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS.....	69
FIGURA 42 – FOTO DA ESTRUTURA E ARRANJO UTILIZADO PARA MEDIÇÕES NA DIREÇÃO VERTICAL.....	70
FIGURA 43 - IMAGEM ESQUEMÁTICA DO SISTEMA UTILIZADO PARA AVALIAR A MOVIMENTAÇÃO DA CÂMERA.	75
FIGURA 44 - IMAGEM DO OLHO HUMANO AO INTERAGIR COM A LUZ INFRAVERMELHA. O CÍRCULO BRANCO FOI FEITO POR UM SOFTWARE DE TRACKING A PARTIR DA DIFERENÇA DE CONTRASTE COM AS OUTRAS REGIÕES (HTTP://WWW.VDVS.RU/ENGLISH/PRODUCTS/VOG/VOG.HTM , ACESSADO EM 3/2/2018).....	77
FIGURA 45- SUPORTE PARA O OLHO– EIXO VERTICAL. MEDIDAS EM MILÍMETROS.....	96
FIGURA 46 - CÍRCULO PARA MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL. MEDIDAS EM MILÍMETROS.	96
FIGURA 47 - SUPORTES PARA ESTRUTURA DE GIRO. MEDIDAS EM MILÍMETROS.....	96
FIGURA 48 - SISTEMA DE “HOME” MOTOR 2. MEDIDAS EM MILÍMETROS.....	97

FIGURA 49 - SUPORTE MOTOR 1. MEDIDAS EM MILÍMETROS.....	97
FIGURA 50 - EIXO MOTOR E PONTEIRO ONDE SERÁ COLOCADO O “JUMPER”. MEDIDAS EM MILÍMETROS.	97
FIGURA 51 - PINO DE CONEXÃO COM O EIXO VERTICAL. MEDIDAS EM MILÍMETROS.	98
FIGURA 52 - SUPORTE PARA MOTOR 2 , BARRA A E BARRA B. MEDIDAS EM MILÍMETROS.	98

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO ANGULAR E PASSOS DADOS PELO MOTOR PARA OS QUATRO POSSÍVEIS MODOS DE MOVIMENTO.....	51
GRÁFICO 2- GRÁFICO COM AS MEDIDAS DA RELAÇÃO ÂNGULO POR PASSO. PONTEIRO VINDO DO SENTIDO HORÁRIO E INDO PARA O SENTIDO HORÁRIO N= 14.	52
GRÁFICO 3 - GRÁFICO COM AS MEDIDAS DA RELAÇÃO ÂNGULO POR PASSO. PONTEIRO VINDO DO SENTIDO ANTI-HORÁRIO E INDO PARA O SENTIDO ANTI-HORÁRIO (N= 14).....	52
GRÁFICO 4 – GRÁFICO CONSTRUÍDO A PARTIR DAS MEDIDAS DE VERIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE RETORNO PARA O ZERO APRESENTADAS NA TABELA 4....	58
GRÁFICO 5 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO OLHO MECÂNICO SENTIDO HORIZONTAL (N=6).	71
GRÁFICO 6 - MOSTRA PONTOS DO DESLOCAMENTO ANGULAR EM FUNÇÃO DOS PASSOS PARA O MOTOR 3 MEDIDOS NO GONIÔMETRO E NO OLHO MECÂNICO.	72
GRÁFICO 7 - CURVA DE CALIBRAÇÃO OLHO MECÂNICO SENTIDO VERTICAL (N=10).....	73
GRÁFICO 8 – DESLOCAMENTO ANGULAR EM FUNÇÃO DOS PASSOS PARA O MOTOR 2 MEDIDOS NO GONIÔMETRO E NO OLHO MECÂNICO.....	74
GRÁFICO 9 - GRÁFICO MOSTRANDO O DESLOCAMENTO VERTICAL DO OLHO (VERMELHO) MEDIDO COM O OLHO MECÂNICO E PELA CÂMERA (PRETO).....	76
GRÁFICO 10 - GRÁFICO MOSTRANDO O DESLOCAMENTO DO OLHO HORIZONTAL (VERMELHO) MEDIDO COM O OLHO MECÂNICO E PELA CÂMERA (PRETO).....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- MEDIDAS DAS VARIAÇÕES ANGULARES EM FUNÇÃO DOS PASSOS DADOS PARA DIFERENTES VELOCIDADES. O VALOR DO DESVIO PADRÃO FOI INDICADO POR Δ E O DA INCERTEZA DA MÉDIA FOI INDICADO POR δn . TODOS OS VALORES EM GRAUS.	43
TABELA 2 - TABELA COM MEDIDAS FEITAS EM 3 DIAS DIFERENTES AFIM DE ANALISAR VARIAÇÃO DEPENDENTE DA VELOCIDADE E/OU DIAS DIFERENTES. MEDIDAS FEITAS EM GRAUS.	53
TABELA 3 - MEDIDA DE ESTABILIDADE DO SISTEMA EM RELAÇÃO AO TEMPO.....	54
TABELA 4- MEDIDAS PARA VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DA CÂMERA. O SINAL NEGATIVO INDICA SENTIDO CONTRÁRIO (N=22). A INCERTEZA ATRIBUÍDA FOI TOMADA COMO INCERTEZA ESTATÍSTICA DA VARIAÇÃO DE UMA SÉRIE DE MEDIDAS, INCERTEZA DO TIPO A.....	57
TABELA 5 - PARÂMETROS DA ESTRUTURA PARA MEDIDAS NA HORIZONTAL E NA VERTICAL. K É O VALOR DE TRANSLAÇÃO.	69
TABELA 6 - MEDIDAS DO DESLOCAMENTO ANGULAR, EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSOS, PARA O OLHO MECÂNICO SE MOVENDO NA HORIZONTAL.....	70
TABELA 7 – MÉDIA E INCERTEZA DAS MEDIDAS FEITAS PARA O DESLOCAMENTO ANGULAR DO OLHO MECÂNICO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSOS.	71
TABELA 8- MEDIDAS DO DESLOCAMENTO ANGULAR, EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSOS, PARA O OLHO MECÂNICO SE MOVENDO NA VERTICAL. MEDIDAS EM GRAUS.	72
TABELA 9- MÉDIA E INCERTEZA DAS MEDIDAS FEITAS PARA O DESLOCAMENTO ANGULAR DO OLHO MECÂNICO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSOS.	73
TABELA 10 - COMPARAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTOS REALIZADOS PELO SIMULADOR DE OLHO MECÂNICO E DESLOCAMENTOS DETECTADOS PELO SOFTWARE DE MONITORAMENTO.	76
TABELA 11- 1° E 2° MEDIDAS DA VARIAÇÃO ANGULAR E DA VELOCIDADE. MODELO 1 DO GONIÔMETRO.	91
TABELA 12- 3° E 4° MEDIDAS DA VARIAÇÃO ANGULAR E DA VELOCIDADE. MODELO 1 DO GONIÔMETRO.	91
TABELA 13- 5° MEDIDA DA VARIAÇÃO ANGULAR E DA VELOCIDADE. MODELO 1 DO GONIÔMETRO.	92
TABELA 14- MÉDIA DE PASSOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO, A PARTIR DE PASSOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.	93
TABELA 15- MÉDIA DE PASSOS NO SENTIDO HORÁRIO, A PARTIR DE PASSOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.....	93
TABELA 16 - MÉDIA DE PASSOS NO SENTIDO HORÁRIO, A PARTIR DE PASSOS NO SENTIDO HORÁRIO.....	94
TABELA 17- MÉDIA DE PASSOS NO SENTIDO HORÁRIO, A PARTIR DE PASSOS NO SENTIDO ANTI-HORÁRIO.....	94
TABELA 18 - MEDIDAS FEITAS PARA VERIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE RETORNO AO ZERO. VALORES SÃO DADOS EM GRAUS. N=22.	95
TABELA 19 – MEDIDA 1. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_0 E X_F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	99

TABELA 20- MEDIDA 1. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	99
TABELA 21 – MEDIDA 2. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	100
TABELA 22 - MEDIDA 2. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	100
TABELA 23 – MEDIDA 3. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	101
TABELA 24 - MEDIDA 3. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	101
TABELA 25 – MEDIDA 4. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	102
TABELA 26 - MEDIDA 4. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	102
TABELA 27 - MEDIDA 5. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	103
TABELA 28 - MEDIDA 6. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	103
TABELA 29 – MEDIDA 6. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA HORIZONTAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	104
TABELA 30 - MEDIDA 6. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.....	104
TABELA 31 - MEDIDA 1. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	105
TABELA 32 - MEDIDA 1 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	105
TABELA 33 - MEDIDA 2. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	106
TABELA 34- MEDIDA 2 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	106
TABELA 35- MEDIDA 3. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X_o E X_f MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	107
TABELA 36- MEDIDA 3 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C_f , $A-C_f$, θ_1 E $\Delta\theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	107

TABELA 37- MEDIDA 4. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	108
TABELA 38- MEDIDA 4 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	108
TABELA 39- MEDIDA 5. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	109
TABELA 40- MEDIDA 5 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	109
TABELA 41- MEDIDA 6. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	110
TABELA 42- MEDIDA 6 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	110
TABELA 43- MEDIDA 7. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	111
TABELA 44- MEDIDA 7 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	111
TABELA 45- MEDIDA 8. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	112
TABELA 46- MEDIDA 8 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	112
TABELA 47- MEDIDA 9. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	113
TABELA 48- MEDIDA 9 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	113
TABELA 49- MEDIDA 10. VALORES MEDIDOS PARA O MOVIMENTO DO OLHO MECÂNICO NA VERTICAL. X _O E X _F MEDIDOS UTILIZANDO A RÉGUA E B MEDIDO UTILIZANDO O AUTOCAD®.	114
TABELA 50- MEDIDA 10 VERTICAL. VALOR DA VARIAÇÃO ANGULAR E SEU ERRO PROPAGADO. VALOR DE C _F , A-C _F , Θ_1 E $\Delta\Theta$. BEM COMO SEUS RESPECTIVOS ERROS.	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MC - Melanoma de coróide

PTV - *Planning target volume* – Volume alvo planejado

LAFRAG - Laboratório de Física da Radiação Gama e X

RTE - Radioterapia exteriorotaxica

STL - *Standard Tessellation Language*

PLA - Poliacido láctico

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS	6
RESUMO.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE GRÁFICOS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
SUMÁRIO.....	17
1. INTRODUÇÃO	19
2. FUNDAMENTAÇÃO BÁSICA.....	21
2.1. MELANOMA DE COROIDE.....	22
2.1.1. FORMAS DE TRATAMENTOS	22
2.2. TRATAMENTO DE TELETERAPIA ESTEREOTÁXICA DE MELANOMA DE COROIDE USANDO MONITORAÇÃO OCULAR EM TEMPO REAL.	26
2.3. OCULOMOTRICIDADE.....	29
2.4. IMPRESSÃO 3D	29
2.5. MOTOR DE PASSO	30
2.5.1. FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO.....	31
2.5.2. SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO	31
2.5.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO 28BYJ-48 5V MODELO RIORAND	32
2.5.3. RASPBERRY PI 3 MODEL B.....	34
2.5.3.1. CONTROLADORES.....	35
2.5.3.1.1. FUNCIONAMENTO ULN2003	36
3. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE OLHO MECÂNICO.....	37
3.1. PROGRAMA PARA MOVIMENTAÇÃO DO MOTOR.....	37
3.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO UNIDIMENSIONAL.....	38
3.3. CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA RELAÇÃO ANGULAR ENTRE PASSOS DO MOTOR 28BYJ-48.....	40
3.4. MODELO UTILIZANDO DOIS SISTEMAS DE <i>HOME</i>	44
3.4.1.1. MEDIDAS PARA A RETA DE CALIBRAÇÃO PARA OS SENTIDOS HORÁRIO E ANTI-HORÁRIO.....	49

3.4.1.2.	PASSO ENTRE AS PLACAS EM DIAS DIFERENTES	53
3.4.1.2.1.	MEDIDAS DE ESTABILIDADE.....	53
3.5.	PROCEDIMENTO DE MOVIMENTAÇÃO UTILIZANDO RETORNO PARA O ZERO. 54	
3.5.1.	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE RETORNO PARA O ZERO 57	
3.6.	PROJETO DO OLHO MECÂNICO	58
3.6.1.	MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS.....	59
3.6.2.	MONTAGEM E CONSTRUÇÃO	60
3.6.2.1.	SUPORTE PARA O OLHO – EIXO VERTICAL.....	60
3.6.3.	PROGRAMA DE MOVIMENTAÇÃO DO OLHO MECÂNICO	64
3.6.4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.7.	VERIFICAÇÃO MOVIMENTAÇÃO DO OLHO MECÂNICO	65
3.7.1.	RESULTADOS	70
3.7.1.1.	EIXO HORIZONTAL	70
3.7.1.2.	EIXO VERTICAL	72
3.8.	AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO: SOFTWARE E CÂMERA 74	
3.8.1.	FORMA DE MEDIÇÃO E RESULTADOS	75
4.	CONCLUSÃO.....	79
5.	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE 1 – PROGRAMAS UTILIZADOS NA MOVIMENTAÇÃO DO MOTOR	85
	APÊNDICE 2 – MEDIDAS GONIÔMETRO MODELO 1	91
	APÊNDICE 3 – MEDIDAS PARA O MODELO CONTENDO DOIS “HOME”S”	93
	APÊNDICE 4 – MEDIDAS PARA VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DA CÂMERA	95
	APÊNDICE 5 – DESENHOS E MEDIDAS DAS PEÇAS IMPRESSAS.....	96
	APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS MEDIDAS DE MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DO OLHO MECÂNICO	99
o	Medidas eixo horizontal	99
o	Medidas eixo vertical.....	105

1. INTRODUÇÃO

O melanoma de coroide é um tipo de câncer que atinge de 6 a 7 pessoas por milhão de habitantes por ano nos Estados Unidos (Dunavoelgyi et al., 2010). Esse tumor tem grande probabilidade de se tornar metastático, aumentando o risco de óbito do paciente. O diagnóstico, por mais que seja simples, é dado de forma tardia no Brasil, diminuindo as chances de que técnicas menos danosas que a enucleação (retirada cirúrgica do olho doente), procedimento mais utilizado no país (Júnior, Neto, Lima, Vergini, & Souza, 2006), sejam aplicadas como tratamento (Caramelli CB, 1997).

A radioterapia estereotáxica utilizando feixe colimado de radiação pode ser aplicada para tratamento desses tumores, mesmo que estejam em estágio avançado e/ou em regiões inacessíveis para os outros métodos. Apesar de se utilizar máscaras termoplásticas para imobilização do crânio do paciente para aumentar a precisão da entrega da dose nesses tratamentos, o olho do paciente ainda pode se movimentar dentro da máscara. O tumor se move junto com o olho do paciente, gerando a necessidade de aumentar a área irradiada para garantir homogeneidade de dose no tumor. Dessa forma, a dose em tecidos saudáveis como o nervo ótico, que tem uma radiosensibilidade alta, também é aumentada, podendo ocasionar cegueira permanente no paciente. A utilização de um sistema de rastreamento do movimento do olho durante o tratamento pode diminuir os danos à tecidos saudáveis, aumentando as chances de se manter a visão do olho doente, inatingível por outras técnicas, permitindo mais qualidade de vida ao paciente (Dunavoelgyi et al., 2010).

Um hospital privado do Rio de Janeiro tem trabalhado com a aplicação do sistema de monitoração para o tratamento do melanoma de coroide (MC) através da utilização de uma câmera posicionada na frente do olho doente do paciente para analisar a movimentação do olho durante o tratamento através da reprodução da imagem em uma TV. Com esse procedimento foi possível observar deslocamentos do olho durante o tratamento e falta de reprodutibilidade de posicionamento do paciente entre as seções do tratamento que aumentam a chance de irradiação de regiões que deveriam ser protegidas durante a irradiação. Além disto, observando a imagem em tempo real, é possível interromper o feixe quando a movimentação ocular ultrapassar uma margem de segurança, definida pelo físico médico, evitando danos aos tecidos saudáveis e preservando a acuidade visual do paciente.

Uma das linhas de pesquisa do LAFRAG-UFRJ (Laboratório de Física da Radiação Gama e X - UFRJ) é voltada ao desenvolvimento de métodos para automatizar a captação da movimentação ocular através de programas de *tracking* e no desenvolvimento de um simulador de olho para realizar a dosimetria do tratamento e de sistemas não invasivos que permitam a fixação do olho do paciente. Dentro desse projeto, o aluno Felipe Marques desenvolveu um programa de *tracking* de olho capaz de obter, a partir dos vídeos feitos durante o tratamento de radioterapia, o deslocamento do olho do paciente com uma resolução de 0,1 mm. Com o software é possível obter informações sobre a movimentação ocular e automatizar o sistema de desligamento do feixe. No entanto, qualquer sistema que seja aplicado a tratamentos médicos deve ser testado, avaliado e calibrado.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema mecânico que tenha características anatômicas que permitam mimetizar a movimentação do olho humano durante o tratamento de melanoma de coróide a fim de testar e calibrar o sistema de rastreamento de olho desenvolvido no Laboratório de Física da Radiação Gama e X.

2. FUNDAMENTAÇÃO BÁSICA

Visão é a capacidade que um indivíduo tem de detectar uma faixa de comprimentos de onda eletromagnética e converter isso em informação, construindo assim um universo ao seu redor. Para o ser humano, o instrumento de detecção básico da visão é o olho (figura 1). Dentro deste instrumento ocorre a percepção dos fótons de luz visível e a transformação desses em informação que são enviadas ao cérebro através do nervo óptico.

Assim a formação da imagem passa por diferentes processos, tanto da transformação dessa informação na imagem quanto para a detecção. O olho humano é uma ferramenta extremamente complexa que utiliza diversos meios para a detecção desses fótons.

Os fótons refletidos de um determinado objeto entram em contato primeiramente com a córnea que atua juntamente com o cristalino, formando uma lente com função de projetar na retina a imagem do objeto. Antes da chegada à retina, o feixe passa pelo humor vítreo, cuja função é promover nutrientes para o cristalino bem como a de filtrar a luz infravermelha e ultravioleta que chega na mesma (Stolfi, 2008).

A retina é uma membrana que preenche internamente a parede do olho, ela é constituída de células nervosas (cones e bastonetes) interligadas que se distribuem no entorno da fóvea. Quando o feixe luminoso entra em contato com a retina, ele estimula os fotorreceptores e estes transformam a luz em impulsos nervosos que são enviados ao cérebro através do nervo óptico (Riordan-Eva, 2010).

A região mais posterior do olho, responsável pela proteção do mesmo, é a região da esclera. Ela é uma camada densa e branca, constituída em sua maior parte por colágeno e é delimitada posteriormente pelo nervo óptico (Riordan-Eva, 2010).

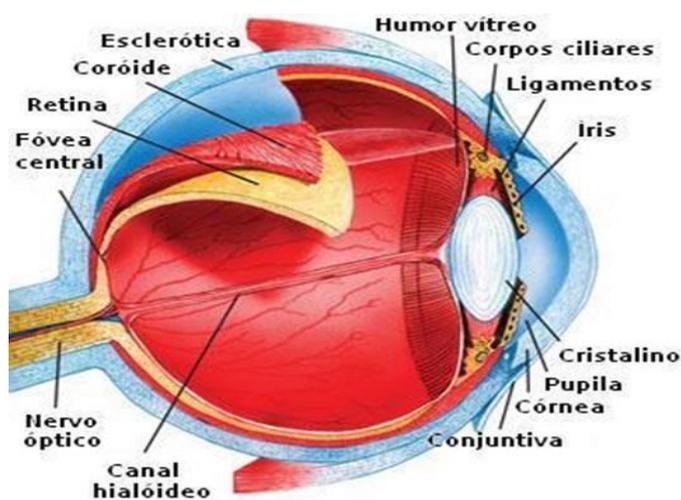


Figura 1- Desenho do Arranjo anômico do olho humano (<https://casadooculos.wordpress.com/2010/12/03/anatomia-do-olho-diversos>, acessado em 7/12/2018).

Entre a retina e a esclera se situa a região da coróide, mostrada na figura 1. Nela estão contidos vasos sanguíneos que são utilizados para nutrir o espaço da retina. Na coróide também estão os melanócitos, substâncias que produzem a melanina, responsável por absorver os raios

de luz difusos aumentado com isso a nitidez e o brilho da imagem projetada na retina (Gerard J. Tortora, 2017).

2.1. MELANOMA DE COROIDE

Melanomas são tumores malignos, originados nos melanócitos, células responsáveis pela produção de melanina (National Cancer Institute , 2017).

O melanoma de coroide é um câncer tipo melanoma que ocorre no globo ocular, na região da coroide, com grande probabilidade de se tornar metastático, o que aumenta muito o risco de morte do paciente (Cruz & Lopes, 2009). Ocorre mais frequentemente em pessoas na faixa de idade de sessenta anos de vida e é muito raro na primeira e na segunda década de vida. O diagnóstico do tumor pode ser realizado por exame oftalmoscópico ou por ultrassom. A procura pelo oftalmologista acontece normalmente por conta da diminuição da capacidade visual do doente (Júnior, Neto, Lima, Vergini, & Souza, 2006). Arcieri et al (2002) observaram a redução da visão como primeiro sintoma oftalmológico em até 66,5% dos casos de melanoma de coroide.

Os melanomas oculares, juntamente com os de estruturas anexas, correspondem a aproximadamente 5% de todos os melanomas, onde desses 85% têm origem no trato uveal (Cunha, Rodrigues, Almeida, Picanço, & Netto, 2009). O melanoma da úvea é uma neoplasia melanocítica com origem no tracto uveal. O melanoma de coroide corresponde de 68% a 91% dos melanomas ocorridos na úvea (Cruz & Lopes, 2009).

No Brasil, devido à desinformação e dificuldade de atendimento, o diagnóstico da lesão é realizado muitas vezes em fase avançada (Caramelli CB, 1997).

2.1.1. FORMAS DE TRATAMENTOS

Existem diversas formas de tratamento para o melanoma de coroide. A escolha de qual será utilizado cabe ao médico oncologista e é tomada em função do tamanho, da localização e da disponibilidade das diferentes técnicas de tratamento. Os tratamentos mais utilizados são enucleação, braquiterapia, teleterapia, coroidectomia transescleral (não realizada no Brasil) e termoterapia transpupilar (Cruz & Lopes, 2009).

Enucleação é a retirada do globo ocular. É o método mais conservador, mais barato comparado aos outros tipos de tratamento e mais simples para ser realizado já que não precisa, ao contrário de radioterapia, de uma estrutura específica para executar o procedimento.

No Brasil, a enucleação vem sendo a alternativa mais empregada para o tratamento do tumor. Isso acontece devido ao menor custo deste procedimento, à dificuldade de acesso a grandes centros com serviço de radioterapia e um diagnóstico mais tardio (Júnior, Neto, Lima, Vergini, & Souza, 2006). Dependendo do estágio em que o melanoma foi diagnosticado, essa forma de tratamento é escolhida também por diminuir a probabilidade de metástase da doença já que retira toda a região acometida.

- **Termoterapia**

A termoterapia transpupilar é um método novo e eficiente para tratamentos de melanomas da coroide posterior considerados pequenos (diâmetro basal ≤ 5 mm) e pigmentados (Cruz & Lopes, 2009). Este emprega um laser de diodo infravermelho para induzir a hipertermia no tecido tumoral (Chojniak, Guia, Uno, & Erwenne, 2001).

- **Tratamentos que utilizam radiação ionizante: braquiterapia e teleterapia**

Células tumorais são mais sensíveis aos efeitos da radiação (mais radiosensíveis) que as células dos tecidos saudáveis. Isso ocorre tanto por que células tumorais se multiplicam mais rápido que as células de tecido normal quanto por conta das mutações, que diminuem sua capacidade de autocorreção (Nouailhetas, 2017).

A radiação ionizante interage com o meio celular modificando os elementos intracelulares causando efeitos biológicos. Esses efeitos podem induzir a morte celular precocemente por conta de danos às estruturas celulares ou, tardiamente, por conta de lesões produzidas no DNA, fazendo com que a célula passe a ter dificuldade em dividir seu material genético entrando em apoptose após uma ou duas divisões subseqüente (Nouailhetas, 2017).

A braquiterapia é uma modalidade de tratamento da radioterapia que utiliza pequenas fontes radioativas seladas colocadas no tumor ou em uma região próxima deste (Rostelato, 2005). É uma técnica de tratamento empregada desde a década de 30.

Em 1986 foi mostrado que a taxa de mortalidade de pacientes com melanomas com profundidade entre 2,5 mm e 10 mm tratados com braquiterapia era semelhante aos tratados com a enucleação. Assim, para determinadas configurações de tratamento, a enucleação foi substituída pela braquiterapia na tentativa de preservar a acuidade visual e o globo ocular do paciente (Dias et al., 2017).

Existem efeitos colaterais relacionados ao uso desta técnica por conta da proximidade da radiação aos tecidos saudáveis. As principais complicações são a retinopatia, a catarata, o glaucoma neovascular e a maculopatia. Foi observada a ocorrência destes efeitos entre 9% a 27% dos pacientes após três anos do tratamento. Os principais fatores que influenciam na ocorrência desses efeitos são a altura do tumor, a sua classificação e a proximidade do tumor à fóvea e ao disco óptico (Dias et al., 2017).

No caso específico do melanoma de coroide, as fontes de radiação mais utilizadas são Iodo-125, Chumbo-103 ou Rutênio-106 (Finger, 2009). As fontes são acondicionadas em cilindros pequenos, chamados de sementes, que são posicionadas em um suporte e depois então adicionadas à placa (figura 2) que é implantada no olho do paciente, no caso do melanoma de coroide, via cirurgia (figura 3). A dose de radiação prescrita (energia depositada por unidade de massa) é calculada levando-se em conta a distância do tumor à placa (Dias et al., 2017).

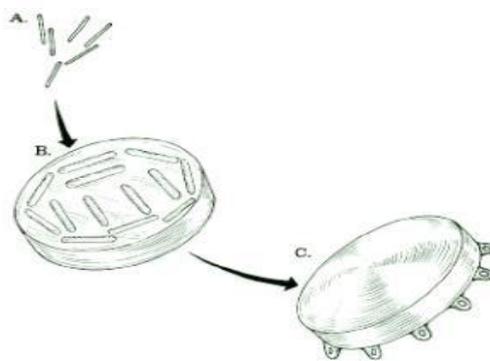


Figura 2 - Desenho esquemático de uma placa da braquiterapia de melanoma de coróide. (a) Isótopos radiotivos, (b) Região de colocação dos isótopos e (c) Placa que é cirurgicamente implantada no paciente. (Finger, 2009)

Para o cálculo da dose de radiação do Rutênio, por exemplo, são usadas tabelas fornecidas pelo fabricante para a determinação do tempo de exposição em função da dose que se espera no tecido acometido, não sendo necessário o uso de sistemas de planejamento computadorizados em alguns casos, diminuindo os custos (Dias et al, 2017).

Tumores localizados na parte posterior do olho não são aconselhados a serem tratados com braquiterapia. A proximidade como nervo óptico inviabiliza a colocação das placas contendo o radioisótopo (Cruz & Lopes, 2009), sendo indicado o tratamento por teleterapia. A teleterapia é a modalidade de tratamento utilizada para tumores maiores que 16 mm ou localizados na parte posterior do olho.

O tratamento de teleterapia consiste em direcionar um feixe colimado de radiação ionizante ao volume que se deseja tratar (PTV- *planning target volume*), volume que contém o tumor. No Brasil, só há tecnologia disponível para tratamentos com feixe de fótons ou elétrons.

O volume de tratamento é delimitado pelo médico oncologista, a partir de imagens adquiridas com raios-X ou com dispositivos de ressonância magnética. Essas imagens também fornecem referência para a localização espacial da região, permitindo que o físico médico planeje como será realizada a incidência dos feixes de radiação.

O teleterapia utiliza aceleradores lineares. O acelerador é um equipamento que contém tanto o gerador do feixe quanto a mesa para o posicionamento do paciente, além de outras partes importantes, como o colimador e os sistemas de monitoração do feixe (Morales, 2011)(figura 4). O paciente é posicionado de forma a reproduzir a posição de quando foram feitas as imagens, mantendo com isso as referências de localização do PTV.

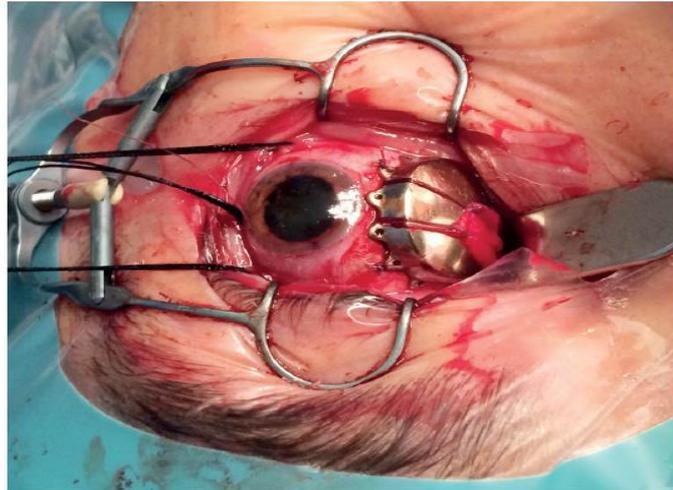


Figura 3 - Fotografia da placa contendo o radioisótopo colocada em contato com o olho do paciente (Coutinho et al., 2017)

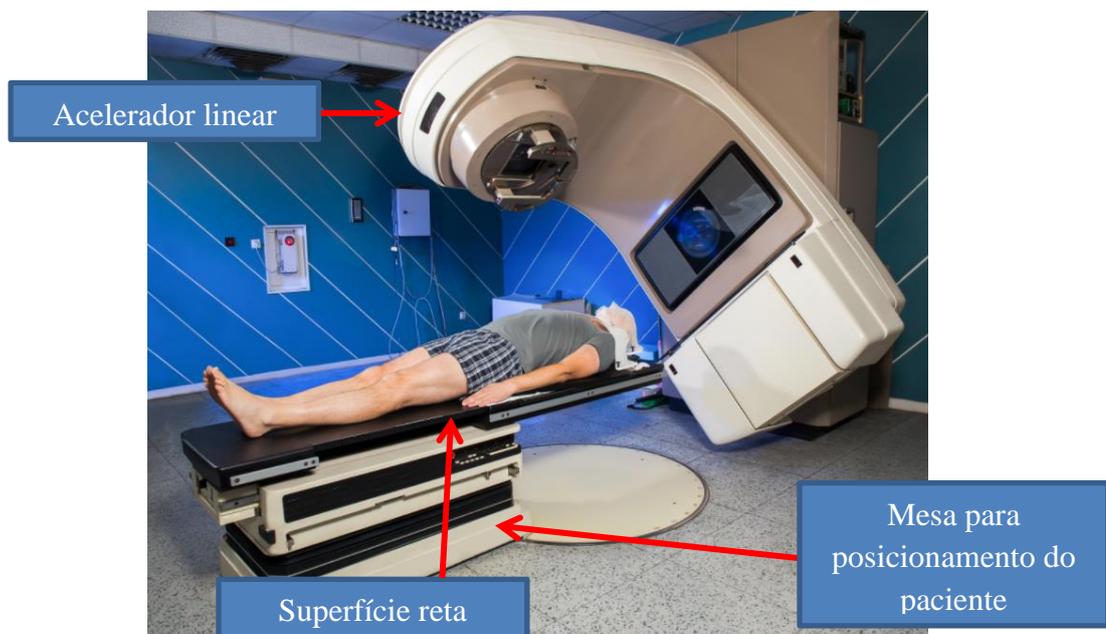


Figura 4 - Foto de um acelerador linear com a mesa para posicionamento do paciente (<https://www.cancer.org.br/fundacao-do-cancer-vai-dar-aulas-de-radioterapia>, acessado em 9/01/2018).

Com a finalidade de se aproveitar a capacidade de regeneração celular para que os tecidos saudáveis irradiados durante o tratamento sofram o menor dano possível, o tratamento de teleterapia é realizado em seções realizadas em diferentes dias. No caso do tratamento de MC, a literatura descreve a aplicação de uma dose na média de 60 Gy (unidade de dose de radiação) em 4 a 6 dias de tratamento (seções), dividindo a dose diária em aproximadamente 10 Gy por seção (Dunavoelgyi et al., 2011).

A região de ocorrência do MC é próxima de regiões importantes como a fóvea e o nervo óptico. Como o nervo óptico é um órgão muito radiosensível, esse fato gera a necessidade de uma alta precisão na entrega de dose de radiação em tratamentos de radioterapia na tentativa de preservação da visão do paciente. Dunavoelgyi et al. mostraram que a radioterapia estereotáxica, em conjunto com um sistema de monitoramento em tempo real, diminuem os danos aos tecidos saudáveis e por consequência os efeitos colaterais do tratamento, aumentando com isso a probabilidade de se conservar a acuidade visual do paciente.

