

**MARCUS ROMANO SALLES BERNARDES DE
SOUZA**

**VALIDAÇÃO DO SENSOR LEAP MOTION
CONTROLLER PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM
JOGO SÉRIO PARA A REABILITAÇÃO VIRTUAL DO
ANTEBRAÇO HUMANO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

MARCUS ROMANO SALLES BERNARDES DE SOUZA

**VALIDAÇÃO DO SENSOR LEAP MOTION CONTROLLER PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM JOGO SÉRIO PARA A REABILITAÇÃO
VIRTUAL DO ANTEBRAÇO HUMANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves

UBERLÂNDIA - MG

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 2019	<p>Souza, Marcus Romano Salles Bernardes de, 1988- Validação do sensor Leap Motion Controller para o desenvolvimento de um jogo sério para a reabilitação virtual do antebraço humano [recurso eletrônico] / Marcus Romano Salles Bernardes de Souza. - 2019.</p> <p>Orientador: Rogério Sales Gonçalves. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2130 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Gonçalves, Rogério Sales, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título. CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 544, COPEM				
Data:	quinze de julho de dois mil e dezenove	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:30
Matrícula do Discente:	11712EMC011				
Nome do Discente:	Marcus Romano Salles Bernardes de Souza				
Título do Trabalho:	Validação do Sensor Leap Motion Controller para o Desenvolvimento de um Jogo Sérioo para a Reabilitação Virtual do Antebraço Humano				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Engenharia Biomecânica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se na Sala de Reuniões do LTAD - Bloco 5F, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: **Aldemir Aparecido Cavalini Junior - FEMEC/UFU** e **Rogério Sales Gonçalves - FEMEC/UFU**, orientador(a) do(a) candidato(a). Ressalta-se que o Prof. Dr. Adriano Almeida Gonçalves Siqueira - EESC/USP participou da defesa por meio de Skype desde a cidade de São Carlos/SP e os demais membros da banca e o aluno participaram *in loco*.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Rogério Sales Gonçalves, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Sales Gonçalves, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/07/2019, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/07/2019, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ALMEIDA GONCALVES SIQUEIRA, Usuário Externo**, em 15/07/2019, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1396355** e o código CRC **2EA81AF9**.

DEDICATÓRIA

Àqueles sem os quais não sou,
meus pais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Ele, por iluminar o meu caminho.

Aos meus amados pais Waltênio e Nahára. A minha luta, sempre foi a de vocês. A minha vitória, será eternamente nossa!

À minha noiva Rosiane, que sempre me apoiou e acreditou que eu conseguiria chegar até aqui. Amo você.

À minha irmã Luiza e minha prima Lara pela companhia e pelos momentos felizes que sempre me ajudaram a seguir em frente.

À minha tia “Bitinha” (*in memorian*) e meu tio Dante por serem anjos para a minha família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves por sempre estar disposto a me ajudar e me orientar. Obrigado pela compreensão, paciência e por se dedicar junto comigo na elaboração desta dissertação.

Aos membros da banca Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Junior, Profa. Dra. Jadiane Dionísio e Prof. Dr. Adriano Almeida Gonçalves Siqueira, pelo enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Jean-Paul pelos sábios conselhos e pela oportunidade de trabalhar junto aos seus orientandos.

Aos alunos de iniciação científica Eduardo Lopes e Lucas Lemos que me auxiliaram nos experimentos realizados durante a pesquisa.

Aos meus amigos do Manufacturing Automated Planning Lab (MAPL) por manterem um ambiente amigável e descontraído no laboratório. Obrigado pelos conselhos e companheirismo no trabalho. Um agradecimento especial ao “Xandão” por toda ajuda nas etapas de programação e por sempre se mostrar disposto a tirar minhas dúvidas.

Aos colegas do Laboratório de Automação e Robótica (LAR) pelos conselhos e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia por possibilitar a execução deste trabalho científico.

À CAPES pelo apoio financeiro à instituição.

SOUZA, M. R. S. B. **Validação do sensor Leap Motion Controller para o desenvolvimento de um jogo sério para a reabilitação virtual do antebraço humano.** 2019. 227 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Terapia de reabilitação é o tratamento de pessoas com incapacidades físicas através de exercícios contínuos, auxiliando-os em sua qualidade de vida. Contudo, a natureza repetitiva destes exercícios pode ser interpretada como entediante ou desestimulante e a motivação do paciente tem bastante importância em sua recuperação, pois deixa o processo todo mais tolerável.