2.2. TRATAMENTO DE TELETERAPIA ESTEREOTÁXICA DE MELANOMA DE COROIDE USANDO MONITORAÇÃO OCULAR EM TEMPO REAL.

Radioterapia extereotaxica (RTE) é uma modalidade terapêutica não invasiva que consiste em aplicar uma alta taxa de dose em uma única fração com grande conformação e em uma região precisamente localizada. A técnica utiliza múltiplos feixes direcionados ao alvo, gerando um elevado gradiente de dose para além dos limites da lesão, com o intuito de poupar a irradiação dos tecidos vizinhos. O fato de se aplicar uma alta taxa de dose permite reduzir significativamente as seções de tratamento, diminuindo com isso também a necessidade de reposicionamentos sucessivos do paciente, fato que pode aumentar a incerteza da entrega da dose à região que contém o tumor e a irradiação aos tecidos sadios (Mascarenhas et al, 2005).

Para que a localização da região a ser tratada seja bem determinada e reproduzível, a RTE é executada com o auxílio de dispositivos não invasivos de fixação, como a máscara termosensível (figura 5). A máscara é moldada de acordo com o formato da cabeça do paciente e é fixada à superfície reta utilizada na mesa de tratamento (figura 4). Essa superfície pode ser transportada e utilizada na tomografia computadorizada e na ressonância magnética. Desta forma, é possível reproduzir a localização do paciente na mesa de tratamento da mesma forma que foi posicionado na tomada de imagens e no planejamento do tratamento (Mascarenhas et al, 2005).

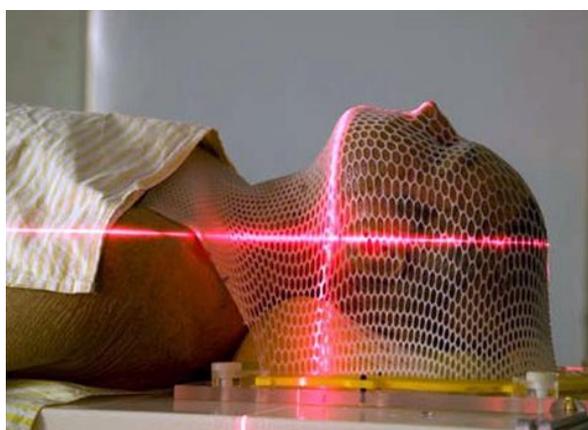


Figura 5- Paciente utilizando máscara de imobilização estereotáxica posicionado em mesa de tratamento. (<https://setorsaude.com.br/radioterapia-do-mae-de-deus-investe-em-mascaras-para-tratamento-de-cabeca-e-pescoco>, acessado em 8/02/2018)

Apesar da utilização da máscara de fixação cranial, que ainda pode permitir uma variação de posicionamento de 2 mm entre dias diferentes de tratamento (Horst Alheit, 2001), o olho do paciente ainda pode se movimentar com 6 graus de liberdade dentro da máscara. Essas circunstâncias somadas implicam em um aumento do volume necessário a ser tratado, que é formado agora pelo tecido tumoral mais a região, onde por conta da movimentação do olho, o tecido tumoral pode se encontrar. Desta forma os danos aos tecidos saudáveis são aumentados e, por consequência, a probabilidade de efeitos secundários do tratamento, como danos ao nervo óptico.

A fim de diminuir o PTV é possível utilizar um sistema não invasivo de fixação ocular na tentativa de diminuir a movimentação do olho. Dieckmann et al (2001) descrevem a utilização de um LED posicionado na frente do olho sadio do paciente. Esse LED serve como ponto de referência para que o paciente tente fixar o olhar durante o tratamento (figura 6). Complementar ao sistema de fixação foi utilizado também uma câmera fazendo imagens em tempo real do olho doente no intuito de permitir a determinação da posição do olho em cada instante.

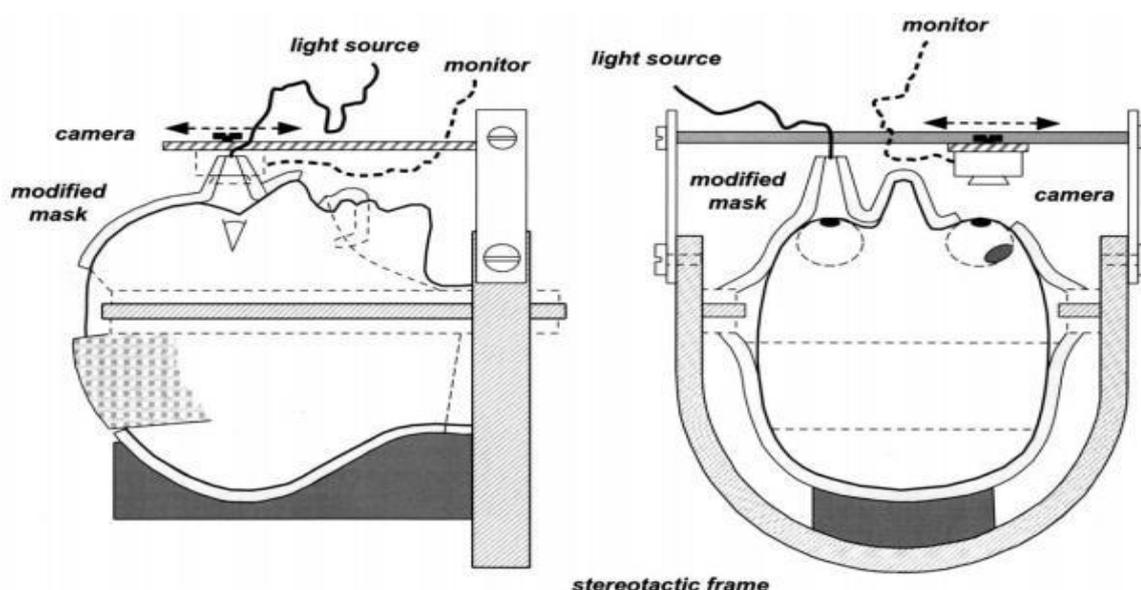


Figura 6 - Imagem mostra sistema não invasivo de fixação estereotáxica com monitoração ocular

O resultado deste procedimento pode ser observado na figura 7. O gráfico mostra a quantidade de frames em que o olho ficou fora da posição de fixação, determinado a partir do centro da pupila. Dieckmann et al 2011 também descrevem a utilização de um monitor ligado a câmera onde o técnico observava o vídeo do olho e, a partir de marcações no próprio monitor, poderia desligar o feixe quando o olho ultrapassar um determinado deslocamento na tentativa de evitar irradiação de tecidos não tumorais.

Dunavoelgyi et al (2010) mostrou que depois de 7 anos usando essa metodologia de tratamento (figura 8), 80% dos 92 pacientes que foram classificados como incapazes de serem tratados com braquiterapia tiveram sua visão mantida, promovendo assim a qualidade de vida

desses pacientes Em adicional, Dieckmann et al (2011) mostraram que quase a totalidade da movimentação do olho durante o tratamento, 99,9% da movimentação analisada, está em uma faixa de 1,5mm de deslocamento em relação à posição de tratamento.

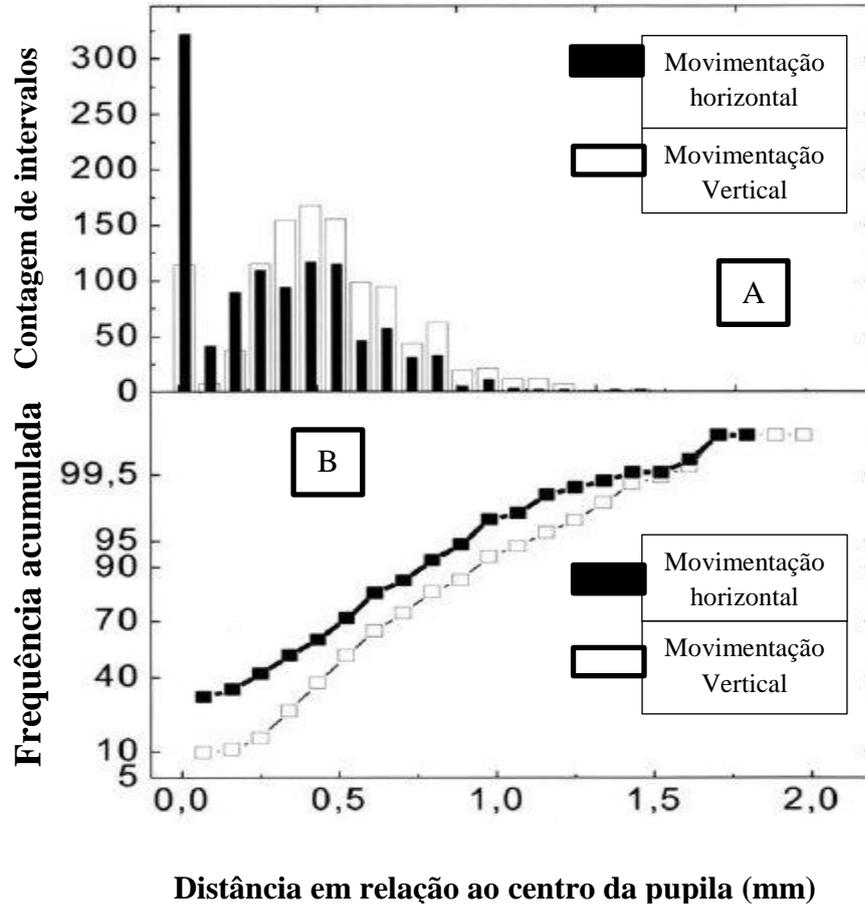


Figura 7 - Análise do movimento do olho durante teleterapia extereotáxica de melanoma de úvea de 23 pacientes. A distância é medida baseado em 1162 frames retirados dos vídeos gravados. (A) Distribuição acumulativa (B) Frequência acumulada (Dieckmann et al., 2011).

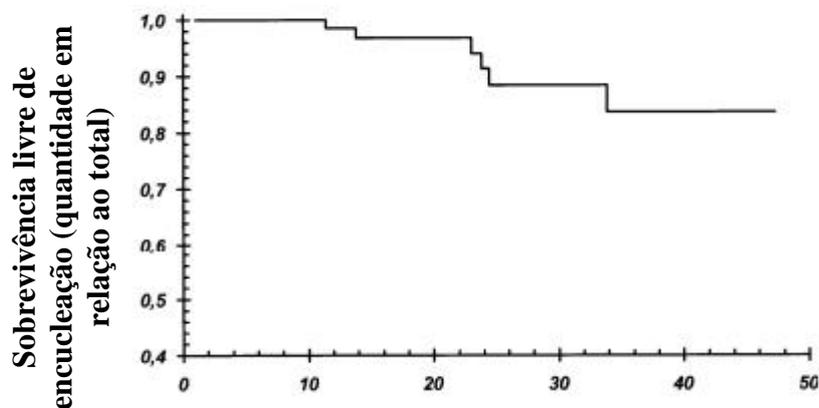


Figura 8 - Gráfico mostrando sobrevivência de pacientes livre de enucleação nos primeiros 50 meses pós-tratamento (Dunavoelgyi et al., 2011).

2.3. OCULOMOTRICIDADE

Uma das características relevantes para um sistema mecânico que tenha a finalidade de reproduzir a movimentação do olho de maneira aproximada é a oculomotricidade. O sistema oculomotor utiliza os conjuntos de músculos oculares para promover a focalização na retina do objeto que se deseja observar (Bicas, 2003).

O sistema oculomotor possui distintos tipos de movimentação. Quando a cabeça está parada e o objeto se move lentamente, tal como acontece durante o tratamento de MC, o regime de movimentação executado pelo olho é o de perseguição suave. Nesse regime de movimentação a velocidade máxima de rotação ocular é de $30^{\circ}/s$ (Robinson, Gordon, & Gordon, 1986).

O olho é movido pelos músculos, divididos em pares, e se movimentam antagonicamente permitindo movimentação em três possíveis eixos (figura 9).

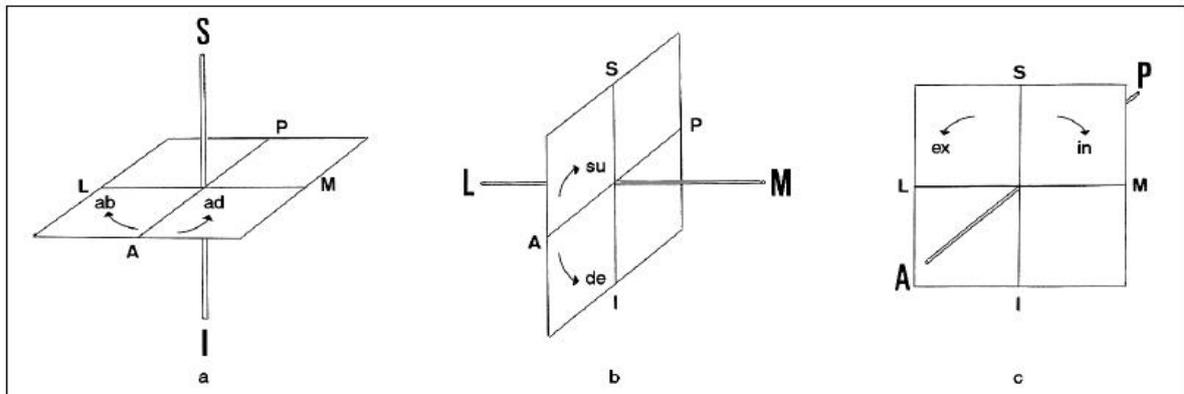


Figura 9-Sistema referencial para as rotações oculares (a) plano horizontal onde as rotações estão definidas no entorno do eixo vertical (SI); (b) Plano sagital onde estão determinadas as rotações verticais em torno do eixo transversal (LM); (c) Plano frontal onde as rotações de torção acontecem em torno do eixo longitudinal (AP) (Bicas, 2003).

Utilizando a referência desses eixos e planos são definidas as movimentações monoculares. Estas podem ser divididas em movimentos de rotação e translação. Movimentos oculares de translação são geralmente de pequena magnitude (milímetros) e relacionadas às patologias como neoplasias, fraturas da órbita, etc. (Bicas, 2003). Já os movimentos rotacionais são definidos como horizontais, verticais e torcionais.

2.4. IMPRESSÃO 3D

Impressoras 3D são equipamentos capazes de produzir sólidos tridimensionais. Uma das técnicas de produção é a chamada manufatura aditiva. Nesta técnica, camada por camada é depositada, gradualmente, umas sobre as outras, até formar o objeto. (Regadas, 2017).

A vantagem da utilização de impressão 3D associada à produção de um modelo mecânico é o ganho de tempo e a praticidade, já que impressão 3D dispensa o conhecimento de processos

de usinagem, simplificando o processo em imprimir o desenho projetado pelo usuário em um software do tipo CAD.

A impressora utilizada neste trabalho utiliza um bico extrusor (figura 10) que deposita o material termicamente aquecido camada por camada sobre uma superfície, construindo o objeto.

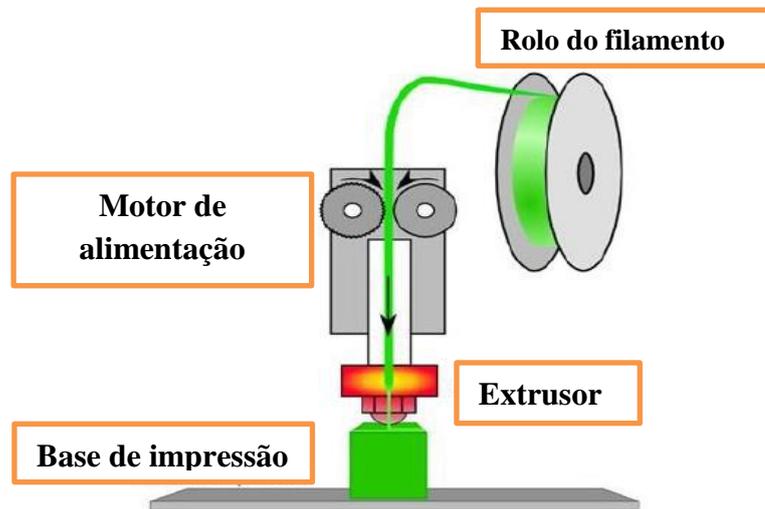


Figura 10- Processo de construção utilizando extrusão de um material plástico. O extrusor e a base de impressão têm a capacidade de se movimentar, permitindo com isso a construção de variados tipos de superfícies. (<http://proyectos3d.com.ar/2/que-es-la-impresion-3d/>, acessado em 8/02/2017, figura modificada e traduzida pelo autor).

A criação de sólidos por processos de impressão 3D começa pela construção do objeto de interesse em softwares CAD, como o *AutoCAD* ou *SolidWorks* (Regadas, 2017). Uma vez construído, o projeto precisa ser convertido para o formato STL (*Standard Tessellation Language*). Este formato descreve a superfície do objeto através dos vértices que compõem cada uma das faces, excluindo parâmetros como cor e textura. Desta forma o sólido pode ser processado por um software de fatiamento, que divide o objeto em camadas e projeta o caminho que o bico do extrusor deve efetuar para depositar o material em cada camada. Após o fatiamento é gerado um arquivo de comandos que é utilizado pelo software da máquina para construção da peça. Informações como velocidade de deposição, temperatura, posicionamento entre outras rotinas estão contidas nesses códigos (Azevedo, 2013).

2.5. MOTOR DE PASSO

Como observado por Dunavoelgyi et al (2011), 99.9% da movimentação do olho durante o tratamento está em uma faixa de 1,5 mm. Isso corresponde, aproximadamente, a uma rotação ocular de 7° , considerando o globo ocular como uma esfera de 24,00 mm de diâmetro. Para ser possível executar movimentos oculares que possam avaliar uma translação de 0,1 mm do centro da íris em uma projeção em um plano tangente a córnea e paralelo ao plano da câmera é necessário um dispositivo que possa realizar movimentações na ordem de $0,48^\circ$.

O olho se movimenta várias vezes durante o tratamento. Para representar esse movimento é necessário utilizar motores elétricos que podem ser mais facilmente controlados utilizando sistemas computacionais.

Existem diversos tipos de motores, entre eles os motores de passo. Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas (Brites, 2008). O eixo do motor se movimenta em pequenos deslocamentos angulares chamados de “passos”. Esses passos são executados a partir de pulsos elétricos aplicados de uma maneira específica, dependendo de como se deseja o movimento. Motores de passo possuem uma alta precisão no controle de movimentos.

2.5.1. FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO

Existem diversos tipos de motores de passo. Eles podem ser divididos quanto o seu funcionamento ou quanto ao tipo de alimentação, nesse caso unipolar ou bipolar.

Quanto ao funcionamento existem motores de relutância variável, ímã permanente e modelos híbridos. Neste trabalho será discutido somente o funcionamento de um motor de ímã permanente (figura 11). Esse tipo de motor tem um ímã permanente em um eixo liso, gerando uma mecânica mais simples e barata (Feis Fnesp, 2013). Como o eixo interno do motor (rotor) é feito de um ímã permanente, ao se polarizar as bobinas, o eixo irá se alinhar com estas executando o movimento para a direção desejada.

Desta forma é fácil analisar que a precisão do motor está relacionada à distância de cada passo. Assim ao se colocar mais bobinas, a princípio, maior será sua resolução. Outra possibilidade para aumentar a resolução é a utilização de engrenagens tirando a dependência de inúmeras bobinas.

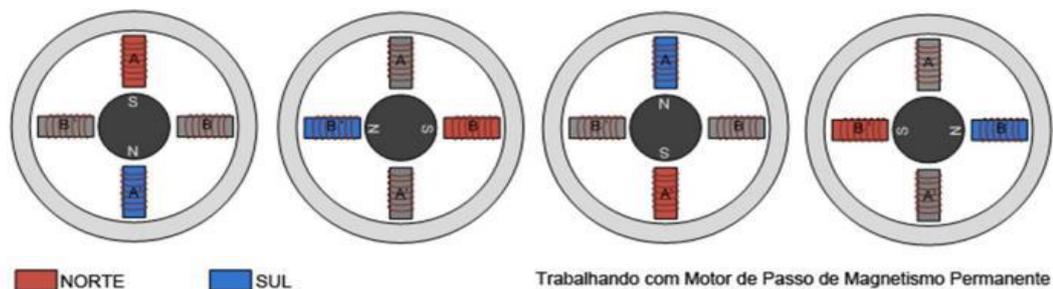


Figura 11 - Visão esquemática funcionamento do motor de ímã permanente (Feis Fnesp, 2013).

2.5.2. SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO

A energização de cada bobina produz um pequeno deslocamento no rotor. Este deslocamento ocorre no sentido de alinhar o ímã permanente ao campo magnético gerado na bobina. Desta maneira, ligando as bobinas é possível fazer movimentos. Contudo, para girar o eixo é

necessário que essas sejam energizadas em uma sequência específica, gerando a necessidade de um sistema de controle. Os passos do motor precisam seguir uma sequência lógica de forma que determinadas bobinas são ligadas enquanto outras ficam desligadas.

Os passos podem ser dados de maneira contínua ou discreta. A maneira discreta é a forma mais simples e menos dependente de erros de construção. Ela pode ser dividida em *wave* de passo inteiro ou de meio passo, onde a movimentação de meio passo possui maior resolução.

- **Meio passo**

É um método com maior precisão já que aciona as bobinas de forma a descrever o menor deslocamento angular possível, possuindo, por conta disto, o dobro da resolução em relação aos outros métodos de passo (figura 12).

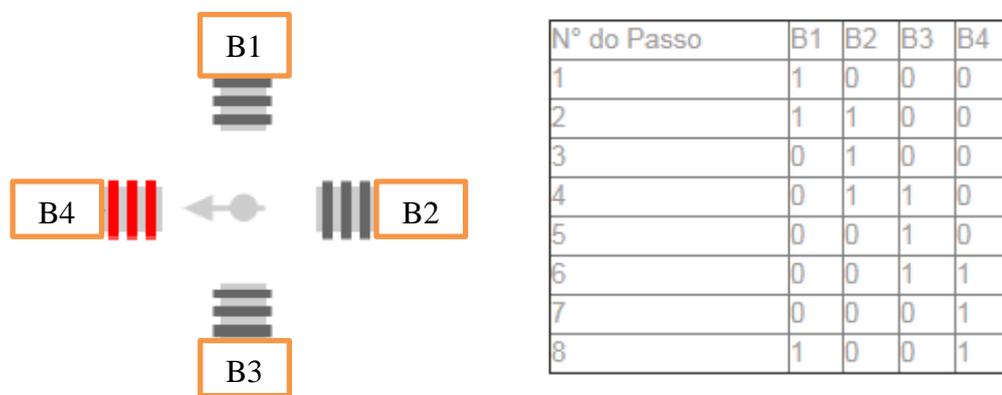


Figura 12 - Figura esquemática sobre o modo de funcionamento de um meio passo (Meca Web, 2008).

2.5.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO 28BYJ-48 5V MODELO RIORAND

Neste trabalho o motor de passo utilizado foi o 28BYJ-48 5V, modelo RioRand, produzido pela ROHS (figura 13). Este modelo de motor é muito utilizado no mundo para construção de prototipagem e projetos de robótica (impressoras 3D) por conta da sua precisão e do seu custo reduzido, cerca de R\$ 10,00 no Brasil. O motor de passo 28BYJ-48 possui um rotor tipo ímã permanente dentro de um corpo de plástico (figura 14).



Figura 13 - Motor de passo 28BYJ-48, modelo RioRand, conectado a placa controladora com

o driver ULN2003 (<https://www.arduinoecia.com.br/2014/04/controlando-motor-de-passo-28byj-48.html>, acessado em 12/12/2017).



Figura 14 - Rotor do motor de passo 28BYJ-48 5V, foto mostrando a distribuição dos ímãs ao redor do eixo (Stateham, 2015).

A carcaça inferior (figura 15D) possui oito dentes apontados para cima e uma haste lisa de metal no seu centro, por onde o rotor irá deslizar. Quando o motor está montado, as bobinas ficam fixadas diretamente sobre os dentes da carcaça (figura 15D). O motor contém quatro bobinas enroladas, duas no espaço inferior e duas no espaço superior, no suporte de plástico. Sendo intercaladas com essas bobinas, três placas de metal, cada uma com oito dentes, do mesmo tamanho que os dentes da carcaça.

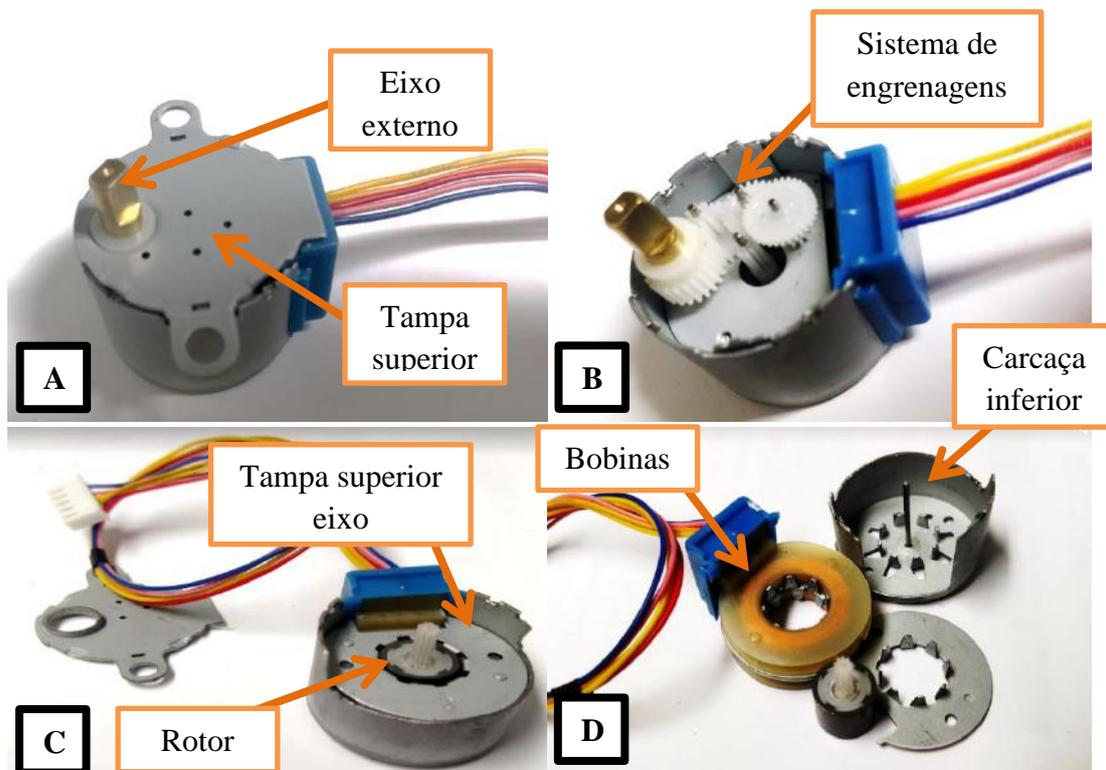


Figura 15 - Etapas para desmontagem do motor. (A) motor montado; (B) Motor sem a tampa superior externa, visão das engrenagens; (C) motor sem engrenagens. (D) Motor da figura C aberto, visão das quatro superfícies dentadas.

Quando o motor está montado, os quatro conjuntos de dentes formam um círculo, com o mesmo raio do rotor, onde o centro de cada um dos 32 dentes fica com um afastamento de $11,25^\circ$ em relação ao centro do círculo. O rotor fica no centro deste círculo cercado pelas bobinas (figura 15C).

O motor de passo de ímã permanente se movimenta pelo alinhamento do seu rotor em relação ao campo magnético aplicado. Desta forma, o motor modelo 28BYJ-48 5V funciona utilizando as bobinas para gerar um campo magnético interno ao motor, magnetizando uma placa específica. Uma vez a placa magnetizada, o rotor irá ser alinhado com ela. Em um segundo momento, outra placa de uma bobina localizada em outra região, é magnetizada fazendo o motor se alinhar em outra posição.

Desta forma de acordo com o *datasheet* disponibilizado pelo fornecedor (Datasheet 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor), as bobinas superiores correspondem aos fios de cor rosa e laranja e as bobinas inferiores aos fios de cor azul e amarelo. O fio de cor vermelha é o fio de corrente e todos os outros são ligados ao *ground*. Assim, nesta primeira etapa, o motor possui uma resolução de $5,625^\circ$, utilizando o modelo de movimentação de meio-passo, que corresponde a 360° divididos por 32 passos (Wideman, 2016).

Como pode ser visto com o motor desmontado (figura 16), o mesmo possui uma caixa de engrenagens com a característica de dividir por 64 cada passo dado pelo rotor, levando a resolução do motor para aproximadamente $0,087^\circ$ ($5,625^\circ$ dividido por 64 passos), o que está de acordo com o informado pelo fornecedor (Datasheet 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor).

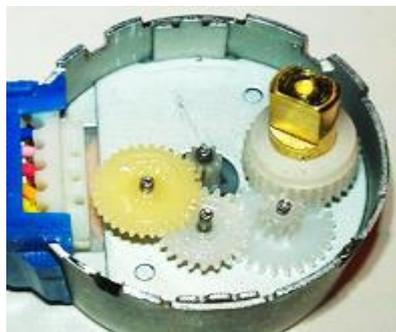


Figura 16- Sistema de engrenagens do motor de passo 28BYJ-48. Esse sistema de engrenagens tem uma relação de 1 para 64 passos, aproximadamente (Wideman, 2016).

2.5.3. RASPBERRY PI 3 MODEL B

O Raspberry Pi é uma série de pequenos computadores que atuam juntos em uma placa (figura 17), desenvolvida para promover o ensino de informática básica. Sua aplicação extrapolou a pretensão inicial, sendo muito utilizado para construção de dispositivos robóticos (Cellan-Jones, 2011).

Devido a seu pequeno tamanho e consumo reduzido de energia, acompanhado a uma grande capacidade de processamento e uma enorme facilidade de utilização, o Raspberry Pi é uma excelente opção para ser utilizado no controle e automação de sistemas.

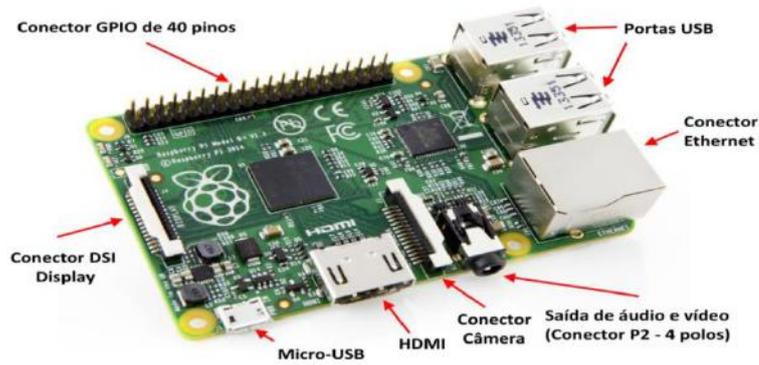


Figura 17- Foto do Raspberry Pi 3 Model B (Srmourasilva, 2017).

A ideia de funcionamento da placa para automação está na utilização de uma linguagem de programação (*Python*®, *C*, *Matlab*® e etc.) a fim de controlar as diversas saídas lógicas, as chamadas GPIO. GPIO (General Purpose Input/Output) é o termo utilizado para controle de pinos elétricos, que possuem funcionalidades gerais de entrada e saída e não possuem atribuições dedicadas. Estes pinos podem ser configurados como estado lógico alto - 1 ou baixo - 0. Desta forma o usuário pode, utilizando as diretivas no programa, modular esses sinais (frequência, intensidade) para controlar dispositivos acoplados às saídas lógicas.

2.5.3.1. CONTROLADORES

Como discutido anteriormente, existe a necessidade de se ligar bobinas específicas do motor. A fim de utilizar o Raspberry para o controle de um motor de passo é necessário o uso de uma controladora (figura 13 e figura 18). Controladoras são dispositivos utilizados para modificar a corrente de acordo com um sinal enviado a elas. Assim, elas permitem acionar as bobinas na sequência desejada.

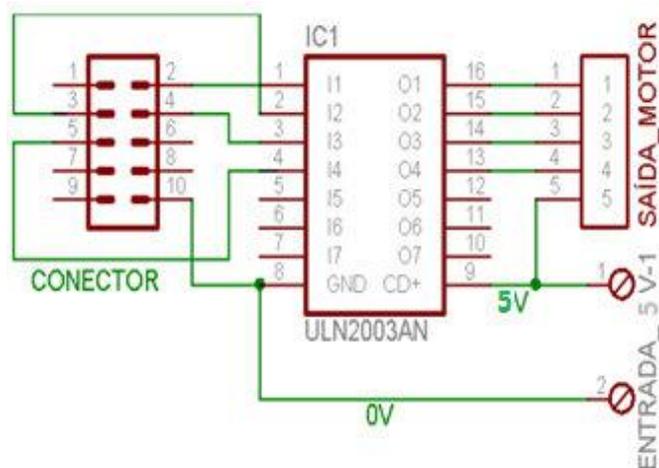


Figura 18 - Esquema de funcionamento de uma placa controladora ULN2003 (Patsko, 2006).