A reabilitação virtual, que é a terapia baseada na utilização de jogos sérios, surgiu com o objetivo da provisão de uma intervenção local ou remota, a partir de dispositivos de realidade virtual. Os jogos sérios, cujo propósito primário não é o entretenimento, têm sido amplamente utilizados em terapias motivando os pacientes e tornando todo o processo terapêutico mais agradável. O *Leap Motion Controller* é um dispositivo capaz de rastrear as mãos do usuário que tem sido objeto de estudo em diversas pesquisas no campo da reabilitação virtual.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um jogo sério com o foco na reabilitação virtual do antebraço humano. Inicialmente foi feita a validação experimental do dispositivo a fim de se verificar a viabilidade de seu uso em terapia de reabilitação. A partir dos resultados observados, foram feitas considerações sobre o seu uso em um jogo sério voltado para este fim. Em seguida, são apresentadas as etapas do desenvolvimento do jogo sério "*You Can Cook Again*" (Você pode cozinhar novamente), partindo de sua motivação, concepção, mostrando os mecanismos desenvolvidos para a melhor utilização do jogo pelo paciente.

SOUZA, M. R. S. B. **Validation of the Leap Motion Controller sensor for the development of a serious game for virtual rehabilitation of the human forearm.** 2019. 227 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Rehabilitation therapy is the treatment of people with physical disabilities through continuous exercises, assisting them in their quality of life. However, the repetitive nature of these exercises can be interpreted as boring or discouraging, and patient motivation plays a key role in their recovery because it makes the process more tolerable.

The virtual rehabilitation, which is therapy based on the use of serious games, came up with the goal of providing a local or remote intervention, through virtual reality devices. Serious games, whose primary purpose is not entertainment, have been widely used in therapies motivating patients and making the entire therapeutic process more enjoyable. The Leap Motion Controller is a device capable of tracking the user's hands and has been the object of study in several researches in the field of virtual rehabilitation.

This dissertation presents the development of a serious game with the focus on virtual rehabilitation of the human forearm. Initially the experimental validation of the device was made in order to verify the feasibility of its use in rehabilitation therapy. From the observed results, considerations were made about its use in a serious game for this purpose. Following are the stages of the development of the serious game "You Can Cook Again", starting from its motivation, conception, showing the mechanisms developed for the best use of the game by the patient.

Keywords: Virtual rehabilitation, Serious game, Leap Motion Controller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disposição dos experimentos de WEICHERT, et al. (2013) consistindo do LMC e o robô industrial (Kuka Robot KR 125/3) com a caneta de referência.	8
Figura 2.2 – Sistema de referência do <i>Leap Motion Controller</i> (API Overview, 2017).	8
Figura 2.3 – Disposição dos experimentos de GUNA, et al., 2014: (a) Estáticos e (b) Dinâmicos.	9
Figura 2.4 – (a) Disposição dos experimentos em HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015) e (b) Cubo virtual utilizado em seus experimentos.	10
Figura 2.5 – (a) Medida da abertura da pinça pelo LMC e (b) Média, Mediana e Erro RMS da abertura estimada da pinça (traduzido de HORNSEY e HIBBARD, 2015).	11
Figura 2.6 – Movimentos de (a) Flexão/Extensão, (b) Abdução/Adução e (c) Supinação/Pronação; (d) Disposição dos experimentos de SMERAGLIUOLO, et al. (2016).	11
Figura 2.7 – Aparato experimental (VALENTINI e PEZZUTI, 2016).	12
Figura 2.8 – Interface de usuário (traduzido de TREJO, et al., 2017).	13
Figura 2.9 – <i>Virtual Glove</i> em seu suporte de alumínio (PLACIDI, et al., 2018).	14
Figura 2.10 – Interação do jogo sério PEPE com o LMC (FILHO, et al., 2014).	15
Figura 2.11 – Utilização do ambiente virtual em OLIVEIRA, et al., 2016.	16
Figura 2.12 – Jogo <i>Playground 3D</i> ® utilizando em SOARES, et al., 2017.	16
Figura 2.13 – Jogos utilizados como terapia em WU, et al., 2018.	18
Figura 2.14 – História social em realidade aumentada utilizando o LMC em SYAHPUTRA, et al., 2018.	18
Figura 2.15 – Jogos utilizados por crianças e adolescentes no Treinamento Baseado em LMC (OHNISHI, IWASAKI e TANAKA, 2019).	19
Figura 3.1 - Composição do <i>Leap Motion Controller</i> (COLGAN, 2014).	20
Figura 3.2 – Espaço de trabalho do <i>Leap Motion Controller</i> (Adaptado de COLGAN, 2014).	21
Figura 3.3 – Fluxograma de leitura dos parâmetros do <i>Leap Motion Controller</i>	22
Figura 3.4 – Atributos e classes pertencentes à estrutura <i>frame</i> (DAVIS, 2014).	23
Figura 3.5 – Entidades pertencentes à classe <i>hand</i> (adaptado de DAVIS, 2014).	24
Figura 3.6 – (a) Controlador NX100, (b) Motoman HP6 e (c) <i>Teach Pendant</i> (adaptado de VIEIRA, 2016).	25

Figura 3.7 – (a) Modelo de mão de madeira e (b) Arranjo dos experimentos.	25
Figura 3.8 – (a) Altura mínima definida para os experimentos; Alinhamento dos eixos (b) Frontal, (c) Lateral e (d) Vertical do LMC.	26
Figura 3.9 – Configurações (a) Aberta, (b) Dobrada e (c) Cerrada da mão de madeira.	27
Figura 3.10 – Eixos cartesianos do braço robótico e espaço de trabalho utilizado nos experimentos.	28
Figura 3.11 – Fluxograma do algoritmo de coleta dos dados do LMC.	30
Figura 3.12 – Representação (a) dos vetores médios de posição do ponto de referência (P_R) e da posição n de leitura (P_n) e (b) do vetor médio, relativo à referência, da posição de leitura ($P_{n,R}$), o deslocamento conhecido ($P_{n,R}^*$) e seu erro de medição ($E_{n,R}$).	33
Figura 3.13 – Representação da repetibilidade da medida de uma posição n	34
Figura 3.14 – Representação espacial dos ângulos θ_n^i , ψ_n^i e ϕ_n^i em relação ao vetor direção unitário U_n^i	36
Figura 3.15 – Representação dos ângulos (a) θ , (b) ψ e (c) ϕ medidos e seus erros associados.	37
Figura 3.16 – Disposições do LMC utilizadas nos experimentos: (a) Transversal e (b) Longitudinal.	38
Figura 3.17 – Medida dos ângulos de abertura da mão para as configurações (a) Aberta, (b) Dobrada e (c) Cerrada.	39
Figura 3.18 – Posições de leitura dos experimentos estáticos.	40
Figura 3.19 – Fluxograma de execução dos experimentos de deslocamento linear.	41
Figura 3.20 – Experimentos de deslocamento linear: deslocamentos (a) Lateral, (b) Frontal e (c) Vertical.	42
Figura 3.21 – Fluxograma de execução dos experimentos de deslocamento angular.	44
Figura 3.22 – Experimentos de deslocamento angular nos eixos (a) Lateral, (b) Vertical e (c) Frontal.	45
Figura 3.23 – Experimentos de deslocamento circular nos eixos (a) Lateral, (b) Vertical e (c) Frontal.	46
Figura 3.24 – Taxa de aquisição média dos experimentos.	47
Figura 3.25 – EEST – Posições relativas da palma da mão na disposição transversal.	48
Figura 3.26 – EEST – Posições relativas da palma da mão na disposição longitudinal.	49
Figura 3.27 – EDL Lateral – Posições relativas da palma da mão.	52
Figura 3.28 – EDL Vertical – Posições relativas da palma da mão.	54
Figura 3.29 – EDL Frontal – Posições relativas da palma da mão.	55
Figura 3.30 – EDA Lateral – Posições angulares relativas da palma da mão.	57
Figura 3.31 – EDA Vertical – Posições angulares relativas da palma da mão.	59

Figura 3.32 – EDA Frontal – Posições angulares relativas da palma da mão.	61
Figura 3.33 – EDC Lateral – Posições relativas da palma da mão.....	65
Figura 3.34 – EDC Vertical – Posições relativas da palma da mão.....	67
Figura 3.35 – EDC Frontal – Posições relativas da palma da mão.....	69
Figura 4.1 – (a) Base do LMC com nível de bolha e (b) Suporte montado no pedestal.....	75
Figura 4.2 – Disposição dos equipamentos para a utilização no jogo YCCA.	76
Figura 4.3 – Vistas (a) Frontal, (b) Lateral direita e (c) Superior do espaço de trabalho do LMC durante o jogo.....	76
Figura 4.4 – Mecanismo de interação com objetos incluso na biblioteca do LMC: (a) Funcionamento e (b) Parâmetros configuráveis.....	78
Figura 4.5 – Posição e orientação das palmas das mãos nos testes com a paciente.	79
Figura 4.6 – Ângulo de preensão palmar medidos nos testes com a mão direita do paciente.	80
Figura 4.7 – Ângulo de preensão palmar medidos nos testes com a mão esquerda do paciente.	81
Figura 4.8 – Ativação do GO interativo: Interrupção do <i>collider</i> e Função de atualização. ...	82
Figura 4.9 – Mecanismo de Interação desenvolvido em funcionamento.	83
Figura 4.10 – Telas iniciais do jogo: (a) Tela de apresentação, (b) <i>Home</i> , (c) U0 e (d) U1...	85
Figura 4.11 – Cozinha virtual.	86
Figura 4.12 – (a) Tela de Menu “ <i>Pause</i> ”, e telas de Jogo (b) J0, (c) J1 e (d) J2.....	88
Figura 4.13 – Atividades realizadas na tela J3.	89
Figura 4.14 – Atividades realizadas na tela J4.	90
Figura 4.15 – Atividades realizadas na tela J5.....	91
Figura 4.16 – Atividades realizadas na tela J6.....	93
Figura 4.17 – Atividades realizadas na tela J7.....	94
Figura 4.18 – Atividades realizadas na tela J8.....	95
Figura 4.19 – Atividades realizadas na tela J9.....	97
Figura 4.20 – Atividades realizadas na tela J10.....	98
Figura 4.21 – Tela de finalização com o bolo de fubá pronto.	98
Figura A.1 – EEST - Posições relativas ao polegar na disposição transversal.	114
Figura A.2 – EEST - Posições relativas ao polegar na disposição longitudinal.	114
Figura A.3 – EEST – Posições relativas do dedo indicador na disposição transversal.....	116
Figura A.4 – EEST – Posições relativas do dedo indicador na disposição longitudinal.	117
Figura A.5 – EEST – Posições relativas do dedo médio na disposição transversal.	119
Figura A.6 – EEST – Posições relativas do dedo médio na disposição longitudinal.....	119
Figura A.7 – EEST – Posições relativas do dedo anelar na disposição transversal.	121