2.5.3.1.1. FUNCIONAMENTO ULN2003

O Raspberry possui saídas de tensão contínua e saídas lógicas. A controladora é ligada tanto à tensão contínua (figura 18 como ENTRADA 5V-1) como às saídas lógicas (figura 18 como CONECTOR).

Com o programa é possível energizar entradas do transistor ULN2003 usando as saídas lógicas do Raspberry. Ao se fazer isso, o transistor “chaveia” as respectivas saídas do transistor com a tensão de entrada, energizando assim as bobinas correspondentes às enviadas pelo programa. Desta forma então é possível enviar uma sequência específica, movendo assim o motor de passo utilizando o Raspberry Pi.

3. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE OLHO MECÂNICO

Para facilitar o entendimento do trabalho, as seções materiais e métodos, resultados e discussão foram agrupadas em blocos, em ordem cronológica, conforme o trabalho foi desenvolvido. Serão apresentados os modelos de olho desenvolvidos e os problemas apresentados por cada um deles que geraram a necessidade de aprimoramento dos projetos.

3.1. PROGRAMA PARA MOVIMENTAÇÃO DO MOTOR

O primeiro modelo de olho desenvolvido utilizou a movimentação do motor de passo 28BYJ-48 e o Raspberry Pi 3 Model B para gerar a tensão de alimentação e enviar informações para a placa controladora a partir das saídas lógicas.

O motor foi conectado à placa controladora e esta às portas GPIO do Raspberry 3 Pi Model B (figura 19). O controle da movimentação foi executado por um programa em linguagem *Python*® executado no dispositivo. O primeiro programa teve por finalidade controlar o movimento do eixo em um sentido e em uma determinada quantidade de passos, estabelecidos pelo usuário. Segue no apêndice 1 o código usado para movimentar o motor.

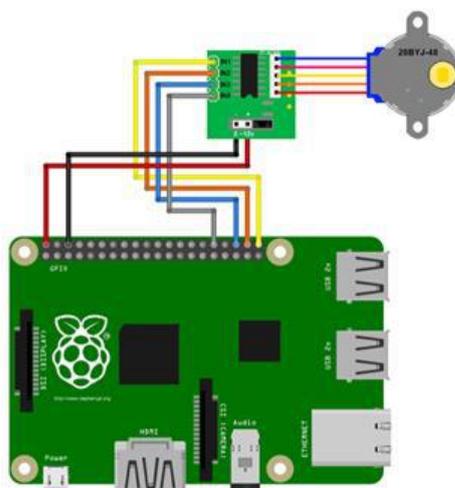


Figura 19- Arranjo utilizado no modelo 1. Motor conectado à placa controladora, com chip ULN2003, e esta conectada a um Raspberry Pi 3 Model B (www.arduinoocia.com.br/2015/05/ligar-motor-de-passo-28byj-48-raspberry-pi-2.html, acessado em 18/12/2017).

Um passo é dado quando um pulso de tensão é enviado ao motor. Se a velocidade com que o pulso é enviado for menor que o tempo que o eixo leva para se alinhar aos dentes magnetizados, o movimento ocorrerá de forma disforme ou não ocorrerá. Sendo assim, no programa, no final de cada passo, existe um comando de espera: *time.sleep(1/float(velocidade_x))* – onde quanto maior for a variável “velocidade” maior será a velocidade de rotação do motor.

Uma superfície plástica foi colocada junto ao eixo externo para facilitar a observação do movimento.

O motor se movimentou de forma proporcional à quantidade de passos estipulada pelo usuário, nos sentidos horário e anti-horário, efetuando rotações completas para quantidades de passos maiores que 4100. O programa foi rodado com o comando de espera variando de 1 até

0,001 segundos (variável “velocidade” variando de 1 a 1000). A movimentação aconteceu de maneira uniforme para valores de espera de até 0,00125 segundos. Para tempos de espera menores que 0,0011 segundos (variável “velocidade” igual a 900) não houve movimentação.

Um tempo de espera entre passos de 0,00125 segundos corresponde a 800 passos por segundo. De acordo com o resultado obtido e utilizando $0,087^\circ$ por passo (referência dada pelo fornecedor do motor), a velocidade de rotação máxima foi calculada como $70^\circ/s$. Essa velocidade é suficiente para reproduzir a velocidade do olho durante o movimento suave, que é de no máximo $30^\circ/s$.

Para o motor poder ser utilizado na calibração do programa de *tracking* não basta somente se movimentar, é necessária uma movimentação precisa e reproduzível.

3.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO UNIDIMENSIONAL

Para a construção de um sistema capaz de calibrar o sistema de *tracking* utilizando impressão 3D foi necessário, inicialmente, construir um modelo piloto com o intuito de se entender melhor as características da impressora e as particularidades da movimentação de uma estrutura 3D.

A impressora utilizada foi a *cube 3D 3ª geração*. O primeiro modelo de olho impresso, mostrado na figura 20, foi uma modificação do modelo criado pelo usuário Tavi Cardiff do site *Thingiverse* (<https://www.thingiverse.com/thing:319978>). O arquivo do projeto foi baixado no formato STL e enviado para impressão. O material utilizado na impressão foi o PLA por ser um material leve e de fácil acesso. O projeto original previa dois servos-motores com dimensões diferentes do motor utilizado neste trabalho. Desta forma foi necessário cortar o material e utilizar cola para aderir o motor na superfície da estrutura.

O modelo se movimentou utilizando o motor de passo 28BYJ-48 5V, modelo Riorand. O programa em Python (apêndice 1) teve um adicional ao programa anterior. Ao invés de esperar pela informação do usuário, esse programa faz um deslocamento de uma lista pré-determinada de passos (exemplo: 10 no sentido horário, 20 no sentido anti-horário e 10 no sentido horário). Vaselina foi utilizada para diminuir o atrito entre peças.



Figura 20- Modelo unidimensional do olho impresso nesse trabalho.

O olho do modelo unidimensional é uma semiesfera de 3,5 cm de raio. Com relação às partes retangulares do desenho, a impressora se comportou de forma satisfatória. Já, com relação às peças circulares (pálpebras e olho), foram observadas dificuldades. O eixo usado para movimentação do olho não ficou cilíndrico, necessitando ser lixado, e a pálpebra (figura 21) apresentou problemas de construção. Lixar as peças não removeu todas as imperfeições. Essas falhas, principalmente no eixo de rotação, contribuíram para uma movimentação não uniforme do olho. O movimento horizontal era acompanhado por pequenos movimentos verticais (“saltos”). Observou-se também, que o motor se movia e aos poucos ele ia ganhando preferência para estar na região próxima do olho, impossibilitando a movimentação depois de alguns passos por conta de limitações geométricas da peça.



Figura 21- Vista superior do modelo unidimensional, referenciando o problema de impressão.

Para impressão de círculos, usados na construção de cilindros (eixo do motor), a impressora inicia com o extrusor em um ponto inicial (figura 22A) depositando material. Ao percorrer uma volta depositando o material, o extrusor chega novamente no ponto inicial (figura 22D). Nesta etapa, a impressora muda de altura e faz o mesmo círculo na direção contrária até chegar ao ponto inicial novamente, continuando o processo até a altura final. O problema deste método é o acúmulo de material no ponto inicial, que deforma o cilindro construído, fazendo, por exemplo no caso do olho, que ele não faça somente rotações, mas também movimentos desconexos com o que se desejaria.

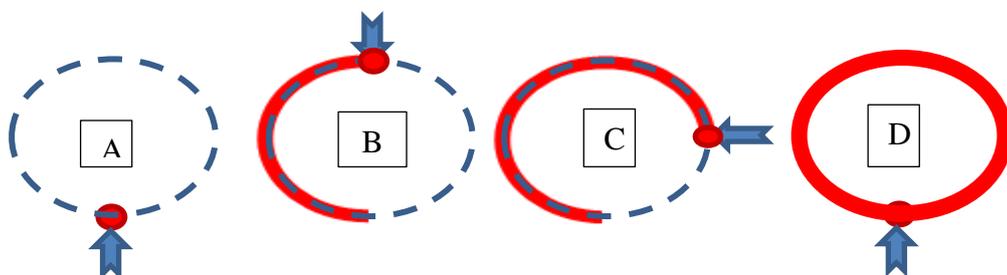


Figura 22 - Desenho esquemático da deposição de PLA pela impressora 3D a fim de construir um círculo. A seta indica a ponta do extrusor e a área vermelha o que foi ou está sendo depositado.

As imperfeições das peças podem produzir atrito e desalinhamento de forma não uniforme. Assim a utilização de rolamentos é justificada, já que o mesmo diminui o atrito além de melhorar a qualidade do alinhamento entre as peças.

O movimento do motor nos sentidos horário e anti-horário parecia ter diferentes deslocamentos angulares para o mesmo número de passos. Desta forma foi observada, novamente, a necessidade de se medir a relação entre variação angular e passos movimentados pelo motor.

3.3. CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA MEDIÇÃO DA RELAÇÃO ANGULAR ENTRE PASSOS DO MOTOR 28BYJ-48

Com objetivo de se medir as características do motor de passo utilizado, um goniômetro foi construído com o auxílio de uma superfície sólida. As peças foram produzidas pela impressora 3D e uma referência angular foi impressa a partir de uma imagem de referência de um círculo graduado (full-circle protractor modelo k23511799, figura 23). O círculo contém diversas marcações, variando de 5° por divisão (primeira marcação) até 0,25° por divisão (última marcação). A imagem foi ampliada e impressa em uma folha de papel A3 e foi colada sobre a estrutura.

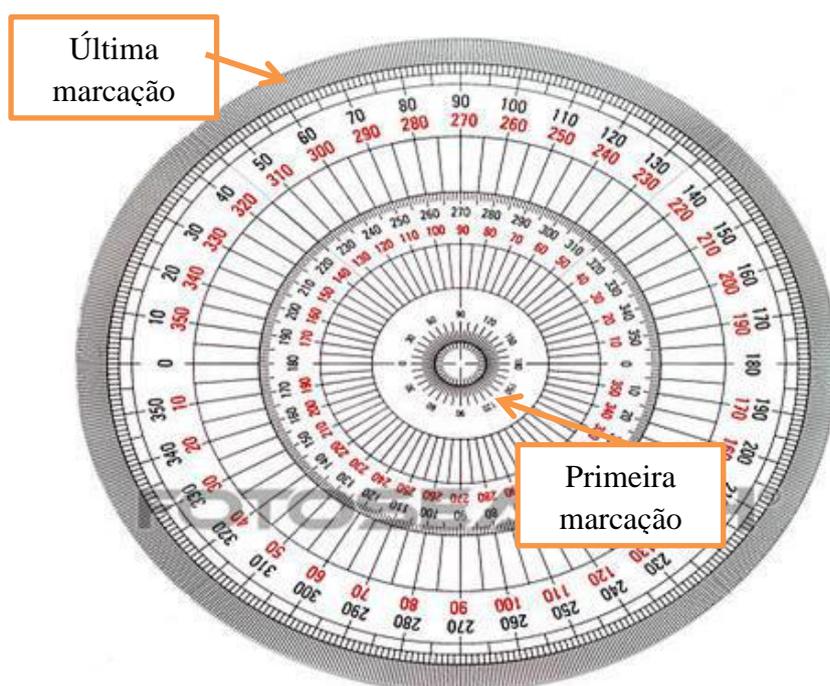


Figura 23- Imagem da marcação graduada utilizada para medir ângulos. Círculo transferidor k23511799. A terceira linha foi utilizada para fazer as medições. Resolução 0,25° que corresponde ao meio entre duas marcações (<http://www.fotosearch.com/csp145/k23511799/>, acessado em 10/08/2017).

Na segunda etapa foi criada e posicionada uma estrutura onde foram acoplados o motor e o ponteiro (figura 24). O ponteiro foi utilizado para indicar a angulação a partir da rotação do eixo externo do motor. Este contém 12,0 cm e foi impresso utilizando a impressora 3D. No final da montagem, ele foi conectado ao motor através de um eixo estendido.

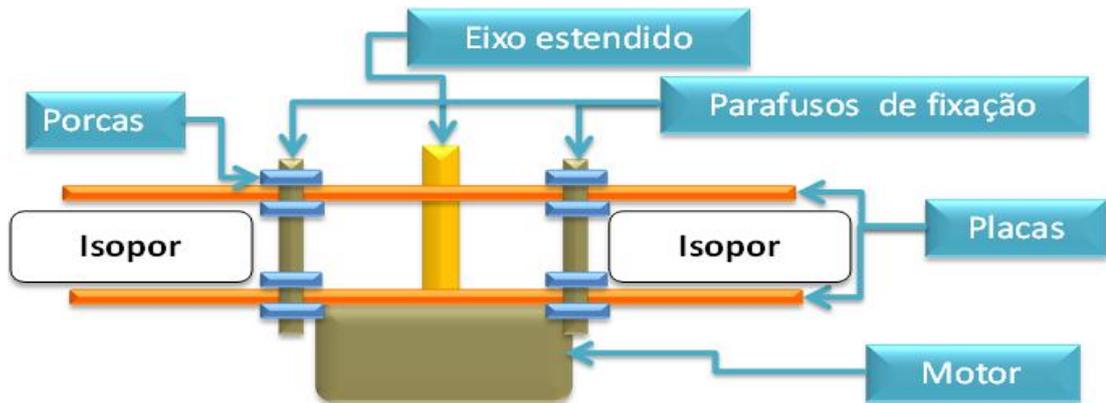


Figura 24- Desenho esquemático do método de fixação do motor na placa de isopor utilizado na montagem do goniômetro.

O motor foi fixado em uma estrutura de isopor (figura 24). Na placa colocada na região abaixo do isopor existe um rolamento esférico de 6 mm de diâmetro onde o motor foi fixado, como indicado na figura 24, de forma a ter o seu eixo externo alinhado com o centro do rolamento (figura 25C). A fixação ocorreu através de dois parafusos utilizando os furos da carcaça do motor.

Na placa superior também foi colocado um rolamento no centro, de modo que no final da montagem os dois rolamentos ficassem alinhados. O rolamento da placa superior tem os mesmos 6 mm de diâmetro interno dos parafusos (figura 25D).

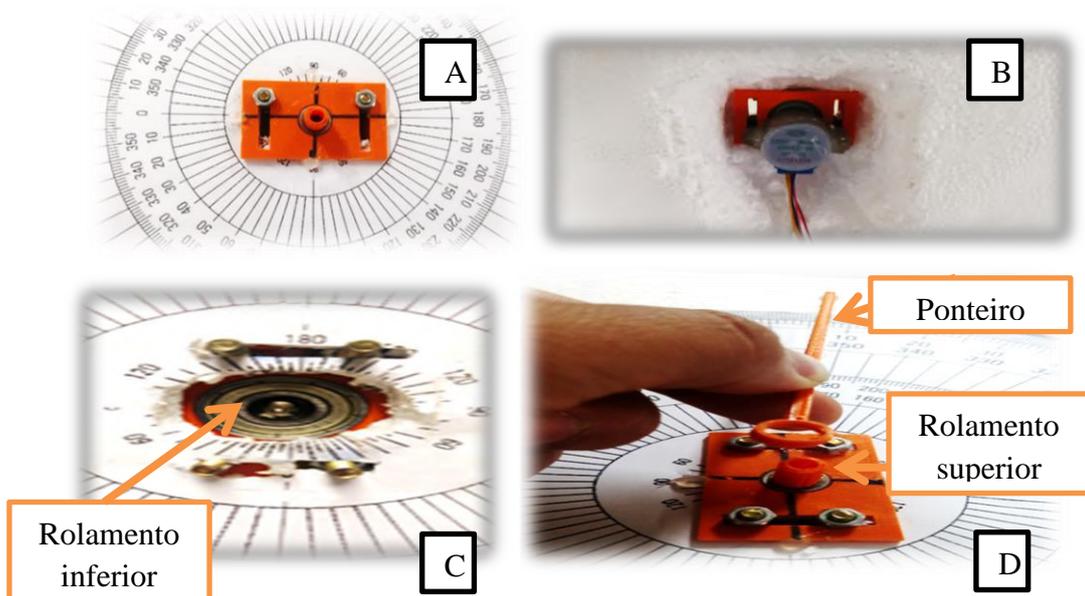


Figura 25- Estrutura de fixação do motor montada sobre uma placa de isopor onde foi instalada a marcação graduada em graus. (A) Imagem da placa superior antes de ser fixada com parafusos. (B) Vista inferior, mostra o motor fixado à placa inferior. (C) Vista superior antes da instalação da última placa, mostra o rolamento inferior e a inserção da estrutura no isopor. (D) Montagem final com o ponteiro sendo colocado.

As duas estruturas foram conectadas utilizando quatro parafusos (figura 25D). Elas foram encaixadas na placa e fixadas com as porcas de metal. A distância entre as duas placas foi de 15 mm. Essa medida foi escolhida para garantir um alinhamento preciso entre os rolamentos e o eixo.

O ponteiro (figura 25D) foi alinhado com o zero da escala graduada utilizando o programa. O motor foi colocado para rotacionar no sentido anti-horário por uma quantidade específica de passos. Após essa movimentação, foi anotado o valor angular correspondente de acordo com a escala. Foram tomados dez valores entre 200° a 2000°. O motor sempre se movimentava no mesmo sentido. As medidas foram feitas para diferentes velocidades de rotação utilizando o programa através da função “*time*”. Abaixo segue a versão resumida do programa utilizado para a movimentação do motor. O diferencial deste em relação ao citado na seção 3.1 é a utilização da função *time.time()* antes e depois da execução dos passos a fim de determinar o tempo de rotação. Segue abaixo a versão resumida mostrando a utilização da função.

```
import sys
import time #Adicionado para se obter o tempo local
import RPi.GPIO as GPIO

        .
        .
        .

while True:
    print ("medida número - >", i)
    passos_h = int (input("Quantos passos andar?"))
    if passos_h == 1024: #finaliza o programa
        print ("FIM!")
        break
    if passos_h < 0:
        Sentido_passo_x=-1#movimento sentido anti-horário
        Passos_h = -1* passos_h
    if passos_h > 0:
        Sentido_passo_x = 1#movimento sentido horário
    inicio = time.time()
    for x in range(passos_h):
        passos_x(Sentido_passo_x)
    fim = time.time()
    v_tempo = fim - inicio
    print("Tempo de deslocamento: ", v_tempo)
    i = i + 1 # Contador

desligar() # desliga a alimentação do motor
```

Seguem, no apêndice 2 (página 90), as tabelas com os resultados obtidos discriminadamente. Na tabela 1 são mostrados os valores medidos para o deslocamento angular, fixado um determinado número de passos, em cinco diferentes velocidades.

Passos						Média da variação angular		
	F1 $\theta \pm 0,25^\circ$	F2 $\theta \pm 0,25^\circ$	F3 $\theta \pm 0,25^\circ$	F4 $\theta \pm 0,25^\circ$	F5 $\theta \pm 0,25^\circ$	Média	δ	$\frac{\delta}{\sqrt{n}}$
200	37,00	35,00	36,00	36,00	36,00	36,0	0,7	0,3
400	70,50	69,50	70,50	71,00	70,50	70,0	0,5	0,2
600	104,50	104,50	105,50	105,00	106,00	105,0	0,7	0,2
800	138,50	140,00	139,00	139,00	139,00	139,0	0,5	0,2
1000	172,50	172,50	173,50	173,00	173,50	173,0	0,5	0,2
1200	207,00	207,00	207,00	207,00	206,50	206,9	0,2	0,1
1400	243,00	242,50	243,50	243,00	243,50	243,1	0,4	0,2
1600	278,50	278,00	278,00	278,00	279,50	278,0	0,7	0,3
1800	314,50	315,00	315,50	315,50	315,50	315,2	0,4	0,2
2000	350,50	350,50	351,00	351,50	345,50	350,0	2,0	0,9

Tabela 1- Medidas das variações angulares em função dos passos dados para diferentes velocidades. O valor do desvio padrão foi indicado por δ e o da incerteza da média foi indicado por $\frac{\delta}{\sqrt{n}}$. Todos os valores em graus.

De acordo com a tabela 1, pode-se observar que a incerteza do valor médio é sempre inferior a 1% do seu valor para todos os valores medidos.

Foi identificada uma dificuldade em ajustar o zero manualmente devido à diferença entre a movimentação do motor em sentidos diferentes. O motor de passo 28BYJ-48 possui uma caixa de engrenagens. Ao se movimentar em um sentido, o dente do rotor empurra a primeira engrenagem, e essa, a outra, e a outra, e assim por diante até movimentar o eixo externo. Quando a movimentação troca de sentido se desejaria que o rotor empurrasse logo no primeiro passo a primeira engrenagem e essa as outras todas no primeiro passo. Mas existem folgas entre as engrenagens, que fazem com que passos sejam perdidos. A dificuldade para o alinhamento do “zero” pode ser fruto desta característica, que gera uma incerteza em relação à localização exata do eixo do motor. Esta não pode mais ser dada em número de passos, uma vez que a quantidade de passos em um determinado sentido é diferente da quantidade de passos voltando daquele sentido. Dessa forma, os erros provenientes das folgas se acumulam e a referência é perdida depois de certa quantidade de movimentos, como aconteceu com o primeiro modelo impresso.

Uma solução para este problema é a construção de um sistema físico de referência, conhecido na eletrônica como sistema de *home*, que permite que o ângulo rotacionado seja definido em função desse referencial fixo e preciso, possibilitando também a retirada de erros acumulados depois de certa quantidade de passos.

3.4. MODELO UTILIZANDO DOIS SISTEMAS DE *HOME*

A estrutura foi construída a partir da necessidade de melhorar o sistema de referência (zero do sistema) para que o movimento do motor nos sentidos horário e anti-horário fossem equivalentes.

Como discutido na seção 3.3, as engrenagens podem ser a causa da diferença de movimentação do motor nos dois sentidos. A solução tentada nesse caso foi desenvolver um novo modelo com dois sistemas de *home* (duas referências).

O modelo foi construído para que a variação angular máxima entre as placas de contato fosse de 16° (8° supondo o ponteiro centralizado). Essa é aproximadamente a variação máxima da movimentação do olho do paciente, discutida na seção 2.2. O sistema de referência utilizado se baseia em contato elétrico.

Em relação à estrutura, o novo modelo (figura 26) usa duas chapas finas de cobre soldadas a dois *jumper*s (figura 26C). Esses tiveram suas outras pontas conectadas a um protoboard de onde saíam outros dois *jumper*s que se conectavam às portas GPIO do Raspberry Pi. O *jumper* de contato, com uma das pontes fixadas no ponteiro (figura 26C), segue o mesmo caminho mas se conecta ao *ground* do Raspberry Pi. O motor utilizado neste experimento foi denominado motor 2.

A estrutura foi construída com o espaçamento desejado entre as placas e encaixe para o parafuso (figura 26A), sendo aparafusada em uma placa de madeira encaixada na placa de isopor cortada (figura 26B).

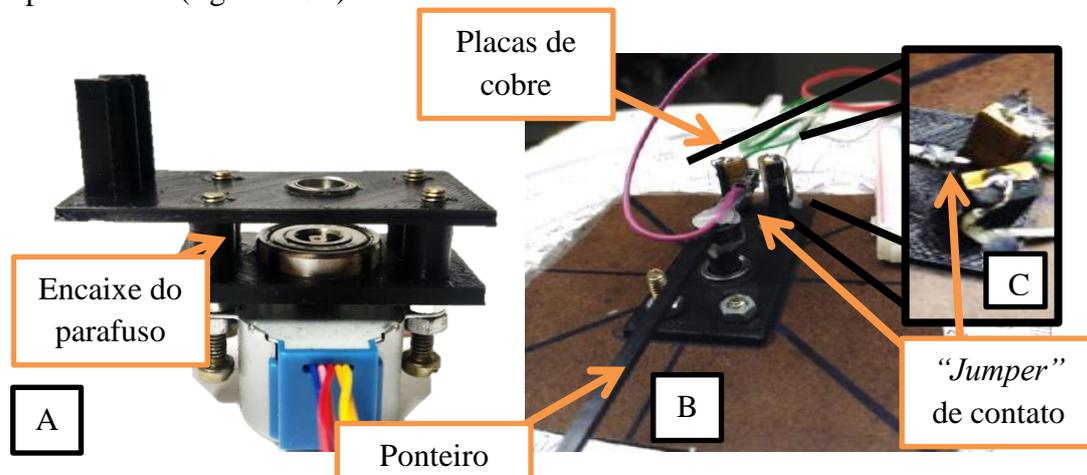


Figura 26- Modelo com dois sistemas de *home*: (A) indica a estrutura alinhada antes de ser colocada na placa de madeira. (B) Estrutura colocada na placa de madeira. (C) Contatos do sistema de *home*.

O sistema de *home* funciona a partir do contato físico entre as placas de cobre e o *jumper* de contato colocado no ponteiro. Uma vez o contato físico ocorrendo, um sinal é mandado para o sistema interrompendo a movimentação.

Três programas de movimentação, mostrados a seguir, foram utilizados neste modelo. O primeiro foi o teste de conexão dos botões, utilizado como procedimento inicial para verificar as conexões. O segundo foi chamado “reta de calibração”, utilizado para construir a relação entre a quantidade de passos e a variação angular. Por fim, o programa de verificação entre duas

placas, utilizado para realizar, de maneira automatizada, medidas da distância em passos entre as duas placas. Seguem abaixo os programas.

- **Teste botão**

```
import sys
import time
import RPi.GPIO as GPIO
from gpiozero import Button

        .
        .
        .

## Definição dos botões
#####
botao_esquerdo = Button(2) # Definição dos botões
botao_direito = Button(3) # Definição dos botões
fim_de_teste = 0

for i in range(300):

    passos(Sentido_passo) #Recebe a informação sobre o
sentido
    if botao_esquerdo.is_pressed: #avisa se o botão correto
foi acionado
        print ("BOTÃO ESQUERDO PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
        print ("Passos igual á",i)
        break
    if i > 50 and botao_direito.is_pressed: #avisa se o botão
incorreto foi acionado
        print ("ERRO: CIRCUITO INVERTIDO. FAVOR CORRIGIR")
        fim_de_teste = 1
        break

    if botao_esquerdo.is_pressed != True : #opção de ter dado
passos e não ter apertado botão
        fim_de_teste = 1
        print ("ERRO, BOTÃO ESQUERDO NÃO PRESSIONADO, FAVOR
CORRIGIR!")

    ## Teste botão direito
    Sentido_passo = 1 #1 horário - 1 anti-horário #mudando
sentido

    for i in range(300):
        if fim_de_teste == 1: ## impede funcionamento se houver
problema no 1º teste
            break

        passos(Sentido_passo)

        if botao_direito.is_pressed:
```

```

        print ("BOTÃO DIREITO PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
        print ("Passos igual á",i)
        break
    if i > 50 and botao_esquerdo.is_pressed:
        print ("ERRO! FAVOR CORRIGIR", i)
        break

print ("          TESTE DE BOTÕES COMPLETO          ")

desligar()

```

- **Reta de calibração**

```

import sys
import time
import RPi.GPIO as GPIO
from gpiozero import Button

.
.
.

print("Inicio funcionamento medição")
volta_zero(i, meio_horario)

i=1

while True:

    print ("medida numero - >", i)

    passos_h = int (input("Quantos passos andar?"))
#quantidade de passos e Break
    print ("Sentido - > ",Sentido_passo_x)

    if passos_h == 1024: #finaliza o programa
        print ("FIM!")
        break

    if passos_h == 0: #retorna ao zero
        print("Voltando para o zero")
        volta_zero(i, meio_horario)

    for x in range(passos_h+1):

        passos_x(Sentido_passo_x)

```

```

        if botao_direito.is_pressed: #segurança: impede de
avançar mais que o botão
            print("Botao Direito pressionado - PAROU!")
            break
        if botao_esquerdo.is_pressed:
            print("Botao esquerdo pressionado - PAROU!")
            break

    Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x #muda o sentido

    while True and passos_h != 0:

        passos_ah = int (input("Quantos passos voltar?"))
#quantidade de passos e Break

        if passos_ah == 1024: #termina a medida
            print ("Zero encontrado - proxima medida")
            break

        if passos_ah == 0: #retorna ao zero
            print("Voltando para o zero")
            volta_zero(i, meio_horario)
            break

        for x in range(passos_ah+1 ):

            passos_x(Sentido_passo_x)

            if botao_direito.is_pressed:#segurança: impede de
avançar mais que o botão
                print("Botao Direito pressionado - PAROU!")
                break
            if botao_esquerdo.is_pressed: #segurança: impede de
avançar mais que o botão
                print("Botao esquerdo pressionado - PAROU!")
                break

            i = i + 1 # Contador
            Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x

    desligar()

```

- **Verificação duas placas**

```

import sys
import time
import RPi.GPIO as GPIO
from gpiozero import Button

```

```

:
:
## Definição dos botões
#####
botao_esquerdo = Button(2) #(horizontal)
botao_direito = Button(3) #(horizontal)
#####
##Outras variaveis
fim_de_teste = 0 # interrupção de teste
passo_maximo = 300 # impede dano ao limitar q quantidade de
passos
velocidade_x = 200
fim = 0
v_tempo = 0
#####
##Parâmetros para medidas
movimento_horizontal = 300*[1]
medidas_x=len(movimento_horizontal)
##Variaveis de arquivo de texto
#####
#horizontal
tempo_h_x = open('calibracao_N_tempo_h_x.txt', 'w') #(Horário
horizontal)
tempo_ah_x = open('calibracao_N_tempo_ah_x.txt', 'w') #(Anti-
horário horizontal)
passo_h_x = open('calibracao_N_passo_h_x.txt', 'w')
passo_ah_x = open('calibracao_N_passo_ah_x.txt', 'w')

##Começo do programa##
print("Inicio funcionamento")
for x in range(medidas_x):
# movimento horizontal
    print ("Medida número:",x+1)
    inicio = time.time()
    for i in range(passo_maximo):
        passos_x(Sentido_passo_x)
        if botao_direito.is_pressed :
            print("Botao Direito "," passos ",i )
            passo_h_x.write(str(i) )#Escrever sentido horário
            passo_h_x.write("\n" )
            Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x ## Mudando
sentido: anti-horário
            break
        fim = time.time()
        v_tempo = fim - inicio

        tempo_h_x.write(str(v_tempo) ) #Escrevendo tempo horário
        tempo_h_x.write("\n" )
        i =0
        inicio = time.time()
        while True:

```

```

passos_x(Sentido_passo_x)
i+=1
if i>50 and botao_esquerdo.is_pressed:
    print("Botao esquerdo ", " passos ", i)
    passo_ah_x.write(str(i) )#Escrever sentido Anti-
horário
    passo_ah_x.write("\n" )
    Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x
    break ##sentido horario
if i> passo_maximo:
    print("Problema de contato")
    break
fim = time.time()
v_tempo = fim - inicio
tempo_ah_x.write(str(v_tempo) )
tempo_ah_x.write("\n" )
##Escrevendo Documento - Registro Movimento horizontal
#####
###
tempo_h_x.close()
tempo_ah_x.close()
passo_h_x.close()
passo_ah_x.close()

desligar()

```

3.4.1.1. MEDIDAS PARA A RETA DE CALIBRAÇÃO PARA OS SENTIDOS HORÁRIO E ANTI-HORÁRIO

Por conta da caixa de redução, diferentes tipos de movimentação podem existir. Se o motor utilizado não possuísse essa caixa, o movimento ocorreria somente em função da movimentação do rotor devido à polarização das bobinas. Contudo, por conta das engrenagens, pode-se supor que existam mais dois tipos de movimentação, o que explicaria o problema mencionado na seção 3.3.3.

Quando o motor se movimenta no sentido horário e tem seu movimento invertido, para o sentido anti-horário, por conta das engrenagens, esse movimento pode ser dividido em dois:

- O primeiro é responsável por rotacionar todas as engrenagens para o sentido anti-horário, retirando as folgas.

- O segundo é responsável por movimentar o eixo no sentido anti-horário.

O mesmo acontece para o sentido horário após executar movimentos no sentido anti-horário. Dessa forma a movimentação do motor não estaria somente relacionada aos passos, mas também à movimentação das engrenagens.