Figura A.8 – EEST – Posições relativas do dedo anelar na disposição longitudinal.....	122
Figura A.9 – EEST – Posições relativas do dedo mínimo na disposição transversal.....	124
Figura A.10 – EEST – Posições relativas do dedo mínimo na disposição longitudinal.	124
Figura A.11 – EDL Lateral – Posições relativas do polegar.	127
Figura A.12 – EDL Vertical – Posições relativas do polegar.....	128
Figura A.13 – EDL Frontal – Posições relativas do polegar.	129
Figura A.14 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo indicador.	131
Figura A.15 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo indicador.	132
Figura A.16 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo indicador.....	133
Figura A.17 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo médio.....	135
Figura A.18 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo médio.....	136
Figura A.19 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo médio.....	137
Figura A.20 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo anelar.....	139
Figura A.21 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo anelar.....	140
Figura A.22 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo anelar.	141
Figura A.23 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo mínimo.....	143
Figura A.24 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo mínimo.....	144
Figura A.25 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo mínimo.....	145
Figura A.26 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do polegar.....	147
Figura A.27 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do polegar.....	149
Figura A.28 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do polegar.	151
Figura A.29 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo indicador.	153
Figura A.30 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo indicador.	155
Figura A.31 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo indicador.	157
Figura A.32 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo médio.....	159
Figura A.33 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo médio.	161
Figura A.34 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo médio.....	163
Figura A.35 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo anelar.....	165
Figura A.36 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo anelar.....	167
Figura A.37 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo anelar.....	169
Figura A.38 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo mínimo.	171
Figura A.39 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo mínimo.	173
Figura A.40 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo mínimo.....	175
Figura A.41 – EDC Lateral – Posições relativas do polegar.....	177
Figura A.42 – EDC Vertical – Posições relativas do polegar.....	179
Figura A.43 – EDC Frontal – Posições relativas do polegar.....	181

Figura A.44 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo indicador.....	183
Figura A.45 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo indicador.....	185
Figura A.46 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo indicador.	187
Figura A.47 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo médio.	189
Figura A.48 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo médio.	191
Figura A.49 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo médio.	193
Figura A.50 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo anelar.	195
Figura A.51 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo anelar.	197
Figura A.52 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo anelar.	199
Figura A.53 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo mínimo.	201
Figura A.54 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo mínimo.	203
Figura A.55 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo mínimo.	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Variáveis coletadas nos experimentos.	31
Tabela 3.2 - Resultados dos EEST para a palma da mão.....	50
Tabela 3.3 - Resultados dos EDL Laterais para a palma da mão.....	53
Tabela 3.4 - Resultados dos EDL Verticais para a palma da mão.....	54
Tabela 3.5 - Resultados dos EDL Frontais para a palma da mão.	56
Tabela 3.6 - Resultados dos EDA Laterais para a palma da mão.	58
Tabela 3.7 - Resultados dos EDA Verticais para a palma da mão.	60
Tabela 3.8 - Resultados dos EDA Frontais para a palma da mão.	62
Tabela 3.9 – Valores absolutos dos erros e repetibilidades médias dos EDA para as diferentes configurações da mão.....	63
Tabela 3.10 – Valores do ângulo α de abertura da mão para os EDA.	63
Tabela 3.11 - Resultados dos EDC Laterais para a palma da mão.....	66
Tabela 3.12 - Resultados dos EDC Verticais para a palma da mão.....	68
Tabela 3.13 - Resultados dos EDC Frontais para a palma da mão.....	70
Tabela 3.14 – Valores do ângulo α de abertura da mão para os EDC.....	71
Tabela 4.1 – Relação das atividades do jogo com as variáveis rastreadas.....	74
Tabela 4.2 – Resumo das atividades e funções utilizadas no jogo.....	99
Tabela A.1 - Resultados dos EEST para o polegar.....	115
Tabela A.2 - Resultados dos EEST para o dedo indicador.....	118
Tabela A.3 - Resultados dos EEST para o dedo médio.	120
Tabela A.4 - Resultados dos EEST para o dedo anelar.	123
Tabela A.5 - Resultados dos EEST para o dedo mínimo.	125
Tabela A.6 - Resultados dos EDL Laterais para o polegar.....	128
Tabela A.7 - Resultados dos EDL Verticais para o polegar.....	129
Tabela A.8 - Resultados dos EDL Frontais para o polegar.....	130
Tabela A.9 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo indicador.	132
Tabela A.10 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo indicador.	133
Tabela A.11 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo indicador.	134
Tabela A.12 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo médio.	136
Tabela A.13 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo médio.	137
Tabela A.14 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo médio.....	138

Tabela A.15 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo anelar.....	140
Tabela A.16 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo anelar.....	141
Tabela A.17 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo anelar.....	142
Tabela A.18 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo mínimo.....	144
Tabela A.19 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo mínimo.....	145
Tabela A.20 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo mínimo.....	146
Tabela A.21 - Resultados dos EDA Lateral para o polegar.....	148
Tabela A.22 - Resultados dos EDA Vertical para o polegar.....	150
Tabela A.23 - Resultados dos EDA Frontal para o polegar.....	152
Tabela A.24 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo indicador.....	154
Tabela A.25 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo indicador.....	156
Tabela A.26 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo indicador.....	158
Tabela A.27 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo médio.....	160
Tabela A.28 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo médio.....	162
Tabela A.29 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo médio.....	164
Tabela A.30 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo anelar.....	166
Tabela A.31 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo anelar.....	168
Tabela A.32 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo anelar.....	170
Tabela A.33 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo mínimo.....	172
Tabela A.34 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo mínimo.....	174
Tabela A.35 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo mínimo.....	176
Tabela A.36 - Resultados dos EDC Lateral para o polegar.....	178
Tabela A.37 - Resultados dos EDC Vertical para o polegar.....	180
Tabela A.38 - Resultados dos EDC Frontal para o polegar.....	182
Tabela A.39 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo indicador.....	184
Tabela A.40 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo indicador.....	186
Tabela A.41 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo indicador.....	188
Tabela A.42 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo médio.....	190
Tabela A.43 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo médio.....	192
Tabela A.44 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo médio.....	194
Tabela A.45 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo anelar.....	196
Tabela A.46 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo anelar.....	198
Tabela A.47 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo anelar.....	200
Tabela A.48 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo mínimo.....	202
Tabela A.49 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo mínimo.....	204
Tabela A.50 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo mínimo.....	206

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de preensão palmar
ϕ	Ângulo de rolagem
ϕ_n^i	Ângulo de rolagem da posição n no <i>frame</i> i
ψ	Ângulo de guinada
ψ_n^i	Ângulo de guinada da posição n no <i>frame</i> i
θ	Ângulo de arfagem
θ_n^i	Ângulo de arfagem da posição n no <i>frame</i> i
$A_{n,R}^*$	Deslocamento angular conhecido da posição n em relação à referência
A_n	Vetor de posição angular na posição n
$A_{n,R}$	Vetor de posição angular na posição n em relação à referência
A_R	Vetor de posição angular na referência
Ang	Matrizes dos ângulos aeronáuticos
c	Contador de <i>frames</i>
c_v	Contador de <i>frames</i> válidos
$Conf$	Vetor de consistência das leituras
Dir	Matrizes dos vetores unitários
$E\phi_n$	Erro de medição do ângulo de rolagem na posição n
$E\psi_n$	Erro de medição do ângulo de guinada na posição n
$E\theta_n$	Erro de medição do ângulo de arfagem na posição n
$E_{n,R}$	Erro de medição na posição n
Fps	Taxa de aquisição do sensor
i	Índice do <i>frame</i> coletado
Int	Matriz de intervalos de <i>frames</i> válidos
L	Número de <i>frames</i> coletados
$l\theta_n^i$	Desvio entre θ_n^i e θ_n
$l\theta_n$	Média dos desvios $l\theta_n^i$
lP_n^i	Desvio entre P_n^i e P_n
lP_n	Média dos desvios lP_n^i
n	Índice da posição lida
N	Número de posições medidas