Tomando um valor central, “zero”, a distância em passos em relação à placa da esquerda a esse ponto é diferente da distância em relação à placa da direita (figura 27). Isso ocorre porque para chegar a este ponto, o *jumper*, encostado em uma das placas, precisa realizar movimento

no sentido horário ou anti-horário para chegar ao “zero”. E a movimentação nesses dois sentidos não ocorre da mesma forma.

Supondo o movimento de ir para o “zero” no sentido horário, inicialmente o *jumper* está encostado na placa de referência da direita. Para ele encostar nesta placa, obrigatoriamente antes deste momento, o motor precisou se movimentar no sentido anti-horário até que o *jumper* encostasse na placa. Desta forma, quando o ponteiro for para o “zero” a partir de movimentos horários, o motor inicialmente terá que rotacionar as engrenagens (que estarão giradas para o sentido anti-horário), para o sentido horário e depois realizar o movimento. Após realizar a movimentação angular até o “zero”, se o movimento continuar no mesmo sentido, não existe a necessidade de se girar totalmente as engrenagens já que elas já estão todas encostadas, sem problema de folga.

É possível supor então que o motor possui quatro modos de movimentação. São eles:

- Modo 1: Movimento no sentido anti-horário - quando o motor vem se movimentando a partir do sentido anti-horário. Este movimento não está relacionado com a folga das engrenagens.
- Modo 2: Movimento no sentido horário - quando o motor vem se movimentando a partir do sentido horário. Este movimento também não tem relação com a folga das engrenagens.
- Modo 3: Movimentos no sentido horário - quando o motor vem se movimentando a partir do sentido anti-horário. Desta forma existe problema com a folga, pois como mencionado acima, as engrenagens estarão totalmente movimentadas no sentido anti-horário. O motor antes de movimentar o eixo no sentido horário precisará girar todas as engrenagens no sentido horário.
- Modo 4: Movimentos no sentido anti-horário - quando o motor vem se movimentando a partir do sentido horário. Possui, também, movimento relacionado à folga das engrenagens.

Para avaliar essa suposição, quatro medidas da variação angular em função do número de passos foram tomadas, uma para cada modo de movimentação, utilizando os dois dispositivos de *home* deste modelo (figura 26).

Para se medir os modos 1 e 3, foi utilizado o referencial *home* da direita (figura 27). O motor foi movimentado uma quantidade P de passos até o 0° da escala, partindo do referencial da direita. Para chegar neste ponto o ponteiro se movimentou no sentido anti-horário.

O modo 1 foi medido fazendo o motor movimentar uma quantidade de passos a partir do 0° no sentido anti-horário. Após o movimento ocorrer, o valor onde o ponteiro parou na escala era anotado. Em seguida, um comando fazia o motor se movimentar no sentido horário até o *jumper* encostar novamente na placa da direita. Quando o *jumper* encosta na placa, o sistema encerra o movimento e inicia novamente o movimento de P passos no sentido anti-horário para voltar ao 0° da escala, possibilitando outra medida da variação angular em função do número de passos dados. Os valores obtidos para esse modo podem ser vistos no Gráfico 1, curva na cor preta. No gráfico 3 segue a regressão linear que relaciona passos dados e a variação angular realizada no modo 1.

O modo 3 foi medido utilizando o mesmo procedimento, porém uma vez no 0° , o motor realiza deslocamento para o sentido horário. O gráfico 1, curva azul escura, mostra os valores obtidos.

Os modos 2 e 4 foram medidos da mesma forma só que utilizando o *home* da esquerda, já que são movimentos no sentido inverso. O gráfico 1 mostra também esses valores para o modo 2, em vermelho no gráfico, e para o modo 4, em azul claro no gráfico. No gráfico 2 segue a regressão linear que relaciona passos dados e a variação angular realizada no modo 2.

Cada ponto foi medido 14 vezes. Cada medida iniciava com a menor quantidade de passos possível para se obter movimento. Seguem, no apêndice 3, as tabelas contendo os valores utilizados para a construção dos gráficos.

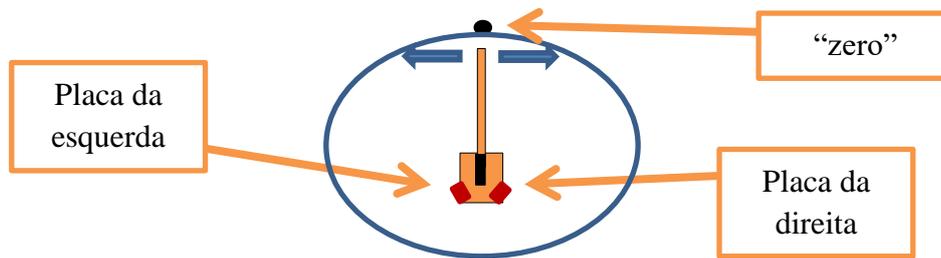


Figura 27- Desenho esquemático da metodologia de medição usada para verificar a medida entre duas placas.

A incerteza de cada ponto foi tomada, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de uma serie de medições, caracterizada pelo VIM (vocabulário internacional de metrologia), como incerteza do tipo A.

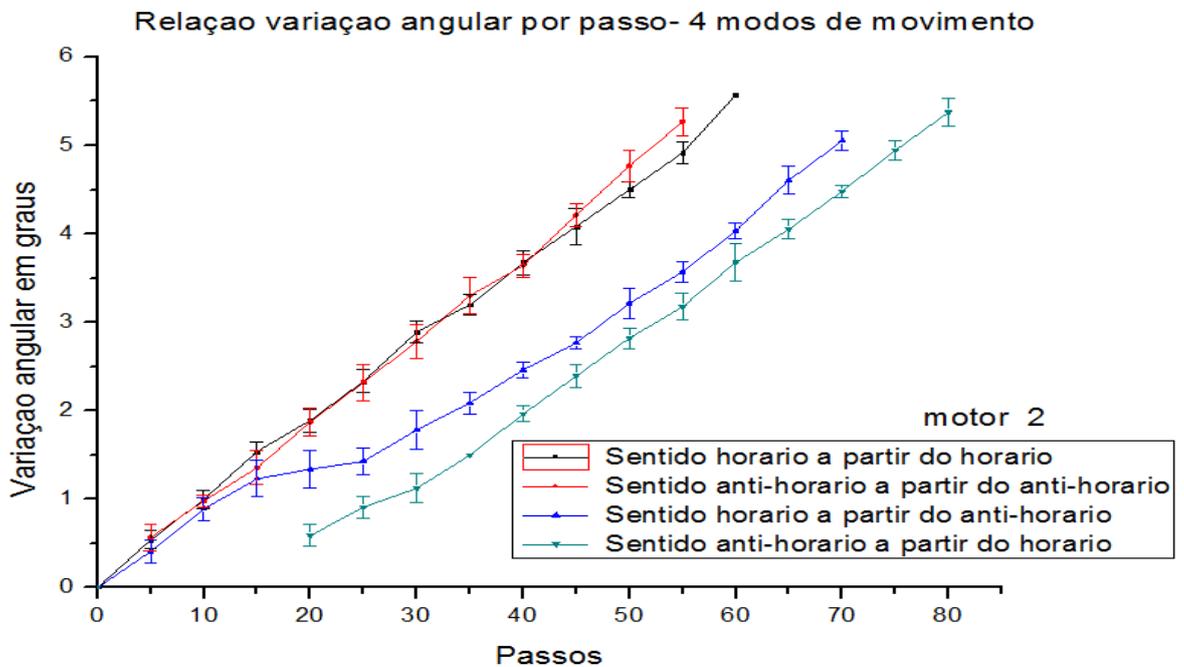


Gráfico 1 - Relação entre variação angular e passos dados pelo motor para os quatro possíveis modos de movimento.

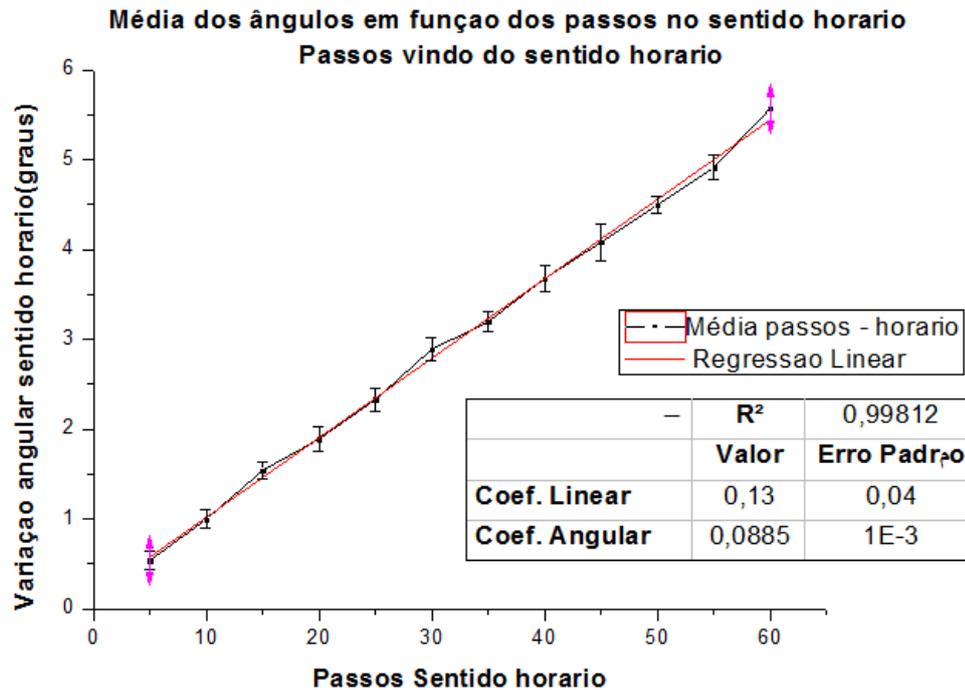


Gráfico 2- Gráfico com as medidas da relação ângulo por passo. Ponteiro vindo do sentido horário e indo para o sentido horário n= 14.

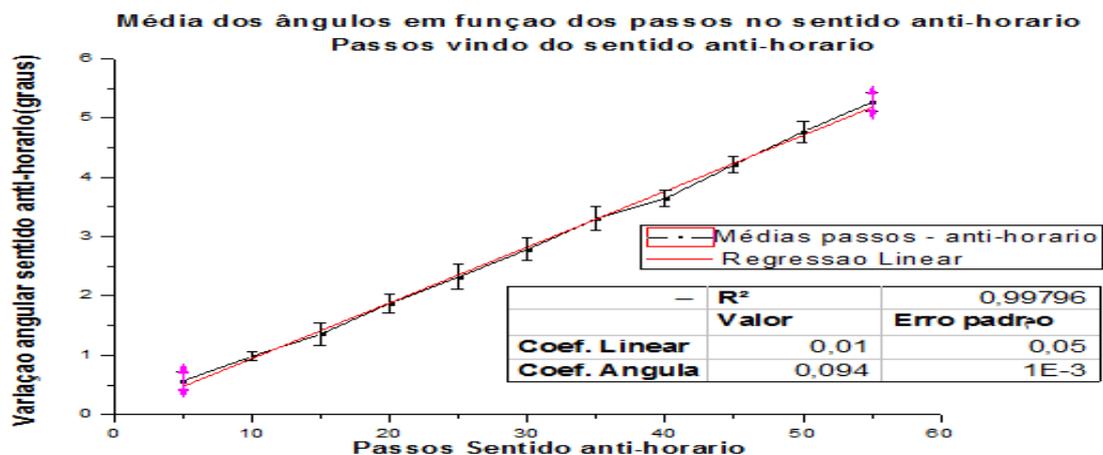


Gráfico 3 - Gráfico com as medidas da relação ângulo por passo. Ponteiro vindo do sentido anti-horário e indo para o sentido anti-horário (n= 14)

Como pode ser visto no gráfico 1, os movimentos que consideram a rotação da engrenagem são diferentes dos movimentos que não consideram essa rotação. Os movimentos que não consideram (pontos vermelhos e pretos no gráfico) são estatisticamente iguais exceto pela última variação angular. Essa pequena diferença no último ponto, pode ser devido ao acúmulo de erros por ter sido dada uma quantidade maior de passos ou por alguma imperfeição pequena do goniômetro que só é observada após um número grande de passos.

Os gráficos 2 e 3 permitem constatar que as curvas de calibração feitas para o sentido horário, a partir do horário, e para o sentido anti-horário a partir do anti-horário, possuem o mesmo

comportamento ($R^2 \sim 0,998$), o que as tornam indicadas para a utilização na calibração do olho mecânico.

3.4.1.2. PASSO ENTRE AS PLACAS EM DIAS DIFERENTES

Para avaliar a reprodutibilidade do sistema entre dias diferentes foi utilizada a contagem do número de passos entre as placas nos dois sentidos utilizando-se o motor 2. Uma vez que o espaço entre as placas é constante, os valores para o número de passos em dias diferentes deveriam ser compatíveis. O motor foi programado para rotacionar no sentido horário até encostar na placa da esquerda, mudando de sentido, e então se movimentar até encostar na placa da direita (figura 27). O valor de passos dados era captado pelo programa. Foram tomados 100 passos para quatro velocidades diferentes. A análise estatística é apresentada na tabela 2. A incerteza atribuída aos valores foi a incerteza do tipo A

3.4.1.2.1. MEDIDAS DE ESTABILIDADE

A medida de estabilidade procurou verificar se depois de uma quantidade muito grande de passos o desempenho do motor se alteraria. Foi realizado o mesmo procedimento de contagem de passos citado na seção 3.4.1.3. Este teste utilizou 2000 medições seguidas em um tempo de 14,5 minutos. Segue na tabela 3 a análise estatística realizada para os dois sentidos de movimentação do motor. A incerteza atribuída aos valores foi a incerteza do tipo A..

	Passos para o sentido horário					Passos para o sentido anti-horário					
	F	50	200	400	600	800	50	200	400	600	800
1°	\bar{X}	82,86	79,92	80,15	80,09	82,89	93,87	91,93	92,15	93,03	93,58
	δ	0,35	0,28	0,36	0,33	0,79	0,34	0,30	0,36	0,17	0,72
	$\frac{\delta}{\sqrt{n}}$	0,04	0,03	0,04	0,03	0,08	0,03	0,03	0,04	0,02	0,07
2°	\bar{X}	78,44	79,00	80,00	81,01	81,08	90,50	92,00	92,00	94,00	94,00
	δ	0,56	0,10	0,10	0,10	0,72	0,56	0,10	0,17	0,10	0,25
	$\frac{\delta}{\sqrt{n}}$	0,06	0,01	0,01	0,01	0,07	0,06	0,01	0,02	0,01	0,03
3°	\bar{X}	80,80	80,7	81,00	81,10	87,00	93,80	93,70	94,00	94,00	90,00
	δ	0,41	0,46	0,27	0,38	0,841	0,41	0,46	0,27	0,41	0,63
	$\frac{\delta}{\sqrt{n}}$	0,04	0,05	0,03	0,04	0,08	0,04	0,05	0,03	0,04	0,06

Tabela 2 - Tabela com medidas feitas em 3 dias diferentes afim de analisar variação dependente da velocidade e/ou dias diferentes. Medidas feitas em graus.

Estabilidade					
	Sentido	Repetições	Tempo total (minutos)	Média (Passos)	Incerteza (Passos)
10	Horário	2000	14,5	80,05	0,01
	Anti-horário	2000	14,5	92,10	0,01

Tabela 3 - Medida de estabilidade do sistema em relação ao tempo.

Utilizando um procedimento que faça o ponteiro, a partir de uma placa de referência, ir para um ponto de referência central (“zero”) usando movimentos em um sentido e depois fazer medidas, continuando neste sentido (modo 1 e modo 2), seria possível gerar deslocamentos angulares precisos e reproduzíveis que permitam calibrar o sistema de *tracking*. É necessário realizar medidas para comprovar a validade deste procedimento.

Sobre o resultado dos testes de reprodutibilidade, mostrados na tabela 2, obteve-se uma variação de 2% no número de passos dados em dias diferentes. A partir da tabela 3 é possível concluir que o motor possui estabilidade após uma série grande de medidas para diferentes velocidades.

3.5. PROCEDIMENTO DE MOVIMENTAÇÃO UTILIZANDO RETORNO PARA O ZERO.

O procedimento que faça o ponteiro, a partir de uma placa de referência, ir para um ponto de referência central (“zero”) usando movimentos em um sentido e depois fazer medidas continuando neste sentido precisa ser testado para avaliar sua reprodutibilidade e precisão.

Uma modificação no programa “reta de calibração” foi feita nesta etapa. Ao invés de esperar que o usuário envie a quantidade de passos, o novo programa executa movimentos automaticamente usando a quantidade de passos determinada a partir das curvas apresentadas nos gráficos gráfico 4 e 3.

Para realizar as medidas foi necessário a colocação de um *input* na linha de comando, permitindo que o usuário faça o programa esperar para ter a capacidade de anotar a medida.

```
import sys
import time
import RPi.GPIO as GPIO
from gpiozero import Button
from math import sqrt
from math import fabs
.
.
.
##Volta para o zero, sentido horário
```

```

def volta_zero(i, meio_horario):
    while True: ## ir para a placa direita
        passos_x(1)
        i= i + 1
        if botao_direito.is_pressed:
##            print("Botao Direito ")
            break
        elif botao_esquerdo.is_pressed and i>50:
            print("Botões invertidos, corrigir ")
            break
    i=0
    while True: #ir para o meio
        passos_x(-1)
        i=i+1
        if i == meio_horario + 1:
            break
    print (i," ----- > Sentido horario")
##Volta para o zero, sentido anti-horário
def volta_ah_zero(i, meio_horario):
    while True: ## ir para a placa direita
        passos_x(-1)
        i= i + 1
        if botao_esquerdo.is_pressed:
##            print("Botao Direito ")
            break
        elif botao_direito.is_pressed and i>50:
            print("Botões invertidos, corrigir ")
            break
    i=0
    while True: #ir para o meio
        passos_x(1)
        i=i+1
        if i == 106 + 1:
            break
    print (i," ----- > Sentido anti-horário")
def desligar(): #Desliga a tensão na controladora for pin in
range(0, 4):
    xpin = Saida_passos_x[pin]
    if Seq[Contador_de_passos_x][pin] != 0:
        GPIO.output(xpin, False)
    else:
        GPIO.output(xpin, False)

print("Inicio funcionamento medição")
volta_zero(i, meio_horario)
n=1
while True:
    verificar = int (input("Aperte 0 para corrigir a origem"))
    if verificar == 0:
        volta_zero(i, meio_horario)
    else:

```

```

break
for x in range(pontos):
    esperar = input("Digitar")#time.sleep(3)
    print ("medida número - >", n)
    angulo=lista_angulos[x]
    print ("Andar: ", angulo)
    if angulo>0:
        #equação sentido horário - sentido horário
        passos = int ((ângulo-0.13)/0.0885)
        Sentido_passo_x = -1 #Andar sentido horário
        #verificar = int (input("Aperte qualquer número"))
    if angulo<0:
        #equação anti-horário - anti-horário
        angulo = fabs(angulo)
        passos = int ((ângulo-0.01)/0.094)
        Sentido_passo_x = 1 #Andar sentido anti-horário
        #verificar = int (input("Aperte qualquer número"))0.039
    if angulo == 0 and lista_angulos[x+1] < 0 : #retorna ao
zero
        print("Voltando para o zero")
        passos=-1
        volta_ah_zero(i, meio_horario)
        time.sleep(10)
    if angulo == 0 and lista_angulos[x+1] >0 : #retorna ao
zero
        passos=-1
        print("Voltando para o zero")
        volta_zero(i, meio_horario)
        esperar = input("Digitar")
        time.sleep(10)
    if angulo !=0:
        print ("Quantidade de passos:", passos)

    if verificar == 1024: #finaliza o programa
        print ("FIM!")
        break

    for x in range(passos+1):

        passos_x(Sentido_passo_x)

        if botao_direito.is_pressed: #segurança: impede de
avançar mais que o botão
            print("Botao Direito pressionado - PAROU!")
            break
        if botao_esquerdo.is_pressed:
            print("Botao esquerdo pressionado - PAROU!")
            break

    if angulo !=0:
        #verificar = int (input("Aperte qualquer número"))

```

```

esperar = input("Digitar") #time.sleep(3)
n = n + 1 # Contador
desligar()

```

3.5.1. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE RETORNO PARA O ZERO

Serão avaliados os modos de movimento 1 e 2, apresentados na seção anterior. O modo 1 é dado por movimentos no sentido anti-horário quando o motor vem se movimentando no sentido anti-horário. O modo 2 é dado pelo movimento do motor no sentido horário, quando o mesmo vem de movimentos a partir do sentido horário.

A grandeza relevante para a calibração da câmera é o deslocamento angular. O método de medição faz o *jumper* encostar na referência (placa de cobre) e se mover uma quantidade de passos para o "zero" (ponto central). A partir deste ponto o motor foi colocado para movimentar um determinado ângulo, baseado nas curvas de calibração obtidas na seção anterior, mostradas nos gráficos 2 e 3.

O valor do deslocamento angular era anotado e o *jumper* voltava a encostar na referência, retornando em seguida para o "zero" com a quantidade previamente especificada de passos, aguardando o comando para a próxima movimentação.

Após serem medidos cinco pontos para um sentido, o sistema mudava de referência e se movimentava novamente para o "zero", com outra quantidade específica de pontos. Desta maneira outros cinco pontos foram medidos. Este processo foi repetido 22 vezes. Seguem, na tabela 4 e no gráfico 4, os valores com as incertezas obtidas por esse método. Segue, no apêndice 4, as tabelas com os valores medidos.

	Calibração câmera		
	Média (graus)	Desvio padrão (graus)	Incerteza (graus)
0,5°	0,53	0,09	0,02
1,0°	1,02	0,07	0,02
1,5°	1,50	0,08	0,02
2,0°	2,03	0,09	0,02
2,5°	2,42	0,12	0,03
0°	0,02	0,07	0,02
-0,5°	-0,55	0,10	0,02
-1,0°	-0,92	0,12	0,03
-1,5°	-1,49	0,14	0,03
-2,00°	-2,00	0,11	0,02
-2,5°	-2,49	0,05	0,01

Tabela 4- Medidas para validação da metodologia de calibração da câmera. O sinal negativo indica sentido contrário (n=22). A incerteza atribuída foi tomada como incerteza estatística da variação de uma série de medidas, incerteza do tipo A.

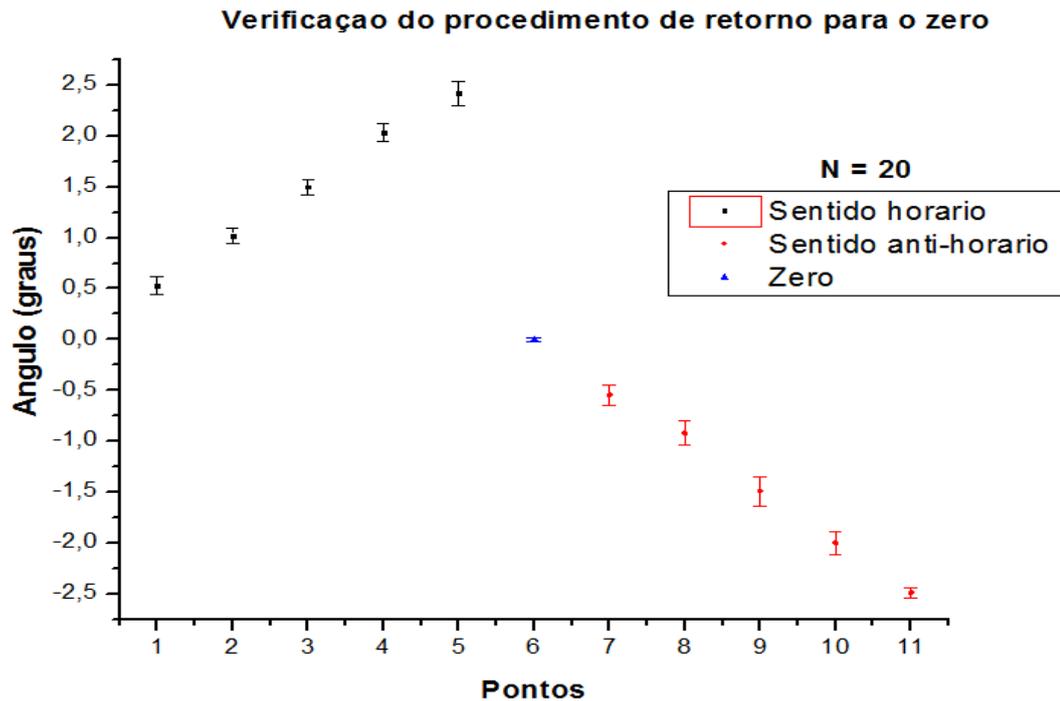


Gráfico 4 – Gráfico construído a partir das medidas de verificação do procedimento de medição de retorno para o zero apresentadas na tabela 4.

O sistema de tracking, câmera mais software, possui uma resolução de 0,1 mm, avaliada considerando-se o pixel a uma determinada distância da câmera. A movimentação do olho humano de $0,45^\circ$ produz um deslocamento de aproximadamente 0,1 mm de um ponto na frente do olho, supondo o olho sendo uma esfera. Com isso, para calibrar o sistema de tracking desenvolvido pelo grupo, uma incerteza máxima de $0,45^\circ$ no deslocamento angular seria adequada. Os resultados obtidos nesse trabalho, apresentados na tabela 4 e no gráfico 4 mostram que as incertezas encontradas em nossos testes são todas abaixo desse valor, de onde conclui-se que o modelo utilizando dois *homes* juntamente com o procedimento de retorno ao “zero” para os dois sentidos, se mostra adequado para calibrar o sistema de *tracking* se o simulador de olho mecânico for capaz de executar movimentos da mesma forma.

3.6. PROJETO DO OLHO MECÂNICO

A partir dos conhecimentos obtidos nos experimentos anteriores e com as informações da literatura foi projetado um olho mecânico para calibrar o sistema de monitoração de movimentação ocular (figura 28), de forma a reproduzir a movimentação do olho do paciente, considerando-se a faixa de movimentação angular do olho e características anatômicas que permitam o programa de *tracking* reconhecer o olho mecânico tal como o de um paciente.

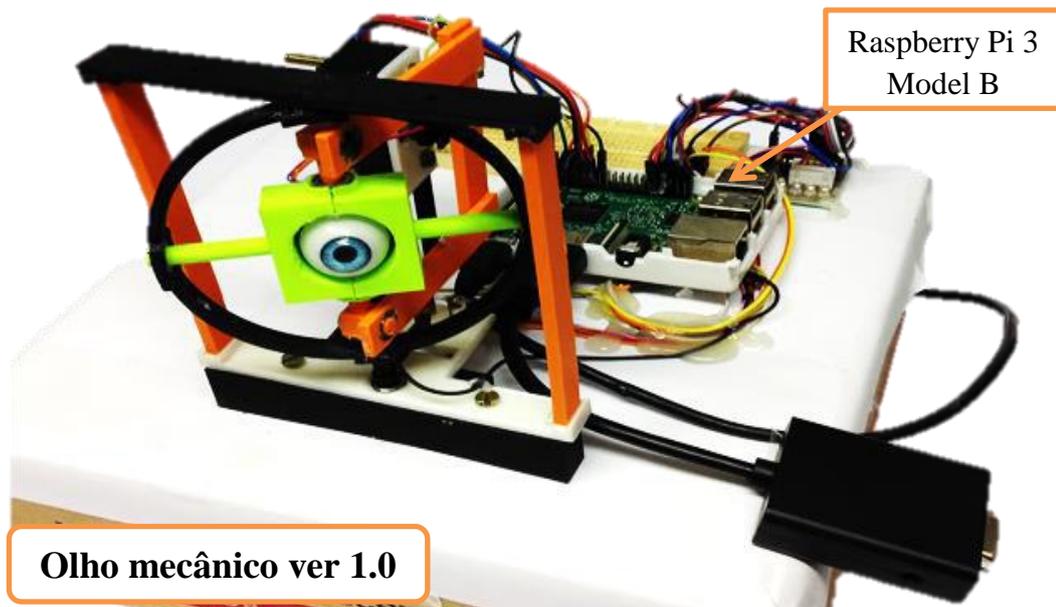


Figura 28- Foto do olho mecânico montado sobre sua base.

3.6.1. MECANISMO DE MOVIMENTAÇÃO DOS EIXOS

Movimentação utilizando dois eixos pode representar a movimentação do olho humano (Bicas, 2003). Ela utiliza movimentações horizontais e verticais para descrever os movimentos feitos pelo olho. O modelo mecânico desenvolvido nesse trabalho utiliza essa ideia, baseando sua movimentação no funcionamento de um giroscópio (figura 29).

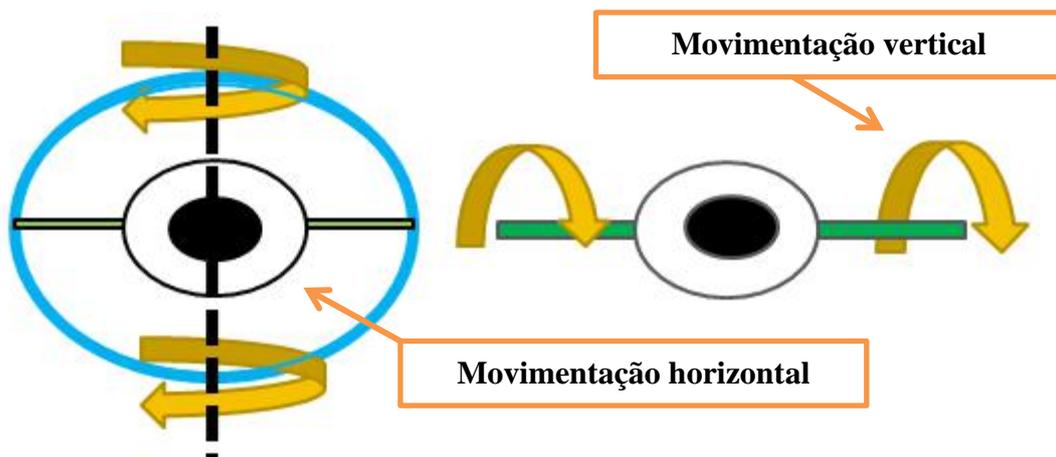


Figura 29- Desenho esquemático do mecanismo de giro do olho mecânico. Rolamentos são utilizados para possibilitar essa movimentação. Em azul, círculo de movimentação horizontal e em verde, eixo de movimentação vertical.

O eixo central, responsável pela movimentação vertical, é posicionado dentro do círculo responsável pelo movimento horizontal (figura 29). A utilização de rolamentos permite movimentação independente de cada eixo.

Cada eixo possui movimentação independente realizada por um motor de passo modelo 28BYJ-48 5V, o mesmo utilizado no goniômetro. A movimentação horizontal ocorre por conta de um eixo ligado diretamente ao círculo de movimento horizontal (figura 29). Assim, a quantidade rotacionada pelo motor, desconsiderando quaisquer folgas, é igual à rotacionada pelo círculo de movimentação horizontal.

Já a movimentação vertical utiliza um mecanismo para proporcionar que a variação angular do motor seja a mesma da movimentação do olho. O mecanismo utiliza o princípio da conservação dos ângulos internos de um paralelogramo (figura 30), sendo possível evitar correções e propagações de erros de outros sistemas proporcionais como polias e/ou engrenagens.

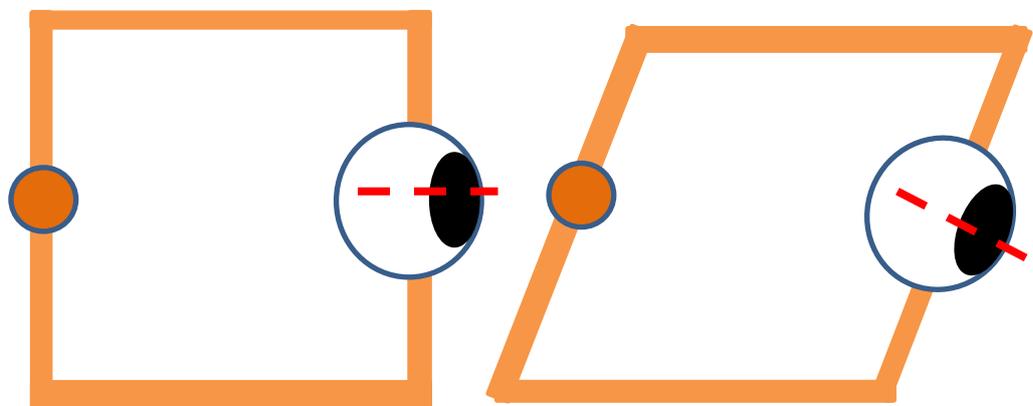


Figura 30- Mecanismo utilizado para movimentação do eixo vertical de forma que a variação angular causada pelo eixo do motor seja igual à movimentada pelo olho.