$P_{n,R}^*$	Deslocamento conhecido entre a posição n e a referência
P_n^i	Vetor posição da posição n no <i>frame</i> i
P_R^i	Vetor posição da posição de referência no <i>frame</i> i
P_n	Vetor posição médio da posição n
$P_{n,R}$	Vetor posição médio da posição n em relação à referência
P_R	Vetor posição médio da posição de referência
Pos	Matrizes das coordenadas cartesianas de posição
$R\theta_n$	Repetibilidade calculada na medida do ângulo de arfagem na posição n
RP_n	Repetibilidade calculada na medida de posição da posição n
$S\theta_n$	Desvio padrão de θ_n
SP_n	Desvio padrão de P_n
T	Tempo de duração do ensaio
$Time$	Tempo no instante da coleta do <i>frame</i>
U_n^i	Vetor unitário da posição n no <i>frame</i> i
V	Número de <i>frames</i> válidos
V_n	Número de <i>frames</i> válidos na posição n
V_R	Número de <i>frames</i> válidos na posição de referência

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
API	<i>Application Programmer Interface</i>
AVE	Acidente Vascular Encefálico
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMM	<i>Coordinated Measuring Machine</i>
CNC	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
<i>DROP</i>	Função Soltar
EDA	Experimentos de Deslocamento Angular
EDC	Experimentos de Deslocamento Circular
EDL	Experimentos de Deslocamento Linear
EEST	Experimentos Estáticos
ELA	<i>Esclerose Lateral Amiotrófica</i>
FBX	<i>Filmbox</i>
GO	<i>Game Object</i>
<i>GRAB</i>	Função Pegar
ID	<i>Identity</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LMC	<i>Leap Motion Controller</i>
MAC	<i>Motion Analysis Corporation</i>
MI	Mecanismo de Interação
MIC	Mecanismo de Interação Comportamental
MIG	Gerenciador do Mecanismo de Interação
<i>MOVE</i>	Função Movimentar
MP	<i>Mal de Parkinson</i>
PC	Paralisia Cerebral
PEPE	<i>Programa de Escovação para o Paciente Especial</i>
<i>POUR</i>	Função Despejar
<i>REACH</i>	Função Alcançar
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RV	Realidade Virtual
SDJ	<i>Software de Desenvolvimento do Jogo</i>

SDK	<i>Software Development Kit</i>
SIAS	<i>Stroke Impairment Analysis Set</i>
SPIN-X	Função Giro Circular no Eixo X
SPIN-Y	Função Giro Circular no Eixo Y
SPIN-Z	Função Giro Circular no Eixo Z
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
YCCA	Nome do Jogo: <i>You Can Cook Again</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	4
1.2 Objetivo Geral	5
1.3 Objetivos Específicos	5
1.4 Estrutura da Dissertação	6
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Revisão sobre a Análise da Precisão e Acuracidade do Leap Motion Controller	7
2.2 Revisão sobre o Uso do Leap Motion Controller em Terapias de Reabilitação.....	14
CAPÍTULO III – ESTUDO SOBRE O LEAP MOTION CONTROLLER.....	20
3.1 Características do Leap Motion Controller.....	20
3.2 Materiais Utilizados nos Experimentos	24
3.3 Metodologia dos Experimentos	26
3.3.1 <i>Preparação do braço robótico</i>	27
3.3.2 <i>Preparação do software para coleta de dados</i>	28
3.3.3 <i>Procedimento para a análise de erros</i>	32
3.3.3.1 <i>Verificação das medidas de posição</i>	32
3.3.3.2 <i>Verificação das medidas de orientação</i>	35
3.3.4 <i>Classificação dos experimentos</i>	38
3.3.4.1 <i>Experimentos estáticos</i>	40
3.3.4.2 <i>Experimentos de deslocamento linear</i>	41
3.3.4.3 <i>Experimentos de deslocamento angular</i>	43
3.3.4.4 <i>Experimentos de deslocamento circular</i>	45
3.4 Resultados dos Experimentos	46
3.4.1 <i>Análise dos experimentos estáticos para a palma da mão</i>	48
3.4.2 <i>Análise dos experimentos de deslocamento linear para a palma da mão</i>	51
3.4.3 <i>Análise dos experimentos de deslocamento angular para a palma da mão</i>	56
3.4.4 <i>Análise dos experimentos de deslocamento circular para a palma da mão</i>	64
3.5 Conclusão Sobre o Estudo do Leap Motion Controller	71
CAPÍTULO IV – DESENVOLVIMENTO DO JOGO SÉRIO DE REABILITAÇÃO VIRTUAL	73
4.1 Concepção da Temática do Jogo	73
4.2 Metodologia.....	75

4.2.1	<i>Preparação dos softwares para o jogo</i>	77
4.3	Desenvolvimento do Jogo Sérió	79
4.3.1	<i>Desenvolvimento do mecanismo de interação do usuário com o ambiente do jogo</i>	79
4.3.2	<i>Menus de navegação</i>	84
4.3.3	<i>Design do jogo no ambiente virtual</i>	86
4.4	Resultados e Discussões	100
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO		101
5.1	Considerações Sobre o Leap Motion Controller	101
5.2	Considerações Sobre o Jogo Sérió Desenvolvido	102
5.3	Trabalhos Futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		105
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA OS DEDOS DA MÃO		114
A.1.	Experimentos Estáticos para os Dedos da Mão	114
A.1.1.	<i>Resultados das medições do polegar</i>	114
A.1.2.	<i>Resultados das medições do dedo indicador</i>	117
A.1.3.	<i>Resultados das medições do dedo médio</i>	119
A.1.4.	<i>Resultados das medições do dedo anelar</i>	122
A.1.5.	<i>Resultados das medições do dedo mínimo</i>	124
A.1.6.	<i>Conclusões sobre os experimentos estáticos para os dedos da mão</i>	127
A.2.	Experimentos de Deslocamento Linear para os Dedos da Mão	127
A.2.1.	<i>Resultados das medições do polegar</i>	127
A.2.2.	<i>Resultados das medições do dedo indicador</i>	131
A.2.3.	<i>Resultados das medições do dedo médio</i>	135
A.2.4.	<i>Resultados das medições do dedo anelar</i>	139
A.2.5.	<i>Resultados das medições do dedo mínimo</i>	143
A.2.6.	<i>Conclusões sobre os experimentos de deslocamento linear para os dedos da mão</i>	147
A.3.	Experimentos de Deslocamento Angular para os Dedos da Mão	147
A.3.1.	<i>Resultados das medições do polegar</i>	147
A.3.2.	<i>Resultados das medições do dedo indicador</i>	153
A.3.3.	<i>Resultados das medições do dedo médio</i>	159
A.3.4.	<i>Resultados das medições do dedo anelar</i>	165
A.3.5.	<i>Resultados das medições do dedo mínimo</i>	171
A.3.6.	<i>Conclusões sobre os experimentos de deslocamento angular para os dedos da mão</i>	177

A.4. Experimentos de Deslocamento Circular para os Dedos da Mão	177
A.4.1. <i>Resultados das medições do polegar</i>	177
A.4.2. <i>Resultados das medições do dedo indicador</i>	183
A.4.3. <i>Resultados das medições do dedo médio</i>	189
A.4.4. <i>Resultados das medições do dedo anelar</i>	195
A.4.5. <i>Resultados das medições do dedo mínimo</i>	201
A.4.6. <i>Conclusões sobre os experimentos de deslocamento circular para os dedos da mão</i>	207

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Existem diversos fatores que trazem como consequência deficiências motoras em uma pessoa, tais como doenças crônicas, sequelas neurológicas, acidentes de trânsito e de trabalho. Neste contexto, a medicina física e de reabilitação tem como objetivo o tratamento destas incapacidades por meio de um processo global e dinâmico, identificado como terapia de reabilitação. Esta intervenção é orientada para a recuperação física e psicológica do paciente auxiliando-o em sua qualidade de vida e reintegração social (GONÇALVES e CARVALHO, 2010).

Em terapias de reabilitação de pacientes que sofreram Acidente Vascular Encefálico (AVE) e Paralisia Cerebral (PC), por exemplo, pode se constatar que exercícios contínuos geram melhores resultados (LANGHORNE, COUPAR e POLLOCK, 2009) e (LIU, *et al.*, 2017). Infelizmente, a natureza repetitiva dos exercícios praticados durante a reabilitação tradicional pode ser interpretada como entediante ou desestimulante (LAM, *et al.*, 2015 e BURKE, *et al.*, 2009) e a motivação do paciente tem um papel fundamental em sua reabilitação, tornando o processo todo mais tolerável e aumentando as chances de sucesso em sua recuperação (LAM, *et al.*, 2015), (GOODMAN, *et al.*, 2014) e (TATLA, *et al.*, 2013). Outra desvantagem observada na terapia convencional é a necessidade constante do acompanhamento presente de um profissional da saúde (BURDEA, 2003). E quando alguns exercícios são designados para serem feitos em casa, estes acabam por não serem monitorados, impossibilitando a avaliação do desempenho do paciente. Há também as pessoas que residem em lugares mais remotos e têm mais dificuldade de ter acesso à terapia, uma vez que as clínicas geralmente são localizadas em centros urbanos. Neste âmbito, surge uma nova forma de terapia, a Reabilitação Virtual.