O olho mecânico utiliza o mesmo sistema de movimentação utilizado no modelo de goniômetro que conta com dois sistemas de *home*. Este sistema introduz facilidades como métodos de avaliação de verificação de erro, maior proteção para o equipamento já que ele impede movimentos maiores que 8° , tomados a partir do centro, e permite aplicar o procedimento de calibração verificado na seção 3.5.

3.6.2. MONTAGEM E CONSTRUÇÃO

O olho mecânico foi planejado utilizando o software AutoCad® no modo de modelagem 3D. O modelo foi convertido no formato stl e enviado para o software da impressora *cube 3D 3ª geração*. Foram escolhidos parâmetros de espessura de depósito, forma da matriz interna do material e densidade dos fios. Após essa etapa, as peças foram enviadas para impressão e utilizou-se lixas e instrumentos de corte para o acabamento da peça. Os desenhos contendo as medidas das peças estão no apêndice 5.

3.6.2.1. SUPORTE PARA O OLHO – EIXO VERTICAL

O suporte para o olho foi desenhado pensando na colocação de um material anatomicamente parecido com um olho humano no seu interior. Ele leva em conta o deslocamento do centro de

rotação do olho, 1,3 mm atrás do centro geométrico, e possui cavidades para a colocação de rolamentos (figura 31).

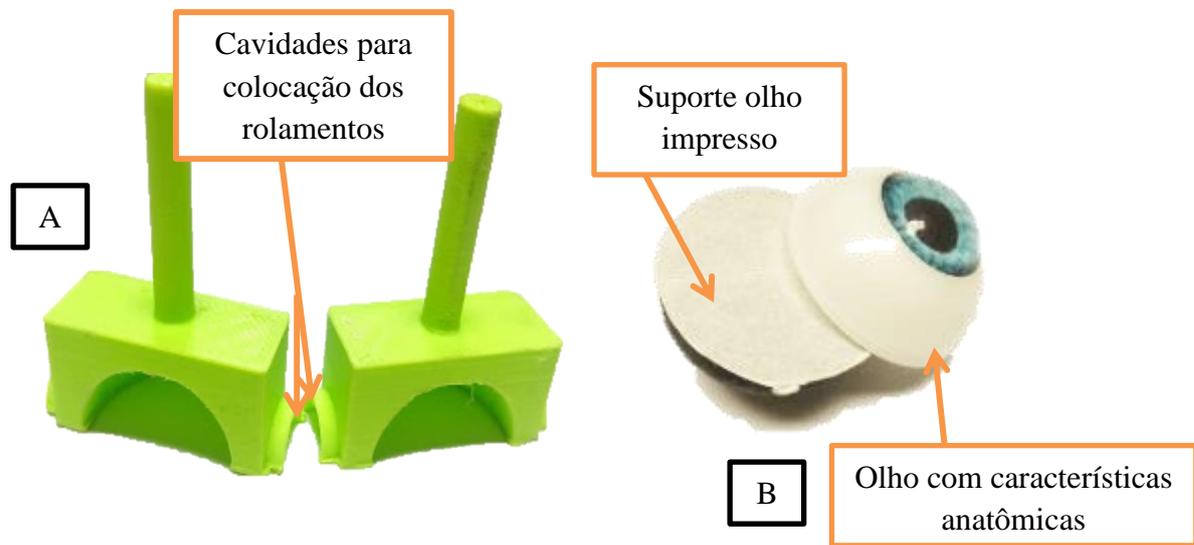


Figura 31 – (A) Eixo vertical com estrutura suporte para o modelo anatômico do olho. (B) Modelo anatômico do olho com suporte para encaixá-lo no eixo.

O olho utilizado foi o mesmo utilizado para confecção de bonecas. Ele possui as dimensões de um olho humano. Somente a metade superior foi utilizada, a metade inferior do olho foi impressa com as dimensões para encaixar o olho no suporte para o olho, a fim de encaixá-lo perfeitamente na cavidade deixando o olho centralizado.

O eixo de movimentação vertical fica fixado nos rolamentos do círculo de movimentação horizontal. Esta peça foi produzida em duas partes, já que existem elevações que a impressora não conseguiria fazer em uma parte única. Após a impressão, foi utilizada cola epóxi para unir as duas partes (A e B, figura 32) e, em seguida, os rolamentos foram colocados nos devidos locais previamente separados.



Figura 32- Foto do círculo de movimentação horizontal, pós-impresso. A e B são metades que foram unidas para a construção da peça final, em (C).

Um suporte foi criado para permitir que as movimentações angulares do motor fossem as mesmas para a rotação vertical do olho. Tal como na figura 30, uma estrutura quadrada foi

criada (figura 34B). Ela possui três barras, tal como três lados do paralelogramo (figura 33) e dois pinos que se encaixam nos rolamentos do suporte para o olho (figura 31). A barra A (figura 33B) tem dois rolamentos de 6 mm colados nas extremidades. As barras B (figura 33A) possuem em uma de suas extremidades um rolamento e, na outra extremidade, um cilindro de aproximadamente 6 mm de diâmetro para fazer a barra B encaixar no rolamento da barra A.

Os pinos foram conectados ao rolamento da barra B através do suporte. Após essa conexão, por conta dos rolamentos, existe a possibilidade de variação angular dos vértices, permitindo assim o movimento do eixo da forma pretendida.

O suporte para estrutura de giro sustenta tanto o círculo de movimentação horizontal como o eixo vertical. Além disto, a barra superior conta com uma conexão para o rolamento superior do círculo de movimentação horizontal (figura 34). O movimento horizontal acontece em torno desse eixo.

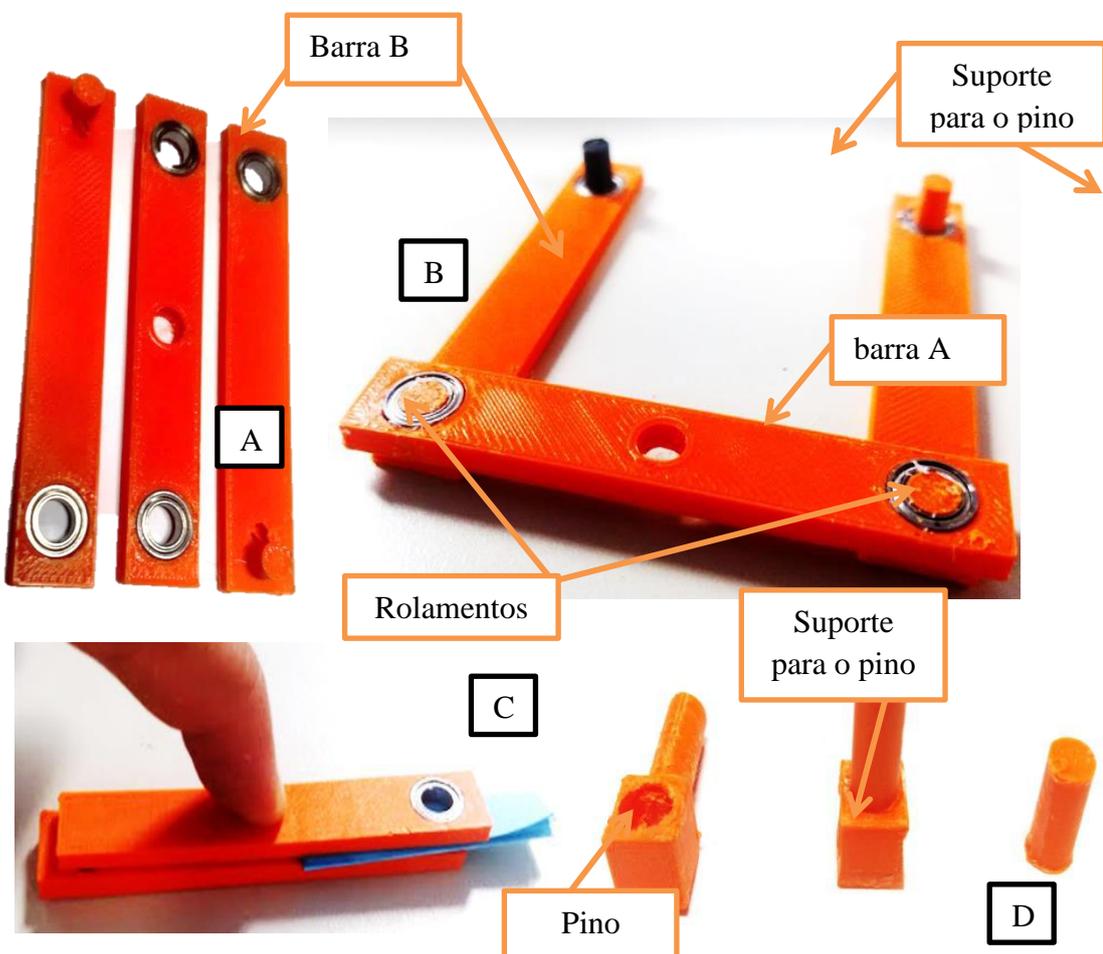


Figura 33 - Suporte para giro vertical; (A) Todos os três suportes, barra B conectada ao eixo do motor; (B) mecanismo em etapa final esperando o pino que será encaixado no rolamento do suporte vertical; (C) Método de construção utilizando um padrão de distância para evitar que peças fiquem no final encostadas, causando atrito; (D) Pinos e suporte para pino.

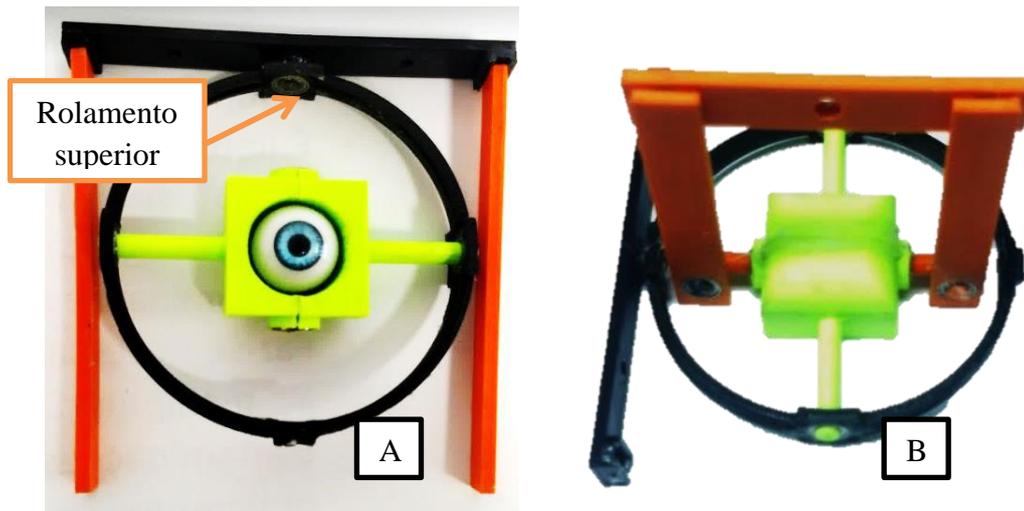


Figura 34 - (A) Estrutura de giro com os suportes que serão conectados ao sistema de *home* horizontal; (B) Visualização do sistema para o giro vertical.

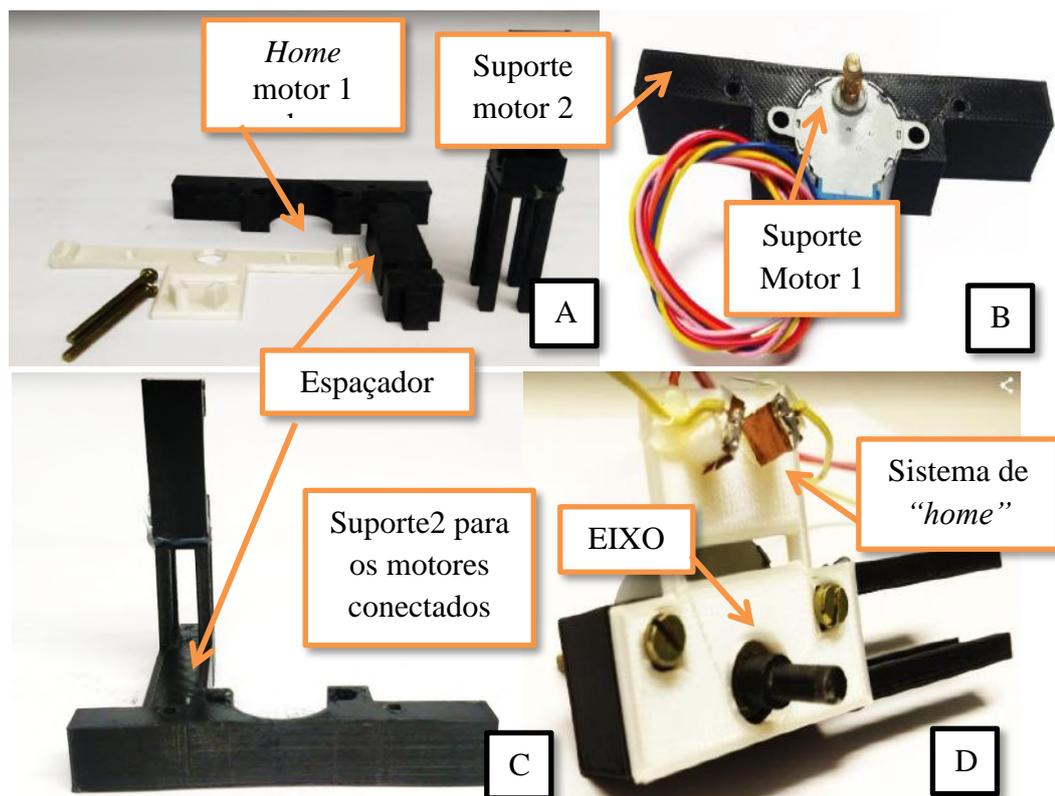


Figura 35 - Suporte para os motores e sistema de *home*. (A) Dois suportes parafusos de fixação e sistema de *home* inferior. (B) Suporte motor 1. (C) Suportes montados (D) Sistema de *home* e eixo motor 2

Abaixo do círculo de movimentação horizontal se encontra o sistema de *home* para a movimentação horizontal. O sistema tem as mesmas dimensões que o utilizado no goniômetro (figura 35). O espaçador foi colado com cola epóxi no suporte para o motor 1 e no suporte para o motor 2. Ele serve para que o motor vertical seja encaixado em uma posição bem estabelecida (figura 35A e figura 35B). Após o encaixe, a estrutura com os botões de cobre foi colocada (figura 35D). Abaixo do sistema de *home* horizontal fica o suporte para o motor 1 onde o motor foi fixado (figura 35B). Um eixo externo conecta o motor ao círculo de giro horizontal ou ao suporte para giro vertical. Neste mesmo conector existe um ponteiro para a colocação do *jumper* usado para gerar o contato do sistema de *home* (figura 35D e figura 36).



Figura 36 - Eixo Motor 2 sem *jumper* para contato.

3.6.3. PROGRAMA DE MOVIMENTAÇÃO DO OLHO MECÂNICO

Para facilitar a verificação do contato entre os *jumpers* e as placas de cobre (sistema de *home*) foi criado um programa a fim de realizar testes movimentando individualmente cada motor. O programa é apresentado no apêndice 1

3.6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A movimentação do olho mecânico utilizando o programa de verificação de contato ocorreu da forma esperada com os eixos se movendo independentemente um do outro entre as placas do sistema de *home*. Em relação à variação entre as dimensões da peça desenhada no software CAD e a peça impressa foram observadas diferenças na escala de décimo de milímetros, o que representa variações menores que 1% para as peças impressas que foram utilizadas no olho.

O olho mecânico utiliza o mesmo motor calibrado no goniômetro. É desejado que o movimento do olho mecânico seja semelhante ao movimento do ponteiro medido no goniômetro. O peso da estrutura e/ou atritos podem interferir no movimento. Assim se torna necessária a verificação da movimentação do olho mecânico para compará-la à movimentação do goniômetro.

3.7. VERIFICAÇÃO MOVIMENTAÇÃO DO OLHO MECÂNICO

O olho mecânico utiliza os mesmos motores calibrados no goniômetro e, por essa razão, deveria possuir valores aproximados para os deslocamentos angulares em função dos passos dados. Como o movimento é dado em função da rotação do eixo do motor e da rotação das engrenagens, é razoável supor que o movimento de rotação em estruturas com pesos ou atritos maiores seja diferente. Assim, o atrito entre os rolamentos e/ou o peso da própria estrutura do olho mecânico pode exigir que o motor necessite dar mais passos para uma mesma variação angular.

A medição do movimento do olho ocorreu utilizando uma régua (Régua B, figura 41B e figura 42) sendo colocada na posição vertical para medidas de movimentação na vertical, e na posição horizontal, para medidas de movimentação horizontal (figura 41e figura 42). Um espelho, um laser de coloração verde e um colimador de 1 mm, colocado na saída do laser, também foram utilizados.

A estrutura foi colocada a um metro de distância da base do olho mecânico (figura 41A). A estrutura foi centralizada com o centro do olho mecânico. O laser (figura 41A e figura 42) foi fixado na estrutura e o feixe de luz proveniente do laser foi direcionado ao espelho colocado na frente do olho mecânico (figura 37). O feixe refletido pelo espelho incidia na régua permitindo medir o deslocamento linear do feixe (figura 38). O laser foi fixado com um ângulo γ em relação à base (figura 41e figura 42).

Com o olho na posição “zero”, ao refletir no espelho, o feixe encontra a régua B na posição X_o . Após um determinado deslocamento angular, feito pelo olho mecânico, o laser encontrará a régua B em outra posição, X_f . Com os valores de X_o , X_f e γ é possível, aplicando algumas propriedades geométricas, encontrar o valor de θ_o e de θ_f (figura 39). O valor do deslocamento angular feito pelo olho após o motor se mover uma quantidade de passos é chamado de β , definido como a diferença entre θ_o e θ_f . Com o valor de β e com a quantidade de passos movimentados pelo motor é possível construir uma curva de calibração que relaciona passos em função do deslocamento angular para o olho.

Um colimador de 1 mm foi utilizado para diminuir o espalhamento da luz proveniente do laser. A incerteza das leituras do deslocamento realizadas na régua foi determinada pela largura da luz do laser projetada na mesma, obtendo-se o valor de 2 mm.

Um nível de bolha foi utilizado para verificar o nível dos dispositivos do sistema, como, por exemplo, a estrutura onde se colocou o laser, o olho mecânico e a base.

O arranjo visto na figura 37 foi utilizado para realizar as medidas da movimentação horizontal e vertical. O laser foi colocado inclinado em relação à base (figura 41e figura 42) para que fosse possível que a luz proveniente do laser fosse direcionada ao espelho. Essa angulação (γ) foi medida utilizando um transferidor com resolução de 1° .

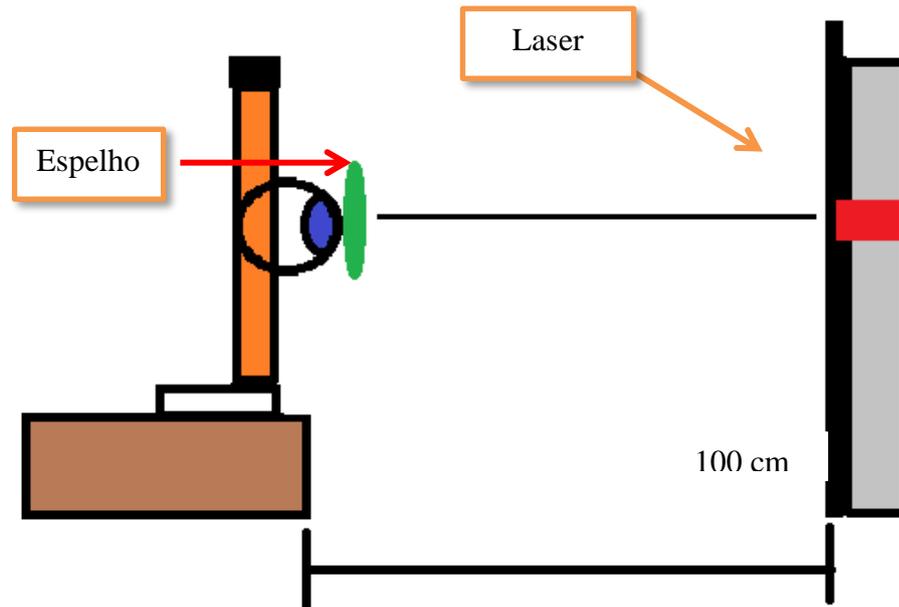


Figura 37- Desenho esquemático do sistema para medição do movimento do olho na direção horizontal.

A medida de variação angular foi baseada no triângulo formado pelo feixe incidido no espelho, pelo feixe refletido até a régua e tendo como último lado o valor medido pela régua B (figura 38).

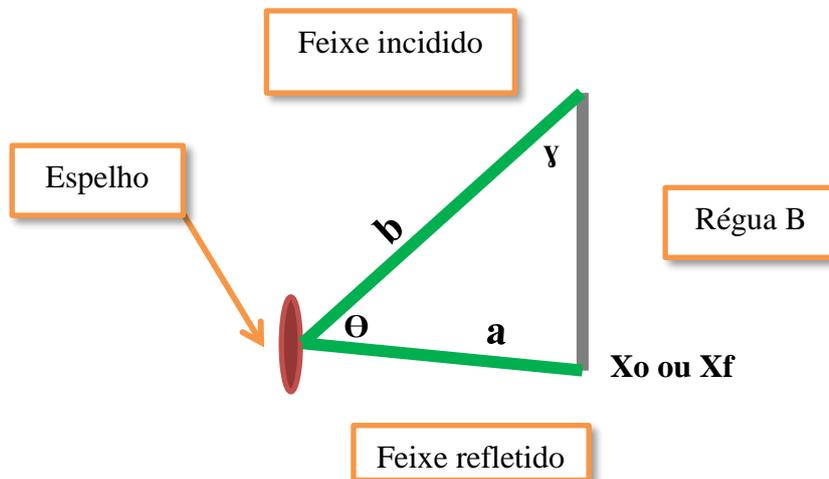


Figura 38 - Desenho esquemático do triângulo utilizado para a determinação da variação angular do olho.

Como o valor inicial medido na régua não começa no zero, dois valores de translação foram medidos. Para a movimentação horizontal foi obtido o valor de 13,9 mm e para a movimentação vertical 17,0 mm.

Para construir a curva de calibração se fez necessário somente utilizar um modo de movimento. As medidas foram feitas para deslocamentos no sentido anti-horário da mesma forma que utilizado na seção 3.4. O X_o é o ponto onde o sistema mecânico parava após o *jumper*

encostar na placa de referência e se movimentar P passos para um ponto central. Já X_f era determinado após o motor se movimentar uma quantidade de passos especificada pelo usuário, a partir do ponto X_o . Após X_f ser medido o sistema retornava para o X_o usando a referencial.

Inicialmente com o olho na posição “zero” foi medido o valor na régua B que determinava o deslocamento inicial, chamado de X_o . Após ser anotado esse valor, uma quantidade de passos era realizada pelo motor, fazendo com que o feixe refletido pelo laser na régua B variasse para posição final (X_f), igual à variação do olho.

O ângulo deslocado Θ é igual à duas vezes a variação angular β (equação 4). Assim, conseguindo determinar Θ é possível determinar β utilizando a lei dos cossenos e dos senos para descobrir Θ_o e Θ_f , relacionados ao ângulo entre o feixe direto do laser até o espelho e o feixe direto do espelho até a régua, respectivamente, nas posições inicial e final (figura 41).

A estrutura com a régua posicionada para medir o deslocamento horizontal foi desenhada no programa AutoCad® (figura 40). Com isso foi possível obter o valor de b , sabendo-se que C_o é a distância horizontal entre o laser e o ponto onde reflete a luz do laser na régua quando o olho está na posição inicial (X_o). Usando a lei dos cossenos é possível determinar o valor de a e, a partir deste, utilizando a lei dos senos obtém-se Θ_o .

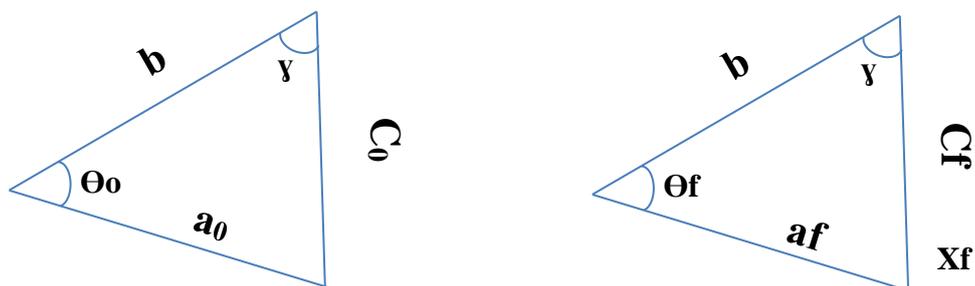


Figura 39 - Figura ilustrando os elementos utilizados para medição da variação angular. (A) elementos utilizados para determinação do ponto inicial. (B) condição para a determinação da variação angular pós-movimentação dos passos onde Θ é a diferença entre Θ_o e Θ_f .

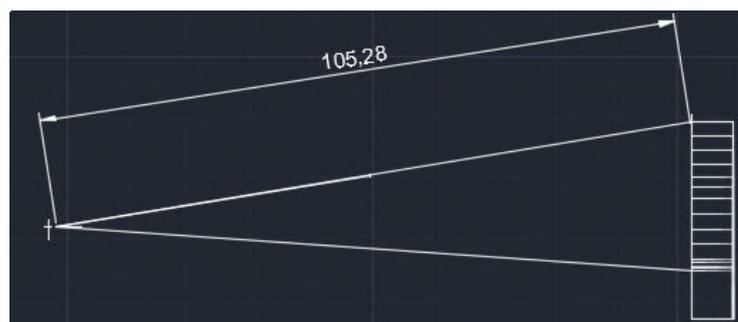


Figura 40 - Medida do valor b através do software Autocad®.

$$a_0 = \sqrt{b^2 + C_0^2 - 2 \cdot b \cdot C_0 \cdot \cos(\gamma)} \quad (1)$$

$$\Theta_0 = \arcsen\left(\frac{C_0 \cdot \sin(\gamma)}{a_0}\right) \quad (2)$$

Utilizando o mesmo procedimento, agora no triângulo formado ao se movimentar o olho mecânico (figura 39), foi possível obter o valor de Θ_f . Como pode ser visto nas equações (3) e (4) é possível obter o valor da variação angular β feito pelo movimento do olho mecânico a partir de uma quantidade de passos enviados ao programa.

$$\Theta = \Theta_0 - \Theta_f \quad (3) \quad \beta = \frac{\Theta}{2} \quad (4)$$

As incertezas atribuídas a cada ponto foram as incertezas do tipo B, estimadas a partir das condições experimentais. A propagação desses erros foi feita utilizando as fórmulas (5), (6) e (7) (FCTUC, 2010). As fórmulas (6) e (7) foram utilizadas para determinação de $\delta\Theta_o$, δa_o , δa_f e $\delta\Theta_f$.

O índice “i” foi utilizado para reforçar a ideia de que as mesmas fórmulas foram utilizadas para os dois instantes de tempo (medida X_o e medida X_f) para medição no eixo vertical e horizontal.

$$\delta a_i^2 = \left(\frac{b - C_i \cdot \cos(\gamma)}{\sqrt{c_i^2 - 2 \cdot b \cdot c_i \cdot \cos(\gamma) + b^2}}\right)^2 \cdot \delta b^2 + \left(\frac{c_i - b \cdot \cos(\gamma)}{\sqrt{c_i^2 - 2 \cdot b \cdot c_i \cdot \cos(\gamma) + b^2}}\right)^2 \cdot \delta c^2 + \left(\frac{C_i b}{\sqrt{c_i^2 - 2 \cdot b \cdot c_i \cdot \cos(\gamma) + b^2}}\right)^2 \cdot \delta \cos(\gamma)^2 \quad (5)$$

$$\delta \Theta^2 = \left(\frac{c_i \cdot \sin(\gamma)}{a_i^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{c_i^2 \cdot \sin(\gamma)^2}{a_i^2}}}\right)^2 \cdot \delta a_i^2 + \left(\frac{\sin(\gamma)}{a_i \cdot \sqrt{1 - \frac{c_i^2 \cdot \sin(\gamma)^2}{a_i^2}}}\right)^2 \cdot \delta c_i^2 + \left(\frac{c_i}{a_i \cdot \sqrt{1 - \frac{c_i^2 \cdot \sin(\gamma)^2}{a_i^2}}}\right)^2 \cdot \delta \sin(\gamma)^2 \quad (6)$$

$$\delta \beta^2 = \frac{1}{2} \cdot \delta \Theta^2 \quad (7)$$

Os valores medidos de β para o movimento horizontal podem ser vistos nas tabelas 6 e 7. A curva de calibração utilizando esses valores é mostrada no gráfico 5. Os valores obtidos pelas medidas podem ser observados no apêndice 6. Uma comparação entre a relação da variação angular por passos no olho mecânico e no goniômetro foi feita e pode ser vista no gráfico 6.

Como o laser não estava colocado na marcação zero da régua, os valores medidos, mostrados no apêndice 6, apresentam uma translação em relação ao zero. Segue, na tabela 5, o valor desta translação bem como o valor obtido de b para a movimentação tanto na horizontal quanto na vertical.

	$b(\text{cm}) \pm 0,2$	$K(\text{cm}) \pm 0,2$	γ (graus) ± 1
Vertical	103,3	17,0	80
Horizontal	105,3	13,9	80

Tabela 5 - Parâmetros da estrutura para medidas na horizontal e na vertical. K é o valor de translação.

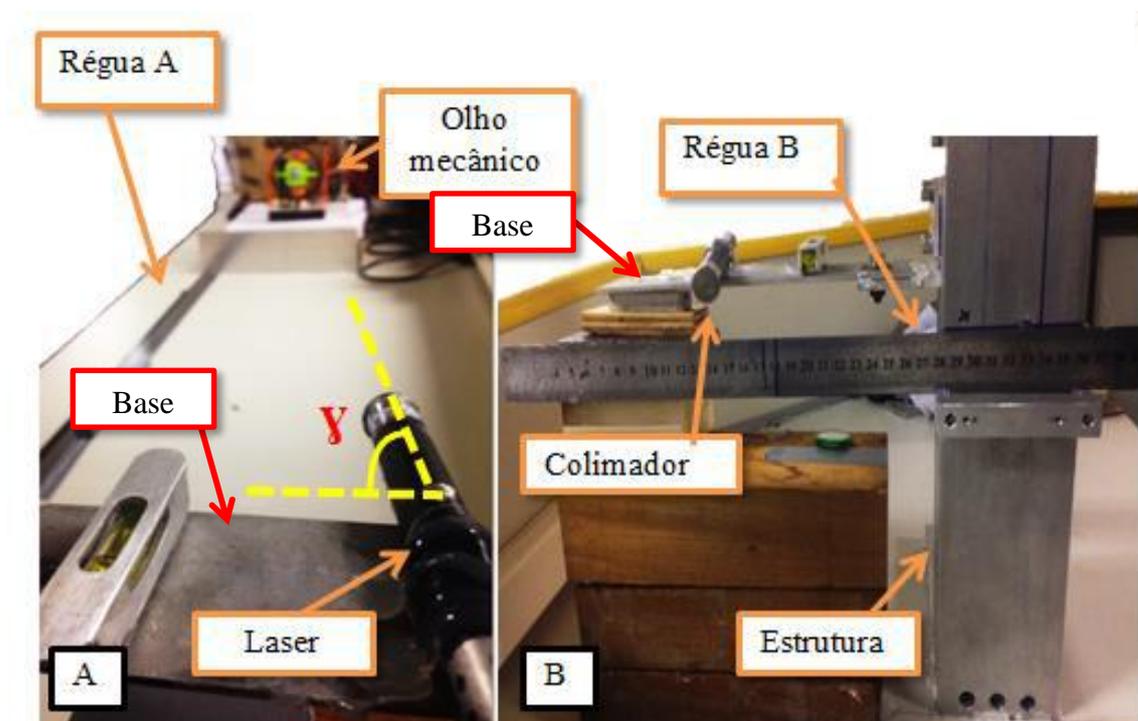


Figura 41 - Fotos da estrutura e arranjo para medição da movimentação horizontal. Em (A) é possível visualizar a régua utilizada para medir as distâncias entre as estruturas e como referência para fazer o alinhamento da estrutura com o olho mecânico; (B) Foto frontal da estrutura, a régua B foi utilizada para a realização das medidas.

Para a medição de movimentos na direção vertical, a mesma estrutura utilizada para posição horizontal foi utilizada. Algumas alterações no arranjo como o local do laser e a direção da régua precisaram ser feitas (figura 42). O valor de translação (k) e a distância b , por se tratar de um arranjo diferente, também foram alterados (tabela 5). Os ângulos γ e β para movimentação vertical foram determinados da mesma forma que para a movimentação horizontal. Os valores medidos de β para o movimento vertical podem ser vistos nas tabelas 8 e 9. A curva de calibração obtida é mostrada no gráfico 7. Os valores obtidos pelas medidas podem ser observados no apêndice 6. Uma comparação entre a relação da variação angular por passos no olho mecânico e no goniômetro é apresentada no gráfico 8.

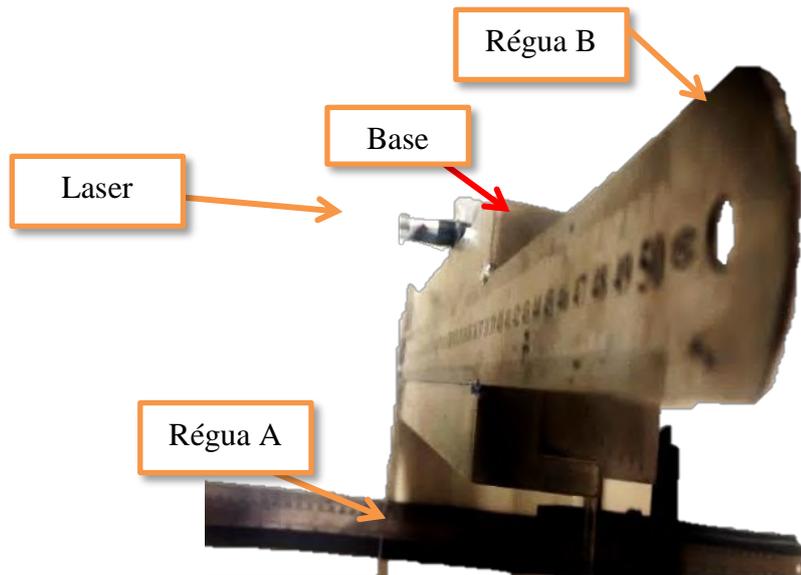


Figura 42 – Foto da estrutura e arranjo utilizado para medições na direção vertical.

3.7.1. RESULTADOS

3.7.1.1. EIXO HORIZONTAL

Passos	Medida 1 (graus)	Medida 2 (graus)	Medida 3 (graus)	Medida 4 (graus)	Medida 5 (graus)	Medida 6 (graus)
8	0,72	0,75	0,75	0,77	0,69	0,69
16	1,49	1,49	1,49	1,52	1,52	1,44
24	2,21	2,24	2,21	2,26	2,18	2,15
32	2,90	2,95	2,93	2,90	2,84	2,90
40	3,56	3,59	3,56	3,58	3,56	3,56
48	4,13	4,13	4,19	4,13	4,11	4,13
56	4,71	4,57	4,71	4,73	4,71	4,68
64	5,31	5,31	5,36	5,36	5,28	5,31
72	5,98	5,98	5,95	5,95	5,85	5,98
80	6,71	6,68	6,68	6,68	6,68	6,68

Tabela 6 - Medidas do deslocamento angular, em função do número de passos, para o olho mecânico se movendo na horizontal.

Passos	Média (graus)	Incerteza (graus)
8	0,72	0,09
16	1,49	0,08
24	2,21	0,08
32	2,90	0,07
40	3,57	0,06
48	4,13	0,05
56	4,69	0,05
64	5,31	0,05
72	5,96	0,04
80	6,69	0,04

Tabela 7 – Média e incerteza das medidas feitas para o deslocamento angular do olho mecânico em função do número de passos.

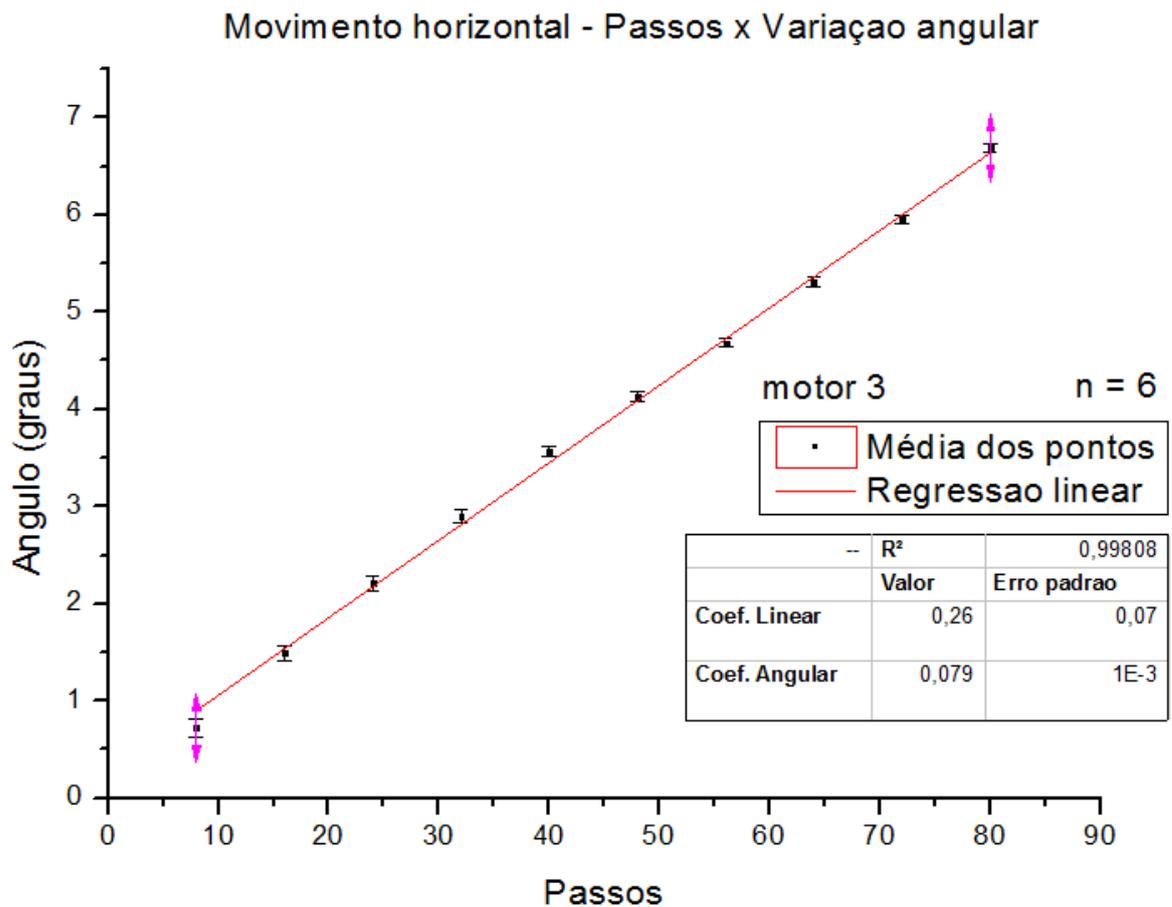


Gráfico 5 - Curva de calibração do olho mecânico sentido horizontal (N=6).

Relação entre movimentação horizontal no goniômetro e no olho mecânico

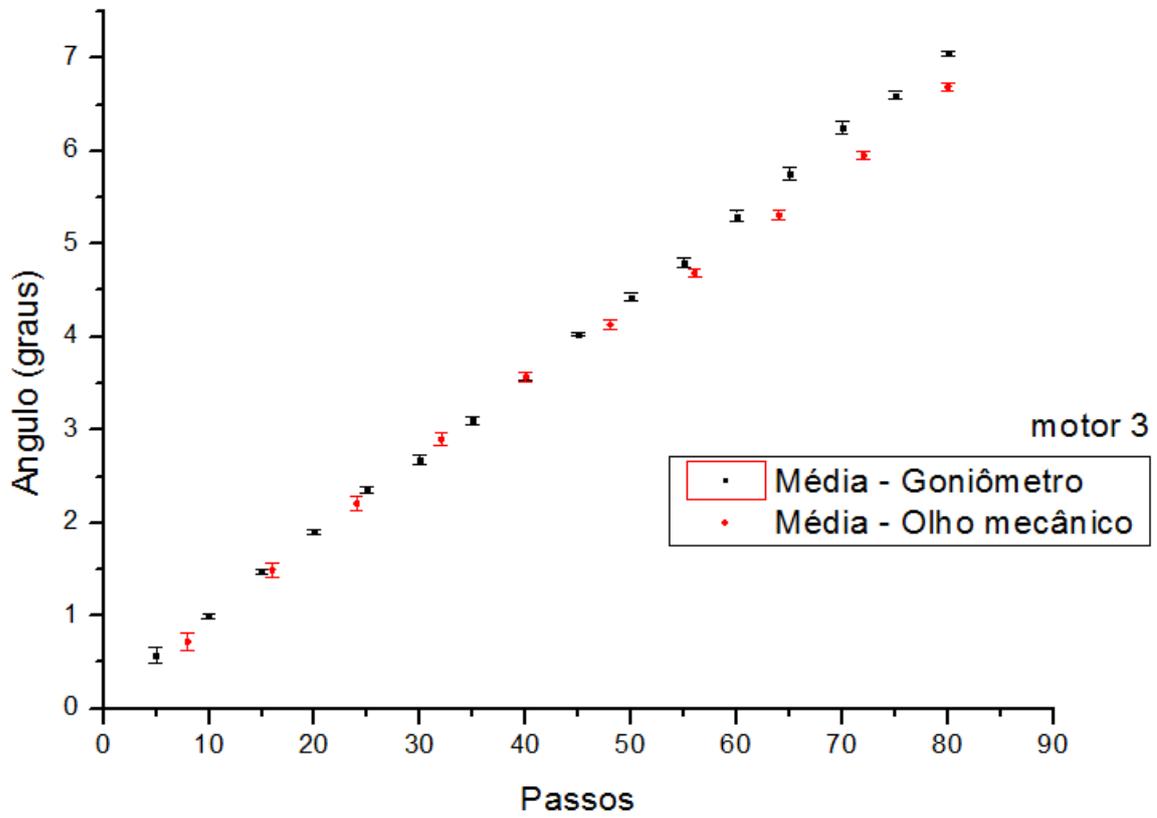


Gráfico 6 - Mostra pontos do deslocamento angular em função dos passos para o motor 3 medidos no goniômetro e no olho mecânico.

3.7.1.2. EIXO VERTICAL

P	Medida									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	0,84	0,76	0,76	0,81	0,78	0,57	0,81	0,84	0,81	0,84
18	1,63	1,58	1,58	1,66	1,63	1,58	1,58	1,44	1,47	1,63
27	2,38	2,38	2,38	2,38	2,40	2,40	2,37	2,40	2,43	2,38
36	3,13	3,10	3,10	3,08	3,10	2,99	3,15	3,15	3,07	3,13
45	3,94	3,97	3,97	3,97	3,99	3,96	3,96	3,96	3,99	3,99
54	5,09	4,78	4,78	4,81	4,84	4,81	4,84	4,81	4,89	4,84
63	5,51	5,54	5,54	5,57	5,57	5,59	5,54	5,56	5,71	5,54
72	6,25	6,21	6,21	6,25	6,22	6,30	6,24	6,27	6,38	6,27
81	6,84	6,89	6,89	6,89	6,89	6,89	6,83	6,86	6,97	6,86
90	7,65	7,65	7,65	7,59	7,59	7,62	7,59	7,57	7,62	7,51

Tabela 8- Medidas do deslocamento angular, em função do número de passos, para o olho mecânico se movendo na vertical. Medidas em graus.

Passos	Média (graus)	Incerteza (graus)
9	0,78	0,03
18	1,58	0,03
27	2,39	0,04
36	3,10	0,04
45	3,97	0,05
54	4,85	0,05
63	5,57	0,06
72	6,26	0,07
81	6,88	0,07
90	7,60	0,08

Tabela 9- Média e incerteza das medidas feitas para o deslocamento angular do olho mecânico em função do número de passos.

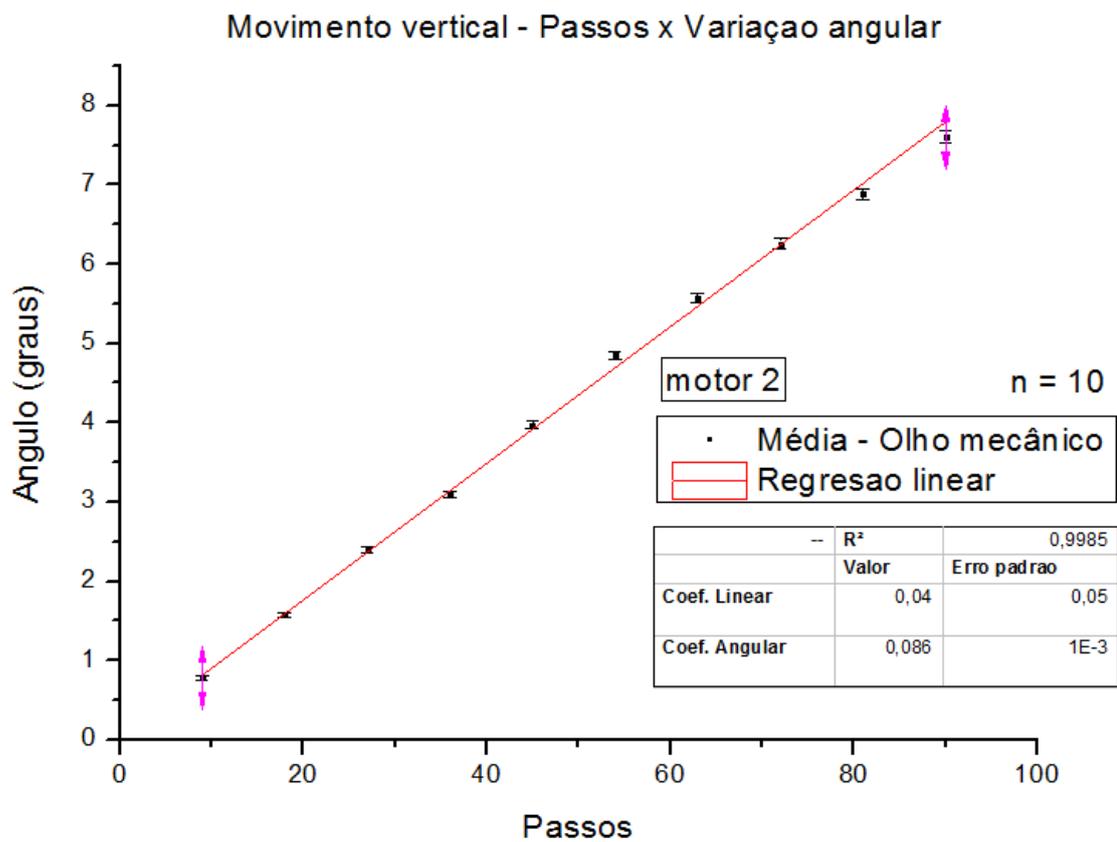


Gráfico 7 - Curva de calibração olho mecânico sentido vertical (n=10).

Relação entre movimentação horizontal no goniômetro e no olho mecânico

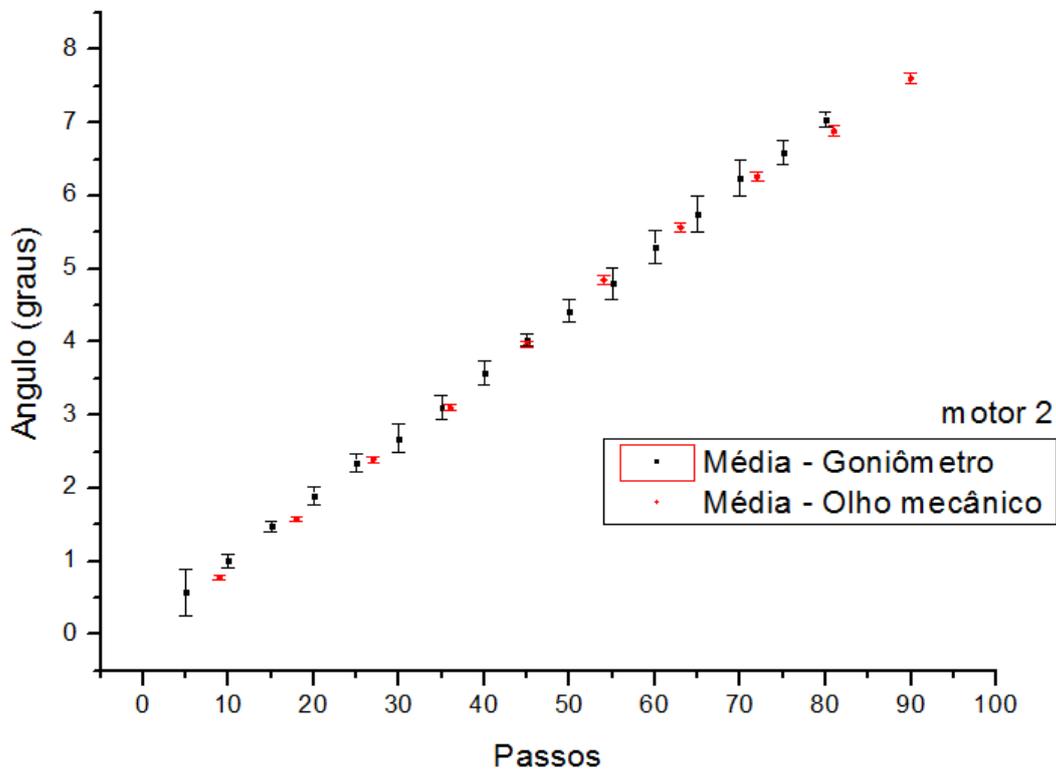


Gráfico 8 – Deslocamento angular em função dos passos para o motor 2 medidos no goniômetro e no olho mecânico.

Como pode ser visto nos gráficos 6 e 8, os deslocamentos angulares realizados pelo olho mecânico nas direções horizontal e vertical são comparáveis ao movimento exercido pelo ponteiro do goniômetro. Isso mostra que o olho mecânico da forma que foi construído conseguiu minimizar o atrito e qualquer outro efeito relacionado que desfavorecesse a movimentação do olho tanto para a direção horizontal quanto para a direção vertical. Verificou-se também que o uso dos rolamentos e das peças impressas pela impressora 3D gerou um bom alinhamento entre todas as partes da estrutura.

3.8. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO: SOFTWARE E CÂMERA

Para calibrar o sistema de *tracking* (câmera mais software) foram utilizadas fotos dos deslocamentos realizados pelo olho mecânico. Cada par de fotos corresponde à posição do olho no ponto inicial e à posição do olho no ponto final pós-variação angular.

O movimento feito pelo olho mecânico, que deverá ser medido pelo sistema de *tracking*, foi avaliado como sendo a diferença entre o centro do *blob* medido no ponto inicial pelo centro medido no ponto final. Desta forma, o olho mecânico irá se movimentar encostando-se a uma das placas do sistema de *home* e depois irá para o “zero”. O “zero” é um ponto localizado no centro entre as placas, mas não necessariamente no meio. Neste ponto “zero” é retirada a

primeira foto. Em seguida, o olho irá executar um deslocamento angular no mesmo sentido do movimento anterior e outra foto é feita. Esse método foi aplicado para cada medida. Essas fotos foram tratadas e depois o programa de *tracking* desenvolvido no LAFRAG foi utilizado para medir o deslocamento do olho entre as duas fotos.

A câmera Gopro Hero5® foi utilizada para tirar fotos do deslocamento do olho mecânico. Ela foi alinhada em relação ao olho mecânico (figura 43)

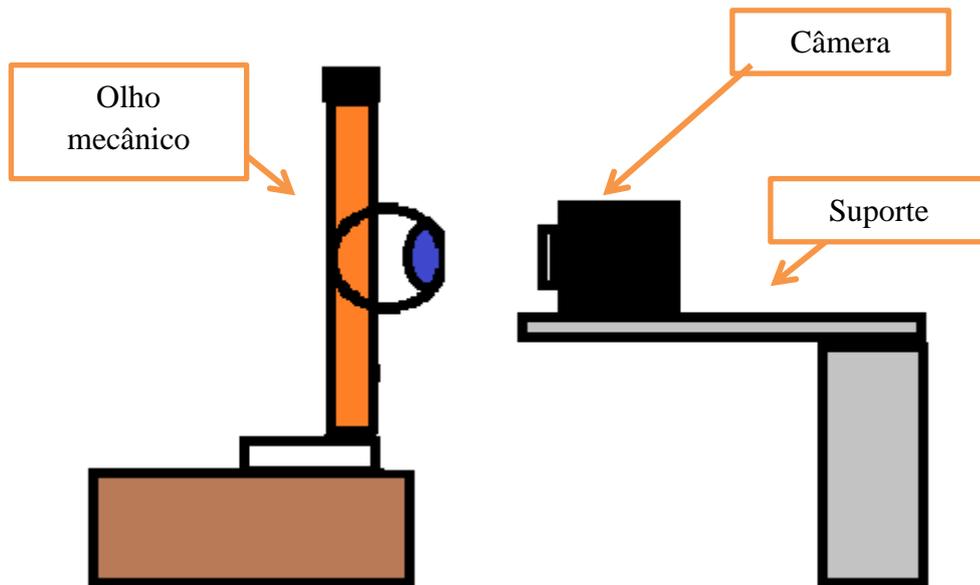


Figura 43 - Imagem esquemática do sistema utilizado para avaliar a movimentação da câmera.

3.8.1. FORMA DE MEDIÇÃO E RESULTADOS

O processo de medição ocorreu instantes após a obtenção da curva de calibração de cada direção individualmente. A partir da curva foram escolhidos os pontos que permitiriam avaliar uma grande (mais de 99%) parte da faixa de movimento do olho.

A equação 8 foi utilizada para relacionar o deslocamento em graus com a variação em milímetros de um ponto na frente do olho mecânico junto à região correspondente à córnea, levando-se em consideração um centro de rotação de 13,3 mm perpendicular a esse ponto. A equação 9 foi utilizada para estimar a incerteza do tipo B relacionada à movimentação do olho mecânico, utilizando os valores obtidos através de interpolação linear dos valores medidos nas tabelas 7 e 9. A tabela 10 mostra os resultados obtidos que podem ser visualizados nos gráficos 9 e 10.

$$\text{Deslocamento} = \text{Tan}(\beta). 13,3 \quad (8)$$

$$\delta\text{Deslocamento} = l. \delta\text{tan}(\beta) \quad (9)$$

Medida	Deslocamento olho mec. Horizontal (mm)	Deslocamento detectado Horizontal (mm)	Deslocamento olho mec. Vertical (mm)	Deslocamento detectado Vertical (mm)
1	$0,26 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,07$	$0,24 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,09$
2	$0,52 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,06$
3	$0,78 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,06$	$0,79 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,06$
4	$1,07 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,05$	$1,11 \pm 0,01$	$1,10 \pm 0,07$
5	$1,30 \pm 0,01$	$1,23 \pm 0,10$	$1,35 \pm 0,01$	$1,3 \pm 0,10$
6	$1,570 \pm 0,009$	$1,58 \pm 0,10$	$1,63 \pm 0,02$	$1,5 \pm 0,10$

Tabela 10 - Comparação entre deslocamentos realizados pelo simulador de olho mecânico e deslocamentos detectados pelo software de monitoramento.

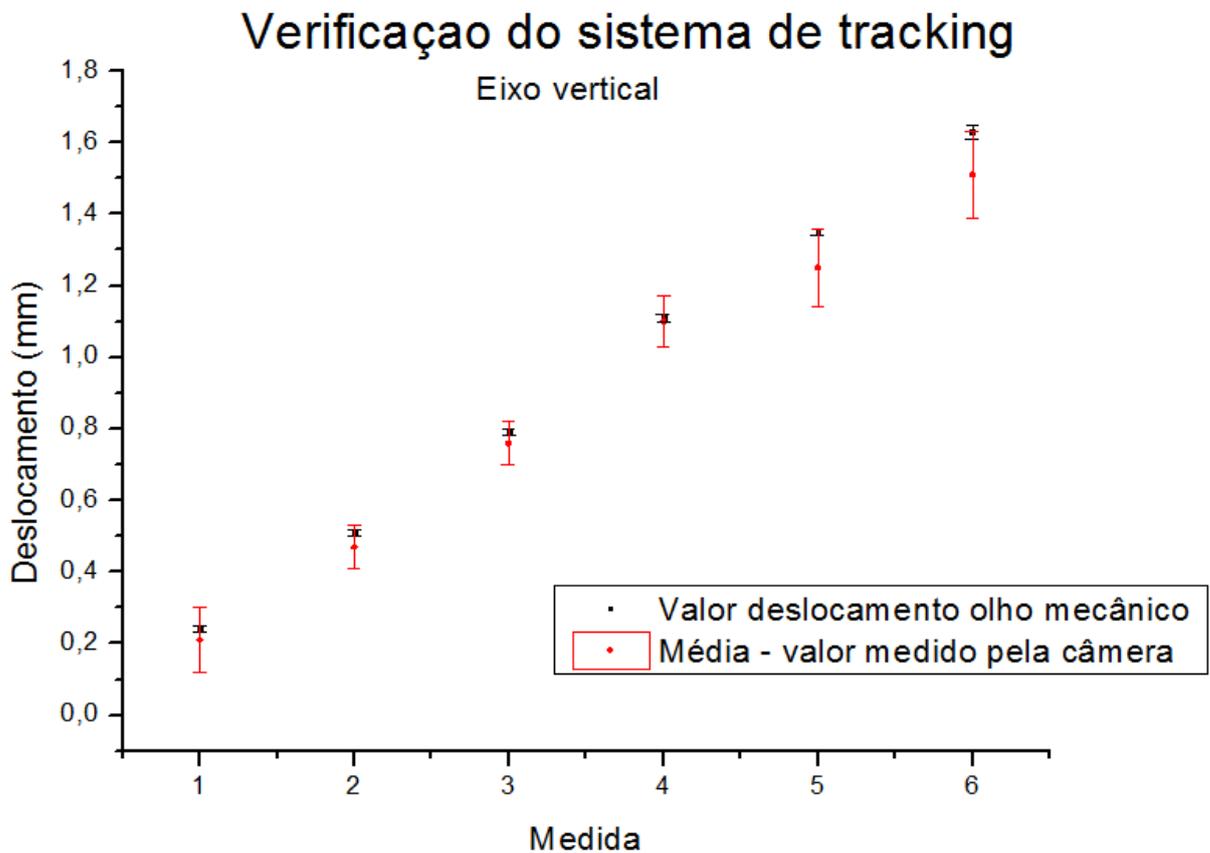


Gráfico 9 - Gráfico mostrando o deslocamento vertical do olho (vermelho) medido com o olho mecânico e pela câmera (preto).

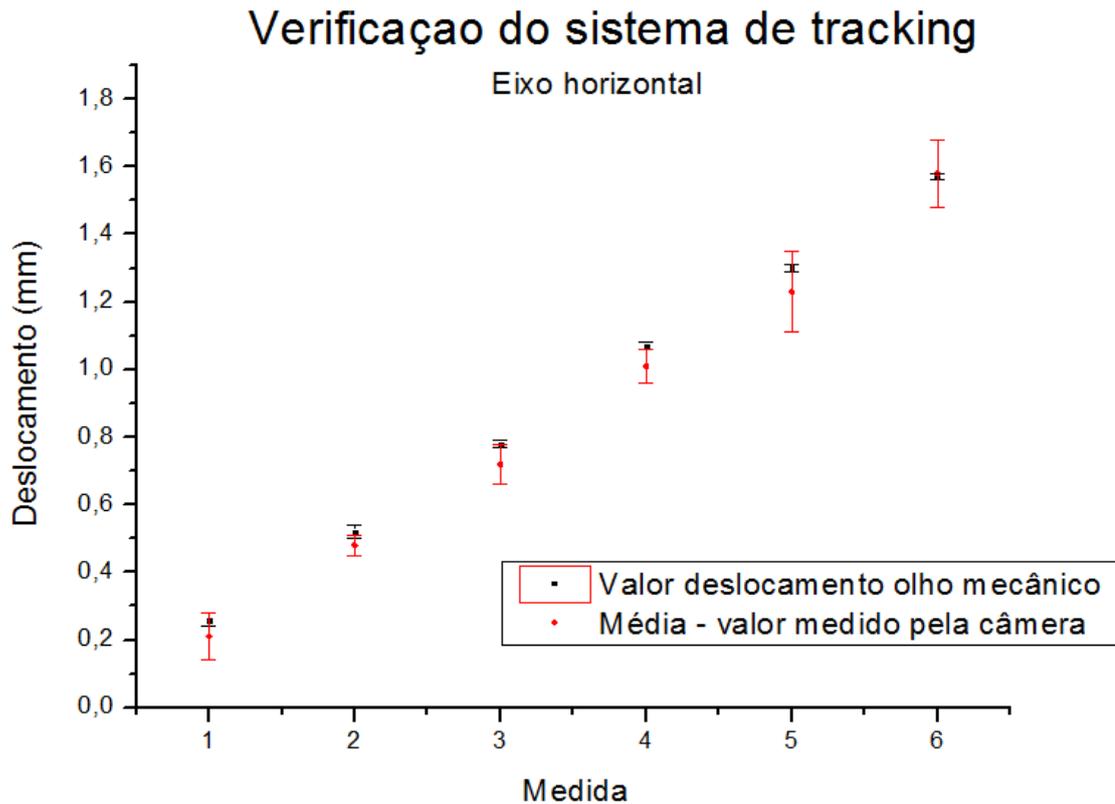


Gráfico 10 - Gráfico mostrando o deslocamento do olho horizontal (vermelho) medido com o olho mecânico e pela câmera (preto).

Primeiramente é possível afirmar que as condições do ambiente, como luz e a forma com que ela reflete no olho influenciam nas medidas de deslocamento do olho mostrando a necessidade da utilização de um sistema de monitoração do olho que utilize luz infravermelha que sofre interferência destrutiva na região da pupila, produzindo uma região escura bem delimitada (figura 44).



Figura 44 - Imagem do olho humano ao interagir com a luz infravermelha. O círculo branco foi feito por um software de *tracking* a partir da diferença de contraste com as outras regiões (<http://www.vdvs.ru/english/products/vog/vog.htm>, acessado em 3/2/2018)

Observa-se que todos os valores de deslocamento angular medidos utilizando o olho mecânico são compatíveis com os obtidos com a câmera. Esse fato comprova que o olho mecânico desenvolvido e as estruturas anexas projetadas nesse trabalho podem ser utilizados para calibrar o sistema de tracking desenvolvido no LAFRAG para acompanhar o movimento suave do olho humano em um tratamento de melanoma de coróide.

4. CONCLUSÃO

O motor de passo 28BYJ-48 5V foi utilizado no modelo de olho mecânico. Características como viabilidade, resolução espacial, reprodutibilidade e velocidade de rotação foram avaliadas. Primeiramente foi determinada a faixa de velocidade em que o motor era capaz de se movimentar. O motor 28BYJ-48 em regime de meio passo tem a capacidade de se movimentar com uma velocidade máxima de $70^\circ/\text{s}$. Como o olho humano durante o tratamento de MC se move com uma velocidade máxima de $30^\circ/\text{s}$, o motor foi classificado como capaz de se movimentar dentro da faixa de interesse.

Uma vez determinada a faixa de velocidade, testes foram feitos para medir a dependência do deslocamento angular em relação à velocidade e quantidade de passos movimentados. Para isso foi criado, com o auxílio de uma impressora 3D, um goniômetro cujo intuito foi poder medir os deslocamentos angulares do motor em função do número de passos dados. O sistema de medidas verificou 2% de variação máxima em relação às medidas com a mesma quantidade de passos feitos para velocidades diferentes, o que indica reprodutibilidade dos valores dentro desta faixa. Verificou-se também uma diferença na movimentação do motor em função do movimento executado ocasionado por conta das folgas das engrenagens. Para contornar essa dificuldade, foi projetado outro sistema que utilizou dois *homes* para gerar uma referência física possibilitando a correção do movimento devido a erros adicionados pelas folgas. Com esse modelo foram medidos quatro modos de movimentação que demonstraram que as folgas influenciam nos movimentos.

Testes foram feitos para medir a estabilidade do sistema entre dias diferentes e depois de uma quantidade grande de movimentos. Valores de variação se mantiveram dentro de 2% quando comparados em dias diferentes e menos de 1% para valores tomados durante 14,5 minutos de movimentos seguidos.

A movimentação do olho mecânico projetado e construído baseou-se na movimentação de um giroscópio conseguindo assim executar movimentos no sentido horizontal e vertical de maneira independente. Os valores encontrados para o movimento do olho mecânico eram próximos aos encontrados para o movimento do goniômetro. A forma de movimentação também era estatisticamente comparável dentro de uma incerteza de $0,09^\circ$.

Através da comparação dos valores de deslocamento angular medidos utilizando o olho mecânico e os obtidos com a câmera foi possível comprovar que o olho mecânico desenvolvido e as estruturas anexas projetadas nesse trabalho podem ser utilizados para calibrar o sistema de tracking desenvolvido no LAFRAG para acompanhar o movimento suave do olho humano em um tratamento de melanoma de coróide.

5. REFERÊNCIAS

1. *28byj-48 stepper motor*. (s.d.). Acesso em 1 de 2 de 2018, disponível em robocraft: <http://robocraft.ru/files/datasheet/28byj-48.pdf>
2. *Anatomia do olho*. (12 de 03 de 2010). Acesso em 28 de 1 de 2018, disponível em casadooculos: <https://casadooculos.wordpress.com/2010/12/03/anatomia-do-olho-diversos/>
3. Araújo, t. (24 de 10 de 2014). *Raspberry pi b+: introdução a porta gpio*. Acesso em 7 de 12 de 2017, disponível em fazedores: <http://blog.fazedores.com/raspberry-pi-b-introducao-porta-gpio/>
4. Arcieri, e. S., fonseca, d., frança, e. T., braga, e. F., & ferreira, m. A. (2002). Estudo de melanoma de coróide na universidade federal. *Arquivo brasileiro de oftalmologia*, pp. 89-93.
5. Arduino e cia. (26 de 05 de 2015). *Como ligar o motor de passo 28byj-48 no raspberry pi 2*. Acesso em 2 de 10 de 2017, disponível em arduino e cia: <https://www.arduinoecia.com.br/2015/05/ligar-motor-de-passo-28byj-48-raspberry-pi-2.html>
6. Arlete hilbig; marlise de castro ribeiro. (2002). Oculomotricidade. In: m. L. Marrone, *semiologianeuroológica*.
<https://books.google.com.br/books?id=sclftabnf9wc&pg=pa205&lpg=pa205&dq=oculomotricidade&source=bl&ots=zfwzbsbszn&sig=j1xlgvpmtoncdklqmbmeuzoj4cw&hl=pt-br&sa=x&ved=0ahukewi0zddz5svxahviepakhtcra6k4chdoaqgxm#v=onepage&q=oculomotricidade&f=false:edipucrs>.
7. Azevedo, f. M. (28 de 11 de 2013). *Estudo e projeto de melhoria em maquina de impressão 3d*. Acesso em 20 de 2 de 2018, disponível em tcc usp: www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce.../azevedo_fabio_mariotto.pdf
8. Bicas, h. E. (2003). Oculomotricidade e seus fundamentos. *Arquivo brasileiro de oftalmologia*, 14.
9. Brites, f. G. (7 de 2008). [_https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf](https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf). Acesso em 7 de 12 de 2017, disponível em telecom uff.
10. Caramelli cb, r. M. (1997). Tumores oculares: fatores de atraso no atendimento oftalmológico. *Arq bras oftalmol*, pp. 604 - 611.
11. Cellan-jones, r. (5 de 5 de 2011). *Dot.rory a blog about technology*. Acesso em 8 de 12 de 2017, disponível em bbc: http://www.bbc.co.uk/blogs/thereporters/rorycellanjones/2011/05/a_15_computer_to_inspire_young.html
12. Chojniak, m. M., guia, t., uno, f., & erwenne, c. M. (2001). Termoterapia transpupilar em melanoma maligno da coróide. *Arq bras oftalmol*, pp. 133-138.

13. *Controlando motor de passo 28byj-48 utilizando customstepper*. (01 de 4 de 2014). Acesso em 1 de 2 de 2018, disponível em arduino e cia: <https://www.arduinoecia.com.br/2014/04/controlando-motor-de-passo-28byj-48.html>
14. Coutinho, i., teixeira, t., simões, p. C., lopes, j. C., borrego, m., fernandes, j., Proença, r. (30 de julho de 2017). Melanoma da coroideia. *Revista científica da ordem dos médicos*, pp. 573-577.
15. Cruz, d. P., & lopes, j. M. (23 de 2 de 2009). Características clínico-laboratoriais e sobrevida em doentes com melanoma. *Arquivos de medicina vol. 23, nº 2*, pp. 45-57.
16. Cruz, d. P., & lopes, j. M. (23 de 2 de 2009). Características clínico-laboratoriais e sobrevida em doentes com melanoma. *Arquivos de medicina*, pp. 45-57.
17. Cunha, a. A., rodrigues, n. H., almeida, g. A., picanço, b. C., & netto, j. A. (11 de 4 de 2009). Melanoma de corpo ciliar e coroide: relato de caso. *Arquivo brasileiro de oftalmologia*, pp. 193-196.
18. *Datasheet 28byj-48 – 5v stepper motor*. (s.d.). Acesso em 5 de 7 de 2017, disponível em robocraft: <http://robocraft.ru/files/datasheet/28byj-48.pdf>
19. Dias, r. S., giordani, a. J., erwenne, c. M., comodo, h. R., teixeira, l. F., & segredo, r. A. (fevereiro de 2017). Braquiterapia com rutênio-106 em melanomas uveais – resultados preliminares: experiência uni-institucional. *Radiol bras*, pp. 105–111.
20. Dieckmann, k., bogner, j., georg, d., zehetmayer, m., kren, g., & pötter, r. (9 de 7 de 2011). A linac-based stereotactic irradiation technique of uveal melanoma. *Radiotherapy and oncology*, pp. 49-56.
21. Dieckmann, k., georg, d., zehetmayer, m., & bogner, j. (4 de 10 de 2002). Linac based stereotactic radiotherapy of uveal melanoma: 4 years clinical experience. *Radiotherapy and oncology*, pp. 199-206.
22. Dunavoelgyi, r., dieckmann, k., gleiss, a., sacu, s., kircher, k., georgopoulos, m., . . . Zehetmayer, m. (27 de 4 de 2010). Local tumor control, visual acuity, and survival after hypofractionated stereotactic photon radiotherapy of choroidal melanoma in 212 patients treated between 1997 and 2007. *Int. J. Radiation oncology biol. Phys.*, vo, pp. 199–205.
23. Dunavoelgyi, r., dieckmann, k., gleiss, a., sacu, s., kircher, k., georgopoulos, m., . . . Poetter, r. (2011). Local tumor control, visual acuity, and survival after hypofractionated stereotactic photon radiotherapy of choroidal melanoma in 212 patients treated between 1997 and 2007. *I. J. Radiation oncology biology physics*, pp. 199-205.
24. *Esfera de rolamento*. (s.d.). Acesso em 4 de 1 de 2018, disponível em intebra : <http://www.intebra.com.br/esfera-rolamento>

25. Fctuc, d. D. (11 de 2010). *Propagação de erros independentes e aleatórios* . Acesso em 1 de 3 de 2018, disponível em site departamento de física universidade de coimbra: http://www.fis.uc.pt/data/20102011/apontamentos/apnt_5_10.pdf
26. Feis fnesp. (13 de 03 de 2013). Acesso em 7 de 12 de 2017, disponível em feis fnesp: <http://www.feis.unesp.br/home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>
27. Finger, p. T. (2009). *Eyecancer.com*. Acesso em 2 de 1 de 2018, disponível em new york eye cancer center: <https://eyecancer.com/eye-cancer/treatments/eye-and-vision-sparing-radiation-therapy-for-intraocular-tumors/>
28. Fotosearch. (03 de 02 de 2018). *Stock photograph of full-circle protractor isolated on white background*. Acesso em 03 de 2 de 2018, disponível em fotosearch: <http://www.fotosearch.com/csp145/k23511799/>
29. Fry, g., & hill, w. W. (novembro de 1962). The center of rotation of the eye. *American journal of optometry and archives of american academy of optometry*, p. 15.
30. Gerard j. Tortora, b. D. (2017). *Corpo humano - 10ed: fundamentos de anatomia e fisiologia*. Artmed.
31. Horst alheit, s. D. (5 de 2001). Patient position reproducibility in fractionated stereotactically guided conformal radiotherapy using the brainlab® mask system. *Strahlentherapie und onkologie*, pp. 1-2.
32. *How strong are our eyelids?* (13 de 10 de 2015). Acesso em 28 de 12 de 2017, disponível em quora: <https://www.quora.com/how-strong-are-our-eyelids>
33. Indefinido. (s.d.). *Enxerguebem*. Acesso em 13 de 11 de 2017, disponível em <http://enxerguebem.com.br/wp-content/uploads/2011/07/olho.jpg>
34. Júnior, a. G., neto, a. A., lima, g. C., vergini, f., & souza, t. D. (1 de 12 de 2006). Estudo de melanoma da coroide no hospital regional. *Arq bras oftalmol*, pp. 551-5.
35. Lordes, f., horta, m. D., filho, a. F., trazzi, r. M., pauli, e. A., uliana, f. S., . . . Ricard. (1996). *Apostila* . Acesso em 5 de 1 de 2018, disponível em abraman: <http://www.abraman.org.br/arquivos/72/72.pdf>
36. Mallick, s. (17 de 2 de 2015). *Blob detection using opencv (python, c++)*. Acesso em 24 de 2 de 2018, disponível em learn opencv: <https://www.learnopencv.com/blob-detection-using-opencv-python-c/>
37. Mascarenhas, f., costa, m. S., ortiz, m., almeida, a., carvalho, h., ferreira, a. G., & cattoni, m. B. (2005). A radiocirurgia estereotáxica em tumores benignos e malignos do sistema nervoso central. *Acta med port*, pp. 45-60.
38. McGraw-hill. (1978). *Eye and brain the psychology of seeing*. World university library .

39. Meca web. (2008). *Http://www.mecaweb.com.br*. Acesso em 8 de 12 de 2017, disponível em meca web: http://www.mecaweb.com.br/eletronica/content/e_motor_passo
40. Miller, j. (2 de 5 de 2015). *3d systems cube 3 review*. Acesso em 4 de 1 de 2018, disponível em cnet: <https://www.cnet.com/products/3d-systems-cube-3/review/>
41. Morales, f. C. (12 de 2011). *Trabalho de conclusão de curso aluno felipe carvalho de morales*. Acesso em 22 de 2 de 2018, disponível em site repositório unesp: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/120065/morales_fc_tcc_guara.pdf?sequence=1
42. *National cancer institute* . (21 de 12 de 2017). Acesso em 28 de 12 de 2017, disponível em cancer: <https://www.cancer.gov/types/skin/hp/melanoma-treatment-pdq>
43. Nouailhetas, y. (15 de 12 de 2017). *Documentos educativos radiação ionizantes*. Acesso em 5 de 1 de 2018, disponível em cnen: <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf>
44. Patsko, I. F. (2 de 2 de 2006). *Http://www.ebah.com.br*. Acesso em 8 de 12 de 2017, disponível em ebah: <http://www.ebah.com.br/content/abaaaf6euae/tutorial-eletronica-tutorial-eletronica-motor-passo>
45. Petruzella, f. (2013). *Motores elétricos e acionamentos: série tekne*. Bookman.
46. *Radioterapia do mãe de deus investe em máscaras para tratamento de cabeça e pescoço* . (14 de 10 de 2015). Acesso em 3 de 02 de 2018, disponível em setor saúde: <https://setorsaude.com.br/radioterapia-do-mae-de-deus-investe-em-mascaras-para-tratamento-de-cabeca-e-pescoco/>
47. Regadas, j. J. (7 de 2017). *Otimização de uma impressora 3d delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores*. Acesso em 23 de 2 de 2018, disponível em universidade do porto: https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=976393
48. Riordan-eva, p. (2010). *Oftalmologia geral de vaughan e asbury*. Mc graw hill.
49. Robinson, d. A., gordon, j. L., & gordon, a. S. (16 de abril de 1986). A model of the smooth pursuit eye movement system. *Biological cybernetics springer-verlag* , p. 15.
50. Rostelato, m. E. (2005). *Tese - estudo e desenvolvimento de uma nova metodologia para confecção de sementes de iodo-125 para aplicação em braquiterapia*. Acesso em 3 de 1 de 2018, disponível em pelicano ipen: http://pelicano.ipen.br/posg30/textocompleto/maria%20elisa%20chuery%20martins%20rostelato_d.pdf
51. Sideburn, t. (4 de 2014). *Animatronic eye mech*. Acesso em 10 de 9 de 2017, disponível em thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:319978>
52. Silva, j. V., ferreira, b. F., & pinto, h. S. (novembro de 2012). *Distúrbios da visão binocular: estrabismo e heteroforia*. Acesso em 25 de novembro de 2017, disponível em

http://www.ligadeoftalmo.ufc.br:arquivos/ed_-_estrabismos.pdf

53. Srmourasilva. (7 de 12 de 2017). Acesso em 7 de 12 de 2017, disponível em srmourasilva: https://srmourasilva.gitbooks.io/aplicacoes-praticas-de-raspberry-pi-com-pic/content/assets/raspberry_pi_-_conectores.jpeg
54. Stateham, b. (12 de 01 de 2015). *28byj-48 stepper motor and uln2003 driver intro*. Acesso em 17 de 1 de 2018, disponível em youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=b86nqdrskvu&t=9s>
55. Stolfi, g. (abril de 2008). *Televisão digital* . P. 13.
56. The pihut. (11 de 6 de 2015). *Turning on an led with your raspberry pi's gpio pins*. Acesso em 8 de 12 de 2017, disponível em the pihut: <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/27968772-turning-on-an-led-with-your-raspberry-pis-gpio-pins>
57. Wideman, g. (26 de 10 de 2016). *Grahamwideman wikispaces*. Acesso em 5 de 7 de 2017, disponível em wikispaces: <https://grahamwideman.wikispaces.com/motors-+28byj-48+stepper+motor+notes>

APÊNDICE 1 – PROGRAMAS UTILIZADOS NA MOVIMENTAÇÃO DO MOTOR

1º Programa para movimentação do motor

Segue abaixo o primeiro programa utilizado para movimentação do motor.

```
# Movimentação do motor de passo 28BYJ-48 utilizando o transistor ULN2003
# Programa baseado em exemplo retirado de (Arduino e Cia, 2015)
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
##Movimentação do Motor x
GPIO.setmode(GPIO.BCM)#referência numérica BCM para portas lógicas
GPIO.setwarnings(False)# Desativa avisos de alerta
Saida_passos_x = [21,20,16,12]#Escolhe as portas que serão utilizadas
for pin in Saida_passos_x:
    GPIO.setup(pin,GPIO.OUT) #Configura os canais como saída
    GPIO.output(pin, False)#Define o estado de saída, saída tipo
# digital – false = 0
Seq = [[1,0,0,0],[1,1,0,0],[0,1,0,0],[0,1,1,0],[0,0,1,0],[0,0,1,1],
[0,0,0,1],[1,0,0,1]] # Define a sequência de passos
Contagem_passo = len(Seq) -1
Sentido_passo_x = -2 #1 horário -1 anti-horário
Contador_de_passos_x = 0
velocidade_x = 200
#####Funções
##Movimentação
def passos_x(Sentido_passo_x):
    global Contador_de_passos_x
    for pin in range(0, 4): # Para cada porta
        xpin = Saida_passos_x[pin]
        if Seq[Contador_de_passos_x][pin] != 0:
            GPIO.output(xpin, True)#Se o Contador diferente de 0, liga
        else:
            GPIO.output(xpin, False)#Se o Contador igual a 0, desliga
    #Indo para o próximo elemento da lista de sequências
    Contador_de_passos_x += Sentido_passo_x
    if (Contador_de_passos_x >= Contagem_passo):
        Contador_de_passos_x = 0
    if (Contador_de_passos_x < 0):
        Contador_de_passos_x = Contagem_passo
    time.sleep(1/float(velocidade_x))#Espera
def desligar(): #Desliga controladora
    for pin in range(0, 4): #Desliga a energia de cada pino
        xpin = Saida_passos_x[pin]
        if Seq[Contador_de_passos_x][pin] != 0:
            GPIO.output(xpin, False)
        else:
            GPIO.output(xpin, False)
while True:
```

```

print ("medida número - >", i)
passos_h = int (input("Quantos passos andar?"))
if passos_h == 1024: #finaliza o programa
    print ("FIM!")
    break
for x in range(passos_h):
    passos_x(Sentido_passo_x)
    Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x #muda o sentido
    passos_ah = int (input("Quantos passos voltar?"))
    if passos_ah == 1024: #termina a medida
        break
    for x in range(passos_ah):
        passos_x(Sentido_passo_x)
    i = i + 1 # Contador
    Sentido_passo_x = -1*Sentido_passo_x #muda o sentido
desligar() # desliga a alimentação do motor

```

- **Programa para movimentação do motor**

Segue abaixo o primeiro programa utilizado para teste dos botões no olho mecânico movimentando os dois motores.

```

##Teste botão Por Juan Valani

import sys
import time
import RPi.GPIO as GPIO
from gpiozero import Button
##Funções
#####
##Movimentação
def passos():
    for pin in range(0, 4):
        xpin = Saida_passos_x[pin]
        if Seq[Contador_de_passos_x][pin]!=0:
            GPIO.output(xpin, True)
        else:
            GPIO.output(xpin, False)
    Contador_de_passos_x += Sentido_passo_x
    if (Contador_de_passos_x >= Contagem_passo):
        Contador_de_passos_x = 0
    if (Contador_de_passos_x < 0):
        Contador_de_passos_x = Contagem_passo
##Movimentação do Motor x (horizontal)
#####
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

```

```

Saida_passos_x = [21,20,16,12]
for pin in Saida_passos_x:
    GPIO.setup(pin,GPIO.OUT)
    GPIO.output(pin, False)
Seq = [[1,0,0,0],
        [1,1,0,0],
        [0,1,0,0],
        [0,1,1,0],
        [0,0,1,0],
        [0,0,1,1],
        [0,0,0,1],
        [1,0,0,1]]
Contagem_passo = len(Seq) -1
Sentido_passo_x = 1 #1 A:horáriohorário-1 antiA:horário
Contador_de_passos_x = 0
##Movimentação do Motor y (vertical)
#####
GPIO.setmode(GPIO.BCM) # tirar
GPIO.setwarnings(False) #tirar
Saida_passos_y = [26,19,13,6]
for pin in Saida_passos_y:
    GPIO.setup(pin,GPIO.OUT)
    GPIO.output(pin, False)
Seq = [[1,0,0,0],
        [1,1,0,0],
        [0,1,0,0],
        [0,1,1,0],
        [0,0,1,0],
        [0,0,1,1],
        [0,0,0,1],
        [1,0,0,1]]
Sentido_passo_y = 1 #1 A:horáriohorário-1 antiA:horário
Contador_de_passos_y = 0
## Definição dos botões #####
botao_esquerdo = Button(2) #(horizontal)
botao_direito = Button(4) #(horizontal)
botao_up = Button(14) #(vertical)
botao_down = Button(15) #(vertical)
#####Outras variaveis
fim_de_teste = 0 # interrupção de teste
velocidade_x = 200
velocidade_y = 200
a = 0 #provisório retirar depois
##Começo do programa##
##Botão esquerdo
#####
print("Teste 4 botões")
for i in range(300):
    ## for pin in range(0, 4):
    ## xpin = Saida_passos_x[pin]

```

```

##   if Seq[Contador_de_passos_x][pin]!=0:
##     GPIO.output(xpin, True)
##   else:
##     GPIO.output(xpin, False)
##
##   Contador_de_passos_x += Sentido_passo_x
##
##   if (Contador_de_passos_x >= Contagem_passo):
##     Contador_de_passos_x = 0
##   if (Contador_de_passos_x < 0):
##     Contador_de_passos_x = Contagem_passo
passos()

if botao_esquerdo.is_pressed:
    print ("BOTÃO ESQUERDO PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
    print ("Passos igual A:",i)
    break
if i > 50 and botao_direito.is_pressed:
    print ("ERRO: CIRCUITO INVERTIDO. FAVOR CORRIGIR")
    fim_de_teste = 1
    break
time.sleep(1/float(velocidade_x))

if botao_esquerdo.is_pressed != True :
    fim_de_teste = 1
    print ("ERRO, BOTÃO ESQUERDO NÃO PRESSIONADO, FAVOR CORRIGIR!")

## Teste botão direito
#####

Sentido_passo_x = -1 #1 A:horáriohorário-1 antiA:horário

for i in range(300):

    if fim_de_teste == 1: ## impede se houver problema nos testes anteriores
        break

    for pin in range(0, 4):
        xpin = Saida_passos_x[pin]
        if Seq[Contador_de_passos_x][pin]!=0:
            GPIO.output(xpin, True)
        else:
            GPIO.output(xpin, False)
        Contador_de_passos_x += Sentido_passo_x
    if (Contador_de_passos_x >= Contagem_passo):
        Contador_de_passos_x = 0
    if (Contador_de_passos_x < 0):
        Contador_de_passos_x = Contagem_passo

```

```

if botao_direito.is_pressed:
    print ("Botão DIREITO PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
    print ("Passos igual A:",i)
    break
if i > 50 and botao_esquerdo.is_pressed:
    print ("ERRO! FAVOR CORRIGIR", i)
    break
time.sleep(1/float(velocidade_x))
## Teste botão up
#####
for i in range(300):
    if fim_de_teste == 1: ## impede se houver problema nos testes anteriores
        break

    for pin in range(0, 4):
        ypin = Saida_passos_y[pin]
        if Seq[Contador_de_passos_y][pin]!=0:
            GPIO.output(ypin, True)
        else:
            GPIO.output(ypin, False)

    Contador_de_passos_y += Sentido_passo_y

    if (Contador_de_passos_y >= Contagem_passo):
        Contador_de_passos_y = 0
    if (Contador_de_passos_y < 0):
        Contador_de_passos_y = Contagem_passo

    if botao_up.is_pressed:
        print ("Botão UP PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
        print ("Passos igual A:",i)
        break

    if i > 50 and botao_up.is_pressed:
        print ("ERRO: CIRCUITO VERTICAL INVERTIDO. FAVOR CORRIGIR")
        fim_de_teste = 1
        break
    time.sleep(1/float(velocidade_y))

if botao_up.is_pressed != True :
    fim_de_teste = 0
    print ("ERRO, BOTÃO UP NÃO PRESSIONADO, FAVOR CORRIGIR!")
## Teste botão down#####
Sentido_passo_y = -1 #1 A:horáriohorário-1 antiA:horário

for i in range(300):

    if fim_de_teste == 1: ## impede se houver problema nos testes anteriores
        break

```

```

for pin in range(0, 4):
    ypin = Saida_passos_y[pin]
    if Seq[Contador_de_passos_y][pin]!=0:
        GPIO.output(ypin, True)
    else:
        GPIO.output(ypin, False)

Contador_de_passos_y += Sentido_passo_y

if (Contador_de_passos_y >= Contagem_passo):
    Contador_de_passos_y = 0
if (Contador_de_passos_y < 0):
    Contador_de_passos_y = Contagem_passo

if botao_down.is_pressed:
    print ("BOTÃO DOWN PRESSIONADO, CORRETAMENTE")
    print ("Passos igual A:",i)
    break
if i > 50 and botao_up.is_pressed:
    print ("ERRO! FAVOR CORRIGIR", i)
    break
time.sleep(1/float(velocidade_y))

print ("          TESTE DE BOTÕES COMPLETO  ")

```

APÊNDICE 2 – MEDIDAS GONIÔMETRO MODELO 1

Segue abaixo as tabelas com as medidas realizadas utilizando a primeira montagem do goniômetro.

			Medida 1				Medida 2
Passos	$\theta \pm 0,5^\circ$	Tempo (s)	Velocidade (θ/s)	Passos	$\theta \pm 0,5^\circ$	Tempo (s)	Velocidade (θ/s)
200	37,0	1	42	200	35,0	1	47
400	70,5	2	40	400	69,5	1	47
600	104,5	3	40	600	104,5	2	47
800	138,5	4	40	800	140,0	3	47
1000	172,5	4	39	1000	172,5	4	47
1200	207,0	5	39	1200	207,0	4	47
1400	243,0	6	40	1400	242,5	5	47
1600	278,5	7	40	1600	278,0	6	47
1800	314,5	8	40	1800	315,0	7	47
2000	350,5	9	40	2000	350,5	7	47

Tabela 11- 1° e 2° medidas da variação angular e da velocidade. Modelo 1 do goniômetro.

			Medida 3				Medida 4
Passos	$\theta \pm 0,5^\circ$	Tempo (s)	Velocidade(θ/s)	Passos	$\theta \pm 0,5^\circ$	Tempo (s)	Velocidade (θ/s)
200	36,30	1	57	200	36,0	1	64
400	70,5	1	54	400	71,0	1	63
600	10,5	2	54	600	105,0	2	61
800	139,0	3	54	800	139,0	2	62
1000	173,5	3	55	1000	173,0	3	61
1200	207,0	4	54	1200	207,0	3	61
1400	243,5	4	55	1400	243,0	4	61
1600	278,0	5	54	1600	278,0	5	62
1800	315,5	6	54	1800	315,5	5	62
2000	351,0	6	55	2000	351,5	6	62

Tabela 12- 3° e 4° medidas da variação angular e da velocidade. Modelo 1 do goniômetro.

			Medida 5
Passos	$\theta \pm 0,5^\circ$	Tempo (s)	Velocidade(θ/s)
200	36,0	1	72
400	70,5	1	70
600	106,0	2	69
800	139,0	2	69
1000	173,5	3	68
1200	206,5	3	68
1400	243,5	4	69
1600	279,5	4	69
1800	315,5	5	69
2000	345,5	5	69

Tabela 13- 5° medida da variação angular e da velocidade. Modelo 1 do goniômetro.

APÊNDICE 3 – MEDIDAS PARA O MODELO CONTENDO DOIS “HOME”S

Sentido inicial: Anti-horário				
N	Passos Anti-horária	Média (graus)	Desvio (graus)	Incerteza (graus)
1	5	0,57	0,15	0,04
2	10	0,98	0,07	0,02
3	15	1,36	0,19	0,05
4	20	1,88	0,15	0,04
5	25	2,32	0,22	0,06
6	30	2,79	0,19	0,05
7	35	3,30	0,19	0,05
8	40	3,64	0,11	0,03
9	45	4,21	0,15	0,04
10	50	4,77	0,19	0,05
11	55	5,27	0,15	0,04

Tabela 14- Média de passos no sentido Anti-horário, a partir de passos no sentido anti-horário.

Sentido inicial : Anti-horário				
N	Passos horários	Média (graus)	Desvio (graus)	Incerteza (graus)
1	20	0,59	0,11	0,03
2	25	0,91	0,11	0,03
3	30	1,13	0,25	0,04
4	35	1,50	0,00	0,00
5	40	1,96	0,07	0,02
6	45	2,39	0,11	0,03
7	50	2,82	0,11	0,03
8	55	3,18	0,15	0,04
9	60	3,68	0,22	0,06
10	65	4,05	0,11	0,03
11	70	4,48	0,07	0,02
12	75	4,95	0,11	0,03
13	80	5,38	0,15	0,04

Tabela 15- Média de passos no sentido horário, a partir de passos no sentido anti-horário.

Sentido inicial: horário				
N	Passos horário	Média (graus)	Desvio (graus)	Incerteza (graus)
1	5	0,57	0,11	0,03
2	10	1,02	0,11	0,03
3	15	1,52	0,111	0,03
4	20	1,89	0,11	0,03
5	25	2,38	0,11	0,03
6	30	2,89	0,19	0,05
7	35	3,14	0,11	0,03
8	40	3,68	0,11	0,03
9	45	4,11	0,15	0,04
10	50	4,54	0,11	0,02
11	55	4,91	0,11	0,03
12	60	5,57	0,15	0,03

Tabela 16 - Média de passos no sentido horário, a partir de passos no sentido horário.

Sentido inicial: horário				
N	Passos Anti-horários	média (graus)	Desvio (graus)	Incerteza (graus)
1	5	0,41	0,11	0,03
2	10	0,89	0,11	0,03
3	15	1,23	0,22	0,06
4	20	1,34	0,22	0,06
5	25	1,43	0,15	0,04
6	30	1,79	0,22	0,06
7	35	2,09	0,11	0,03
8	40	2,46	0,07	0,02
9	45	2,77	0,07	0,02
10	50	3,21	0,15	0,04
11	55	3,57	0,11	0,03
12	60	4,04	0,07	0,02
13	65	4,61	0,15	0,04
14	70	5,05	0,11	0,03

Tabela 17- Média de passos no sentido horário, a partir de passos no sentido anti-horário.

APÊNDICE 4 – MEDIDAS PARA VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

Medidas para validação da metodologia para calibração da câmera (graus)																							
Ângulo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
0,5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,75	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,00	
1,5	1,50	1,50	1,50	1,75	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
2	2,00	2,00	2,00	2,25	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,25	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,25	2,00	2,00
2,5	2,50	2,50	2,50	2,25	2,50	2,25	2,50	2,50	2,50	2,25	2,50	2,50	2,50	2,50	2,25	2,25	2,50	2,25	2,50	2,25	2,50	2,50	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
-0,5	-0,50	-	-	-0,75	-0,5	-0,75	-0,50	-0,50	-	-0,50	-0,75	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-	-	-	-0,50	-0,50	-0,50	
-1	-1,00	-	-	-1,00	-	-1,00	-0,75	-1,00	-	-0,75	-0,75	-0,75	-1,00	-1,00	-0,75	-1,00	-	-	-	-0,75	-0,75	-1,00	
-2	-1,50	-	-	-1,50	-	-1,50	-1,50	-1,50	-	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,25	-1,50	-1,50	-	-	-	-1,50	-1,25	-2,00	
-2,25	-2,00	-	-	-2,00	-	-2,00	-2,00	-2,00	-	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-1,75	-2,00	-2,00	-	-	-	-2,00	-1,75	-2,25	
-2,5	-2,50	-	-	-2,50	-	-2,50	-2,50	-2,50	-	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,25	-	-	-	-2,50	-2,50	-2,50	

Tabela 18 - Medidas feitas para verificação do procedimento de retorno ao zero. Valores são dados em graus. N=22.

APÊNDICE 5 – DESENHOS E MEDIDAS DAS PEÇAS IMPRESSAS

Todos os valores abaixo estão cotados em milímetros e foram medidos utilizando o próprio software AutoCad®.

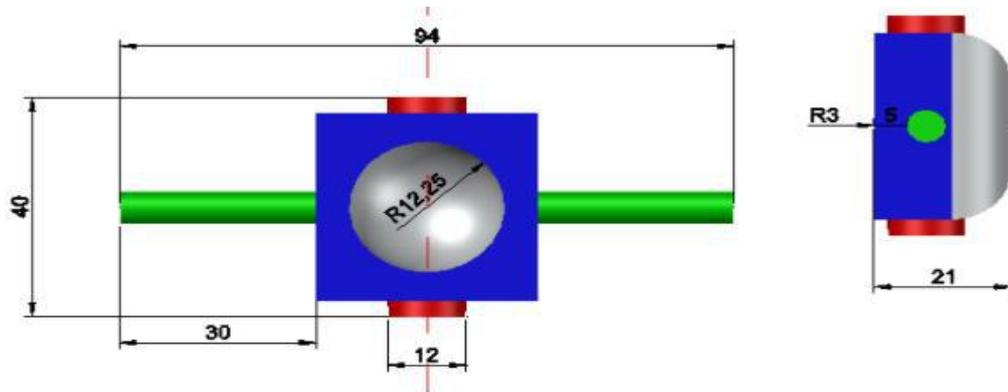


Figura 45- Suporte para o olho– eixo vertical. Medidas em milímetros.

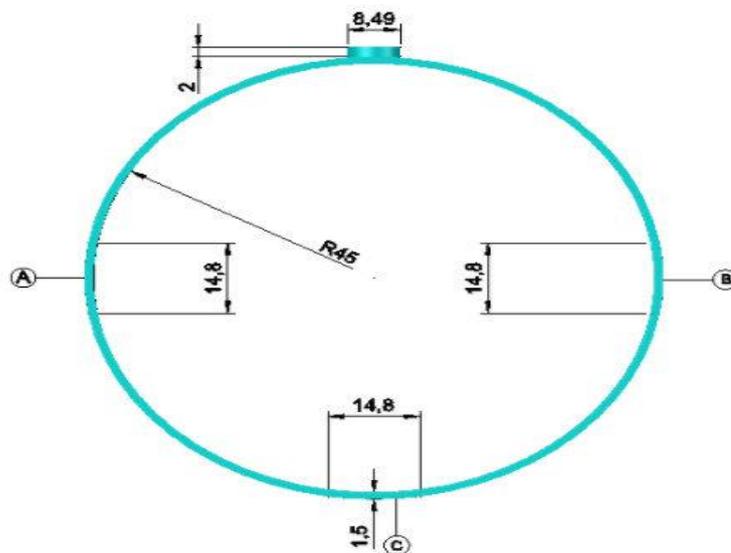


Figura 46 - Círculo para movimentação horizontal. Medidas em milímetros.

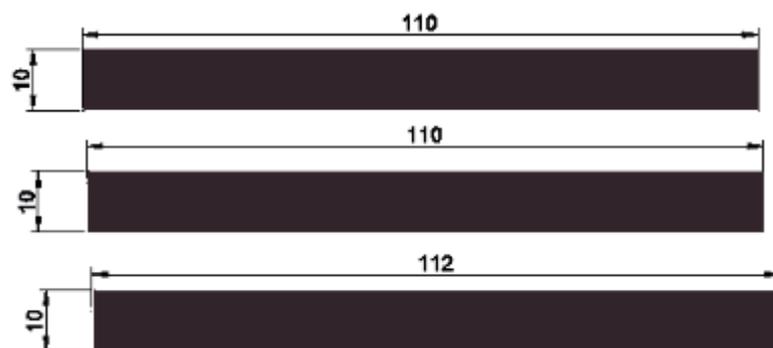


Figura 47 - Suportes para estrutura de giro. Medidas em milímetros.

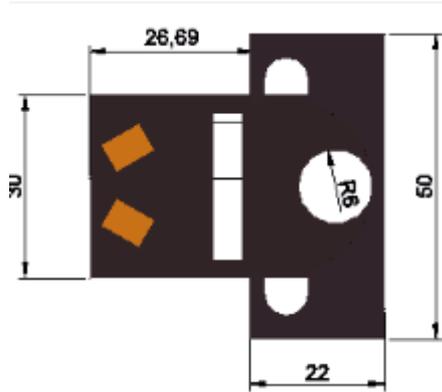


Figura 48 - Sistema de “home” motor 2. Medidas em milímetros.

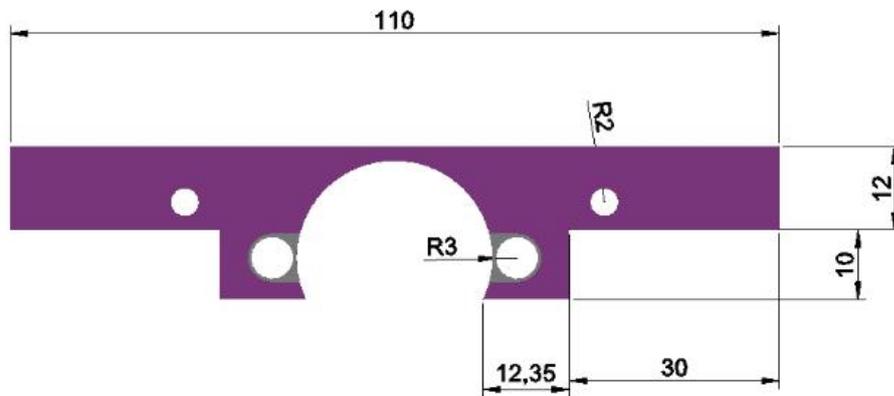


Figura 49 - Suporte motor 1. Medidas em milímetros.

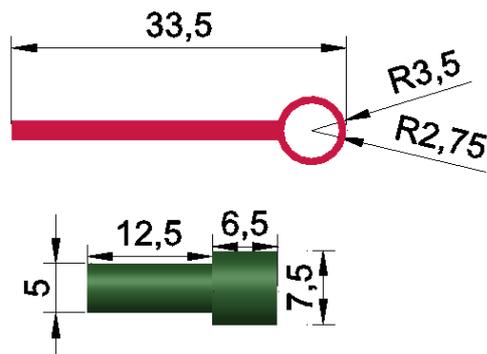


Figura 50 - Eixo Motor e ponteiro onde será colocado o “jumper”. Medidas em milímetros.

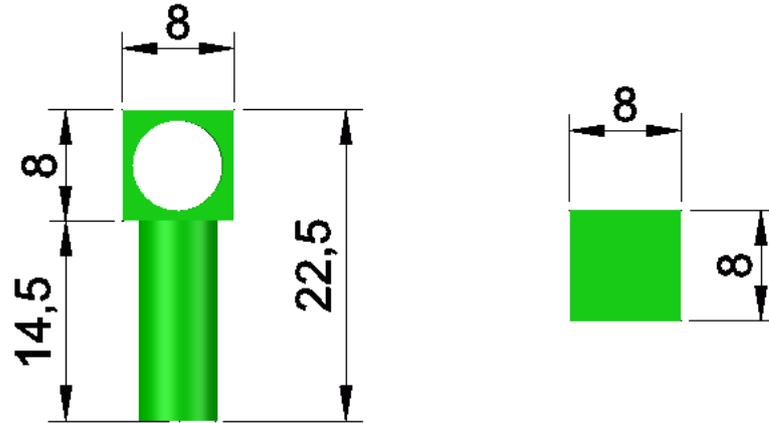


Figura 51 - Pino de conexão com o eixo vertical. Medidas em milímetros.

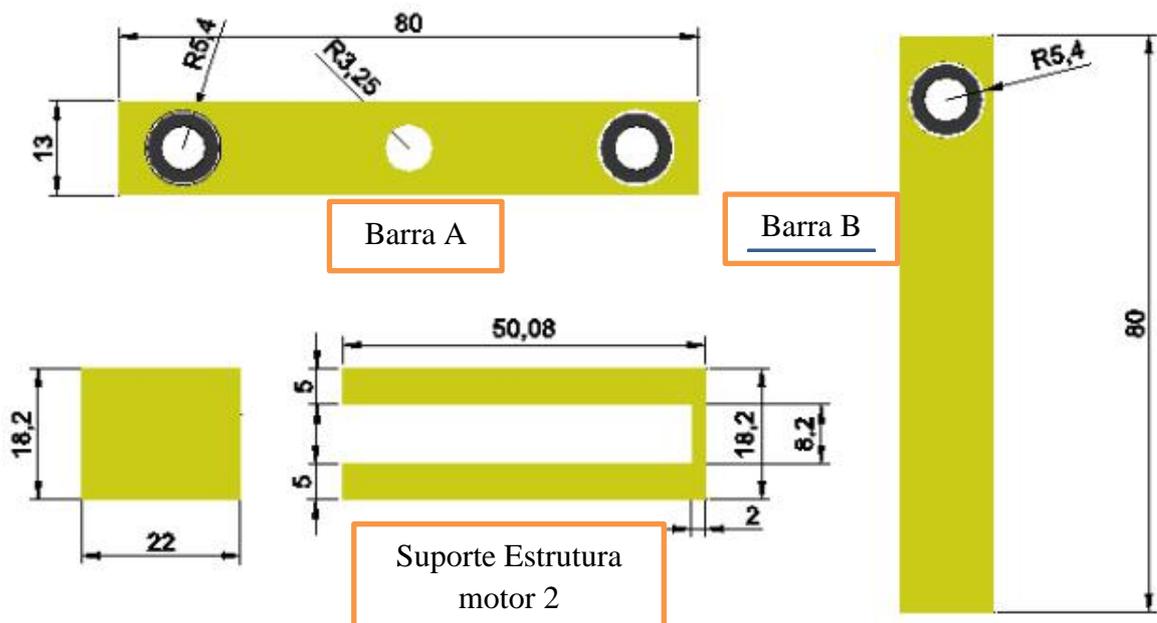


Figura 52 - Suporte para motor 2 , barra A e barra B. Medidas em milímetros.

APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS MEDIDAS DE MOVIMENTAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DO OLHO MECÂNICO

○ **Medidas eixo horizontal**

1					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm) $\pm 0,3$	$a-Co$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus) $\pm 0,003$
35,8	33,2	105,3	21,9	104	11,988
36,2	30,8	105,3	22,3	104	12,208
36,2	28,2	105,3	22,3	104	12,208
36,2	25,7	105,3	22,3	104	12,208
36,8	23,9	105,3	22,9	104	12,539
37,1	22,1	105,3	23,2	104	12,705
37,1	20,0	105,3	23,2	104	12,705
37,1	17,8	105,3	23,2	104	12,705
37,2	15,4	105,3	23,3	104	12,760
37,6	13,1	105,3	23,7	104	12,981

Tabela 19 – Medida 1. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
19,3	103,7	0,4	10,6	0,4	1,4	0,4	0,7	0,2
16,9	103,7	0,4	9,2	0,4	3,0	0,4	1,5	0,2
14,3	103,8	0,3	7,8	0,4	4,4	0,4	2,2	0,2
11,8	103,9	0,3	6,4	0,3	5,8	0,3	2,9	0,2
10,0	104,0	0,3	5,4	0,3	7,1	0,3	3,6	0,1
8,2	104,2	0,3	4,4	0,3	8,3	0,3	4,1	0,1
6,1	104,4	0,2	3,3	0,2	9,4	0,2	4,7	0,1
3,9	104,7	0,2	2,1	0,2	10,6	0,2	5,3	0,1
1,5	105,0	0,2	0,8	0,2	12,0	0,2	6,0	0,1
-0,8	105,4	0,2	-0,4	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 20- Medida 1. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

2					
X_0 (cm) \pm 0,2	X_f (cm) \pm 0,2	b (cm) \pm 0,2	Co (cm)	$a-Co$ (cm)	Θ_0 (graus)
36,0	33,3	105,3	22,1	104	12,098
36,0	30,6	105,3	22,1	104	12,098
36,3	28,2	105,3	22,4	104	12,264
36,3	25,6	105,3	22,4	104	12,264
36,9	23,9	105,3	23,0	104	12,595
36,9	21,9	105,3	23,0	104	12,595
36,9	20,3	105,3	23,0	104	12,595
37,2	17,9	105,3	23,3	104	12,760
37,2	15,4	105,3	23,3	104	12,760
37,2	12,8	105,3	23,3	104	12,760

Tabela 21 – Medida 2. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) \pm 0,3	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
19,4	103,7	0,4	10,6	0,4	1,5	0,4	0,7	0,2
16,7	103,7	0,4	9,1	0,4	3,0	0,4	1,5	0,2
14,3	103,8	0,3	7,8	0,4	4,5	0,4	2,2	0,2
11,7	103,9	0,3	6,4	0,3	5,9	0,3	3,0	0,2
10,0	104,0	0,3	5,4	0,3	7,2	0,3	3,6	0,1
8,0	104,2	0,3	4,3	0,3	8,3	0,3	4,1	0,1
6,4	104,4	0,2	3,5	0,2	9,1	0,2	4,6	0,1
4,0	104,7	0,2	2,1	0,2	10,6	0,2	5,3	0,1
1,5	105,0	0,2	0,8	0,2	12,0	0,2	6,0	0,1
-1,1	105,5	0,2	-0,6	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 22 - Medida 2. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

3					
X_0 (cm) \pm 0,2	X_f (cm) \pm 0,2	b (cm) \pm 0,2	Co (cm)	$a-Co$ (cm)	Θ_0 (graus)
35,3	32,5	105,3	21,4	104	11,712
35,4	29,9	105,3	21,5	104	11,767
35,4	27,2	105,3	21,5	104	11,767
35,6	25,1	105,3	21,7	104	11,877
35,9	22,9	105,3	22,0	104	12,043
36,2	21,2	105,3	22,3	104	12,208
36,3	19,1	105,3	22,4	104	12,264
36,3	16,8	105,3	22,4	104	12,264
36,8	15,1	105,3	22,9	104	12,539
36,9	12,5	105,3	23,0	104	12,595

Tabela 23 – Medida 3. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) \pm 0,3	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
18,6	103,7	0,4	10,2	0,4	1,5	0,4	0,8	0,2
16,0	103,7	0,4	8,7	0,4	3,0	0,4	1,5	0,2
13,3	103,8	0,3	7,2	0,3	4,5	0,3	2,3	0,2
11,2	103,9	0,3	6,1	0,3	5,8	0,3	2,9	0,2
9,0	104,1	0,3	4,9	0,3	7,2	0,3	3,6	0,1
7,3	104,3	0,2	3,9	0,3	8,3	0,3	4,1	0,1
5,2	104,5	0,2	2,8	0,2	9,5	0,2	4,7	0,1
2,9	104,8	0,2	1,6	0,2	10,7	0,2	5,4	0,1
1,2	105,1	0,2	0,6	0,2	11,9	0,2	6,0	0,1
-1,4	105,5	0,2	-0,8	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 24 - Medida 3. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos *erros*.

4					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	C_0 (cm)	$a-C_0$ (cm)	Θ_0 (graus)
35,8	33,2	105,3	21,9	104	11,988
36,2	30,8	105,3	22,3	104	12,208
36,2	28,2	105,3	22,3	104	12,208
36,2	25,7	105,3	22,3	104	12,208
36,8	23,9	105,3	22,9	104	12,539
37,1	22,1	105,3	23,2	104	12,705
37,1	20,0	105,3	23,2	104	12,705
37,1	17,8	105,3	23,2	104	12,705
37,2	15,4	105,3	23,3	104	12,760
37,6	13,1	105,3	23,7	104	12,981

Tabela 25 – Medida 4. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-C_0$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
19,3	103,7	0,4	10,6	0,4	1,4	0,4	0,7	0,2
16,9	103,7	0,4	9,2	0,4	3,0	0,4	1,5	0,2
14,3	103,8	0,3	7,8	0,4	4,4	0,4	2,2	0,2
11,8	103,9	0,3	6,4	0,3	5,8	0,3	2,9	0,2
10,0	104,0	0,3	5,4	0,3	7,1	0,3	3,6	0,1
8,2	104,2	0,3	4,4	0,3	8,3	0,3	4,1	0,1
6,1	104,4	0,2	3,3	0,2	9,4	0,2	4,7	0,1
3,9	104,7	0,2	2,1	0,2	10,6	0,2	5,3	0,1
1,5	105,0	0,2	0,8	0,2	12,0	0,2	6,0	0,1
-0,8	105,4	0,2	-0,4	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 26 - Medida 4. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

5		X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	C_0 (cm)	$a-C_0$ (cm)	Θ_0 (graus)
		36,2	33,7	105,3	22,3	104	12,208
		36,4	30,9	105,3	22,5	104	12,319
		36,2	28,3	105,3	22,3	104	12,208
		36,8	26,5	105,3	22,9	104	12,539
		36,8	23,9	105,3	22,9	104	12,539
		36,8	21,9	105,3	22,9	104	12,539
		37,1	20,0	105,3	23,2	104	12,705
		37,1	17,9	105,3	23,2	104	12,705
		37,2	15,9	105,3	23,3	104	12,760
		37,2	12,8	105,3	23,3	104	12,760

Tabela 27 - Medida 5. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-C_0$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
19,8	103,7	0,4	10,8	0,4	1,4	0,4	0,7	0,2
17,0	103,7	0,4	9,3	0,4	3,0	0,4	1,5	0,2
14,4	103,8	0,3	7,8	0,4	4,4	0,4	2,2	0,2
12,6	103,8	0,3	6,9	0,3	5,7	0,3	2,8	0,2
10,0	104,0	0,3	5,4	0,3	7,1	0,3	3,6	0,1
8,0	104,2	0,3	4,3	0,3	8,2	0,3	4,1	0,1
6,1	104,4	0,2	3,3	0,2	9,4	0,2	4,7	0,1
4,0	104,7	0,2	2,1	0,2	10,6	0,2	5,3	0,1
2,0	105,0	0,2	1,1	0,2	11,7	0,2	5,8	0,1
-1,1	105,5	0,2	-0,6	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 28 - Medida 6. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

6					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	$a-Co$ (cm)	Θ_0 (graus)
36,2	33,7	105,3	22,3	104	12,208
36,9	31,7	105,3	23,0	104	12,595
36,9	29,1	105,3	23,0	104	12,595
36,9	26,4	105,3	23,0	104	12,595
37,1	24,2	105,3	23,2	104	12,705
37,1	22,1	105,3	23,2	104	12,705
37,1	20,1	105,3	23,2	104	12,705
37,2	17,9	105,3	23,3	104	12,760
37,5	15,7	105,3	23,6	104	12,925
37,6	13,2	105,3	23,7	104	12,981

Tabela 29 – Medida 6. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na horizontal. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
19,8	103,7	0,4	10,8	0,4	1,4	0,4	0,7	0,2
17,8	103,7	0,4	9,7	0,4	2,9	0,4	1,4	0,2
15,2	103,7	0,4	8,3	0,4	4,3	0,4	2,2	0,2
12,5	103,8	0,3	6,8	0,3	5,8	0,3	2,9	0,2
10,3	104,0	0,3	5,6	0,3	7,1	0,3	3,6	0,1
8,2	104,2	0,3	4,4	0,3	8,3	0,3	4,1	0,1
6,2	104,4	0,2	3,3	0,2	9,4	0,2	4,7	0,1
4,0	104,7	0,2	2,1	0,2	10,6	0,2	5,3	0,1
1,8	105,0	0,2	1,0	0,2	12,0	0,2	6,0	0,1
-0,7	105,4	0,2	-0,4	0,2	13,4	0,2	6,7	0,1

Tabela 30 - Medida 6. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

○ **Medidas eixo vertical**

1					
X_0 (cm) \pm 0,2	X_f (cm) \pm 0,2	b (cm) \pm 0,2	C_0 (cm) \pm 0,3	$a-C_0$ (cm) \pm 1	Θ_0 (graus) \pm 0,003
13,5	16,6	103,3	-3,5	104	-1,900
13,1	19,1	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	21,8	103,3	-3,9	104	-2,116
13,0	24,4	103,3	-4,0	104	-2,170
13,1	27,4	103,3	-3,9	104	-2,116
13,0	31,4	103,3	-4,0	104	-2,170
13,1	33,0	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	35,6	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	37,7	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	40,6	103,3	-3,9	104	-2,116

Tabela 31 - Medida 1. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) \pm 0,3	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-C_0$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-0,4	103,4	0,2	-0,2	0,2	1,7	0,2	0,8	0,1
2,1	102,9	0,2	1,2	0,2	3,3	0,2	1,6	0,1
4,8	102,6	0,2	2,6	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,4	102,3	0,2	4,1	0,3	6,3	0,3	3,1	0,1
10,4	102,0	0,3	5,8	0,3	7,9	0,3	3,9	0,1
14,4	101,8	0,3	8,0	0,3	10,2	0,3	5,1	0,2
16,0	101,7	0,4	8,9	0,4	11,0	0,4	5,5	0,2
18,6	101,7	0,4	10,4	0,4	12,5	0,4	6,2	0,2
20,7	101,7	0,4	11,6	0,5	13,7	0,5	6,8	0,2
23,6	101,9	0,5	13,2	0,5	15,3	0,5	7,7	0,3

Tabela 32 - Medida 1 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

2					
X0 (cm) $\pm 0,2$	Xf (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	a-Co (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
12,8	15,6	103,3	-4,2	104	-2,277
12,6	18,4	103,3	-4,4	104	-2,385
12,9	21,6	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	24,2	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	27,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	30,2	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	32,9	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	35,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	37,7	103,3	-4,1	104	-2,224
13,0	40,5	103,3	-4,0	104	-2,170

Tabela 34 - Medida 2. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. Xo e Xf medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

Cf (cm) $\pm 0,3$	a-Cf (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta \Theta_1$ (graus)	$\Delta \Theta$ (graus)	$\delta \Delta \Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta \beta$ (graus)
-1,4	103,5	0,2	-0,8	0,2	1,5	0,2	0,8	0,1
1,4	103,0	0,2	0,8	0,2	3,2	0,2	1,6	0,1
4,6	102,6	0,2	2,5	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,2	102,3	0,2	4,0	0,2	6,2	0,2	3,1	0,1
10,3	102,0	0,3	5,7	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,2	101,8	0,3	7,3	0,3	9,6	0,3	4,8	0,2
15,9	101,7	0,4	8,9	0,4	11,1	0,4	5,5	0,2
18,3	101,7	0,4	10,2	0,4	12,4	0,4	6,2	0,2
20,7	101,7	0,4	11,6	0,5	13,8	0,5	6,9	0,2
23,5	101,9	0,5	13,1	0,5	15,3	0,5	7,7	0,3

Tabela 33- Medida 2 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de Cf, a-Cf, Θ_1 e $\Delta \Theta$. Bem como seus respectivos erros.

3					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	$a-Co$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
12,6	15,4	103,3	-4,4	104	-2,385
12,6	18,4	103,3	-4,4	104	-2,385
12,9	21,6	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	24,2	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	27,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	30,2	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	32,9	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	35,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	37,7	103,3	-4,1	104	-2,224
13,0	40,5	103,3	-4,0	104	-2,170

Tabela 35- Medida 3. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-1,6	103,6	0,2	-0,9	0,2	1,5	0,2	0,8	0,1
1,4	103,0	0,2	0,8	0,2	3,2	0,2	1,6	0,1
4,6	102,6	0,2	2,5	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,2	102,3	0,2	4,0	0,2	6,2	0,2	3,1	0,1
10,3	102,0	0,3	5,7	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,2	101,8	0,3	7,3	0,3	9,6	0,3	4,8	0,2
15,9	101,7	0,4	8,9	0,4	11,1	0,4	5,5	0,2
18,3	101,7	0,4	10,2	0,4	12,4	0,4	6,2	0,2
20,7	101,7	0,4	11,6	0,5	13,8	0,5	6,9	0,2
23,5	101,9	0,5	13,1	0,5	15,3	0,5	7,7	0,3

Tabela 36- Medida 3 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

4					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	C_0 (cm)	$a-C_0$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
13,1	16,1	103,3	-3,9	104	-2,116
13,4	19,5	103,3	-3,6	104	-1,954
13,3	22,0	103,3	-3,7	104	-2,008
13,3	24,5	103,3	-3,7	104	-2,008
13,2	27,6	103,3	-3,8	104	-2,062
13,1	30,5	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	33,2	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	35,6	103,3	-3,9	104	-2,116
13,1	37,9	103,3	-3,9	104	-2,116
12,9	40,2	103,3	-4,1	104	-2,224

Tabela 37- Medida 4. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-C_0$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-0,9	103,4	0,2	-0,5	0,2	1,6	0,2	0,8	0,1
2,5	102,9	0,2	1,4	0,2	3,3	0,2	1,7	0,1
5,0	102,5	0,2	2,8	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,5	102,2	0,2	4,1	0,3	6,2	0,3	3,1	0,1
10,6	102,0	0,3	5,9	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,5	101,8	0,3	7,5	0,3	9,6	0,3	4,8	0,2
16,2	101,7	0,4	9,0	0,4	11,1	0,4	5,6	0,2
18,6	101,7	0,4	10,4	0,4	12,5	0,4	6,2	0,2
20,9	101,8	0,4	11,7	0,5	13,8	0,5	6,9	0,2
23,2	101,8	0,5	13,0	0,5	15,2	0,5	7,6	0,2

Tabela 38- Medida 4 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

5					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	C_0 (cm)	$a-C_0$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
13,0	15,9	103,3	-4,0	104	-2,170
12,9	18,9	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	21,7	103,3	-4,1	104	-2,224
13,0	24,3	103,3	-4,0	104	-2,170
13,0	27,5	103,3	-4,0	104	-2,170
12,9	30,4	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	33,0	103,3	-4,1	104	-2,224
13,0	35,4	103,3	-4,0	104	-2,170
13,0	37,8	103,3	-4,0	104	-2,170
12,8	40,1	103,3	-4,2	104	-2,277

Tabela 39- Medida 5. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-C_0$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-1,1	103,5	0,2	-0,6	0,2	1,6	0,2	0,8	0,1
1,9	103,0	0,2	1,0	0,2	3,3	0,2	1,6	0,1
4,7	102,6	0,2	2,6	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,3	102,3	0,2	4,0	0,3	6,2	0,3	3,1	0,1
10,5	102,0	0,3	5,8	0,3	8,0	0,3	4,0	0,1
13,4	101,8	0,3	7,4	0,3	9,7	0,3	4,8	0,2
16,0	101,7	0,4	8,9	0,4	11,1	0,4	5,6	0,2
18,4	101,7	0,4	10,3	0,4	12,4	0,4	6,2	0,2
20,8	101,8	0,4	11,6	0,5	13,8	0,5	6,9	0,2
23,1	101,8	0,5	12,9	0,5	15,2	0,5	7,6	0,2

Tabela 40- Medida 5 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

6						
X0 (cm) $\pm 0,2$	Xf (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	a-Co (cm) ± 1	Θ_0 (graus)	
12,9	15,0	103,3	-4,1	104	-2,224	
12,6	18,4	103,3	-4,4	104	-2,385	
12,6	21,4	103,3	-4,4	104	-2,385	
13,2	24,1	103,3	-3,8	104	-2,062	
12,6	27,0	103,3	-4,4	104	-2,385	
12,9	30,3	103,3	-4,1	104	-2,224	
12,7	32,9	103,3	-4,3	104	-2,331	
12,7	35,4	103,3	-4,3	104	-2,331	
12,7	37,5	103,3	-4,3	104	-2,331	
12,7	40,1	103,3	-4,3	104	-2,331	

Tabela 41- Medida 6. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X0 e Xf medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

Cf(cm) $\pm 0,3$	a-Cf (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta \Theta_1$ (graus)	$\Delta \Theta$ (graus)	$\delta \Delta \Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta \beta$ (graus)
-2,0	103,6	0,2	-1,1	0,2	1,1	0,2	0,6	0,1
1,4	103,0	0,2	0,8	0,2	3,2	0,2	1,6	0,1
4,4	102,6	0,2	2,4	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,1	102,3	0,2	3,9	0,2	6,0	0,2	3,0	0,1
10,0	102,0	0,3	5,5	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,3	101,8	0,3	7,4	0,3	9,6	0,3	4,8	0,2
15,9	101,7	0,4	8,9	0,4	11,2	0,4	5,6	0,2
18,4	101,7	0,4	10,3	0,4	12,6	0,4	6,3	0,2
20,5	101,7	0,4	11,4	0,4	13,8	0,4	6,9	0,2
23,1	101,8	0,5	12,9	0,5	15,2	0,5	7,6	0,2

Tabela 42- Medida 6 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de Cf, a-Cf, Θ_1 e $\Delta \Theta$. Bem como seus respectivos erros.

7					
X0 (cm) $\pm 0,2$	Xf (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	a-Co (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
12,9	15,9	103,3	-4,1	104	-2,224
12,6	18,4	103,3	-4,4	104	-2,385
12,6	21,3	103,3	-4,4	104	-2,385
12,7	24,2	103,3	-4,3	104	-2,331
12,6	27,0	103,3	-4,4	104	-2,385
12,9	30,4	103,3	-4,1	104	-2,224
12,7	32,7	103,3	-4,3	104	-2,331
12,8	35,3	103,3	-4,2	104	-2,277
12,8	37,4	103,3	-4,2	104	-2,277
12,7	40,0	103,3	-4,3	104	-2,331

Tabela 43- Medida 7. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. Xo e Xf medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

Cf(cm) $\pm 0,3$	a-Cf (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-1,1	103,5	0,2	-0,6	0,2	1,6	0,2	0,8	0,1
1,4	103,0	0,2	0,8	0,2	3,2	0,2	1,6	0,1
4,3	102,6	0,2	2,4	0,2	4,7	0,2	2,4	0,1
7,2	102,3	0,2	4,0	0,2	6,3	0,2	3,2	0,1
10,0	102,0	0,3	5,5	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,4	101,8	0,3	7,4	0,3	9,7	0,3	4,8	0,2
15,7	101,7	0,4	8,7	0,4	11,1	0,4	5,5	0,2
18,3	101,7	0,4	10,2	0,4	12,5	0,4	6,2	0,2
20,4	101,7	0,4	11,4	0,4	13,7	0,4	6,8	0,2
23,0	101,8	0,5	12,9	0,5	15,2	0,5	7,6	0,2

Tabela 44- Medida 7 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de Cf, a-Cf, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

8					
X0 (cm) $\pm 0,2$	Xf (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	a-Co (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
12,9	16,0	103,3	-4,1	104	-2,224
12,6	17,9	103,3	-4,4	104	-2,385
12,6	21,4	103,3	-4,4	104	-2,385
12,6	24,1	103,3	-4,4	104	-2,385
12,6	27,0	103,3	-4,4	104	-2,385
12,9	30,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,6	32,7	103,3	-4,4	104	-2,385
12,7	35,3	103,3	-4,3	104	-2,331
12,7	37,4	103,3	-4,3	104	-2,331
12,9	40,1	103,3	-4,1	104	-2,224

Tabela 45- Medida 8. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. Xo e Xf medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

Cf(cm) $\pm 0,3$	a-Cf (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-1,0	103,5	0,2	-0,5	0,2	1,7	0,2	0,8	0,1
0,9	103,1	0,2	0,5	0,2	2,9	0,2	1,4	0,1
4,4	102,6	0,2	2,4	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,1	102,3	0,2	3,9	0,2	6,3	0,2	3,2	0,1
10,0	102,0	0,3	5,5	0,3	7,9	0,3	4,0	0,1
13,3	101,8	0,3	7,4	0,3	9,6	0,3	4,8	0,2
15,7	101,7	0,4	8,7	0,4	11,1	0,4	5,6	0,2
18,3	101,7	0,4	10,2	0,4	12,5	0,4	6,3	0,2
20,4	101,7	0,4	11,4	0,4	13,7	0,4	6,9	0,2
23,1	101,8	0,5	12,9	0,5	15,1	0,5	7,6	0,2

Tabela 46- Medida 8 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de Cf, a-Cf, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

9					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	$a-Co$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
12,9	15,9	103,3	-4,1	104	-2,224
12,7	18,1	103,3	-4,3	104	-2,331
12,6	21,5	103,3	-4,4	104	-2,385
13,1	24,3	103,3	-3,9	104	-2,116
12,9	27,4	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	30,6	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	33,5	103,3	-4,1	104	-2,224
12,7	35,7	103,3	-4,3	104	-2,331
12,8	37,9	103,3	-4,2	104	-2,277
12,8	40,2	103,3	-4,2	104	-2,277

Tabela 47- Medida 9. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-1,1	103,5	0,2	-0,6	0,2	1,6	0,2	0,8	0,1
1,1	103,1	0,2	0,6	0,2	2,9	0,2	1,5	0,1
4,5	102,6	0,2	2,5	0,2	4,9	0,2	2,4	0,1
7,3	102,3	0,2	4,0	0,3	6,1	0,3	3,1	0,1
10,4	102,0	0,3	5,8	0,3	8,0	0,3	4,0	0,1
13,6	101,8	0,3	7,6	0,3	9,8	0,3	4,9	0,2
16,5	101,7	0,4	9,2	0,4	11,4	0,4	5,7	0,2
18,7	101,7	0,4	10,4	0,4	12,8	0,4	6,4	0,2
20,9	101,8	0,4	11,7	0,5	13,9	0,5	7,0	0,2
23,2	101,8	0,5	13,0	0,5	15,2	0,5	7,6	0,2

Tabela 48- Medida 9 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.

10					
X_0 (cm) $\pm 0,2$	X_f (cm) $\pm 0,2$	b (cm) $\pm 0,2$	Co (cm)	$a-Co$ (cm) ± 1	Θ_0 (graus)
13,0	16,1	103,3	-4,0	104	-2,170
13,0	19,0	103,3	-4,0	104	-2,170
12,7	21,4	103,3	-4,3	104	-2,331
12,9	24,3	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	27,4	103,3	-4,1	104	-2,224
12,9	30,4	103,3	-4,1	104	-2,224
13,0	33,0	103,3	-4,0	104	-2,170
12,8	35,4	103,3	-4,2	104	-2,277
12,8	37,5	103,3	-4,2	104	-2,277
13,1	40,1	103,3	-3,9	104	-2,116

Tabela 49- Medida 10. Valores medidos para o movimento do olho mecânico na vertical. X_0 e X_f medidos utilizando a régua e b medido utilizando o AutoCad®.

C_f (cm) $\pm 0,3$	$a-C_f$ (cm)	$\delta a-Co$ (cm)	Θ_1 (graus)	$\delta\Theta_1$ (graus)	$\Delta\Theta$ (graus)	$\delta\Delta\Theta$ (graus)	β (graus)	$\delta\beta$ (graus)
-0,9	103,4	0,2	-0,5	0,2	1,7	0,2	0,8	0,1
2,0	103,0	0,2	1,1	0,2	3,3	0,2	1,6	0,1
4,4	102,6	0,2	2,4	0,2	4,8	0,2	2,4	0,1
7,3	102,3	0,2	4,0	0,3	6,3	0,3	3,1	0,1
10,4	102,0	0,3	5,8	0,3	8,0	0,3	4,0	0,1
13,4	101,8	0,3	7,4	0,3	9,7	0,3	4,8	0,2
16,0	101,7	0,4	8,9	0,4	11,1	0,4	5,5	0,2
18,4	101,7	0,4	10,3	0,4	12,5	0,4	6,3	0,2
20,5	101,7	0,4	11,4	0,4	13,7	0,4	6,9	0,2
23,1	101,8	0,5	12,9	0,5	15,0	0,5	7,5	0,2

Tabela 50- Medida 10 vertical. Valor da variação angular e seu erro propagado. Valor de C_f , $a-C_f$, Θ_1 e $\Delta\Theta$. Bem como seus respectivos erros.