A reabilitação virtual é uma terapia baseada no uso de jogos sérios que tem como objetivo a provisão de uma intervenção local ou remota utilizando dispositivos de realidade virtual (RV) e simulações (BURDEA, 2003).

Segundo Michael e Chen (2006), “Jogos sérios são jogos que não possuem como propósito primário o entretenimento, prazer ou diversão”. Podem ser utilizados em diversos campos como militar, governamental, educacional, corporativo, assistência médica, político, religioso, artístico, entre outros. Desenvolvedores de jogos sérios usam como pressuposto o fascínio das pessoas por vídeo games para conquistar sua atenção para diversas temáticas pertinentes (DJAOUTI, ALVAREZ e JESSEL, 2011).

Através da interatividade com o ambiente virtual, o paciente pode ser estimulado através de recompensas pelo esforço e seu desempenho nos jogos (BURDEA, 2003) e (JÁNOŠ, SUKOP e HAJDECKER, 2015). Pacientes motivados desenvolvem melhor tolerância à terapia e se tornam mais cooperativos (LAM, *et al.*, 2015) e (PHYSIOPEIDIA, 2019). Os benefícios da reabilitação virtual vão além:

- Um mesmo dispositivo de RV pode ser usado em vários tipos de exercícios em vários pacientes com necessidades distintas;
- Dados colhidos pelos sensores presentes no hardware podem ser armazenados para posterior consulta do terapeuta, possibilitando o monitoramento à distância (BURDEA, 2003);
- Exercícios feitos em casa podem auxiliar os indivíduos que não são capazes de se locomover com frequência até as clínicas, além de acelerar o processo de recuperação (JÁNOŠ, SUKOP e HAJDECKER, 2015).

Segundo GRIGORE (2003) há alguns grandes desafios para a implementação da reabilitação virtual. De início, nota-se alguma relutância por parte de clínicas e terapeutas em empregar esta tecnologia, visto que vários estudos clínicos são necessários para comprovar sua eficácia médica (WEISS, KESHNER e LEVIN, 2014). Outro ponto importante é que as interfaces utilizadas não foram projetadas para o uso terapêutico, surgindo obstáculos como a complicação na esterilização dos equipamentos manuseados e a pouca variedade de ajustes no tamanho dos equipamentos vestíveis, dificultando o uso por crianças, por exemplo. O custo dos equipamentos, mesmo tendo diminuído o valor nos últimos anos, permanece alto, inibindo o investimento por parte das clínicas.

Dentre as áreas da reabilitação virtual, tem-se a ortopédica, destinada ao tratamento de pacientes que sofreram lesões ou danos em músculos, ligamentos ou ossos. Há também a reabilitação virtual pós-AVE, e a cognitiva, para o tratamento de pacientes que sofrem de distúrbios psicológicos (BURDEA, 2003).

Pode-se classificar a reabilitação virtual, conforme o protocolo empregado, em reabilitação melhorada por RV e reabilitação baseada em RV. Na melhorada, o paciente realiza exercícios convencionais de terapia em um ambiente simulado. Desta forma, o indivíduo pode ser instruído no exercício dentro do ambiente virtual mesmo se estiver em casa. Já quando a reabilitação é baseada em RV, os exercícios clássicos são substituídos por outras ações, como atividades da vida diária, com outros objetivos em uma abordagem diferente (BURDEA, 2003).

Outra forma de se classificar a reabilitação virtual é quanto à proximidade do terapeuta. A reabilitação pode ser local, quando o profissional de saúde assiste o paciente de perto, ou remota, quando o profissional o assiste à distância. Este último caso também é denominado tele reabilitação (LEVY, *et al.*, 2015).

Os dispositivos de realidade virtual mais utilizados são:

- Nintendo Wii[®] (Nintendo Wii) – É um vídeo game lançado pela Nintendo[®] em 2006, que utiliza controles com acelerômetros para capturar os movimentos feitos pelo usuário.
- Microsoft Kinect[®] (Microsoft Kinect) – É um acessório lançado em 2010 junto ao console XBOX 360 da Microsoft[®]. Ele utiliza tecnologia de câmeras e LEDs (do inglês, *Light Emitting Diode*) infravermelho para capturar a posição e movimentos do corpo do usuário, eliminando a necessidade de um hardware físico como controle.
- *Tablet* – É um computador portátil com uma tela sensível ao toque. O primeiro a ser lançado foi o iPad[®] da Apple[®] (Ipad) em 2010. Este dispositivo reage ao toque e movimento do dedo do usuário na tela, além de possuir acelerômetros e giroscópios que também podem ser utilizados no controle de aplicações.
- *Leap Motion Controller*[®] (LMC) (Leap Motion, 2013) – É um pequeno *hardware* lançado pela empresa Leap Motion[®] em 2013 que se conecta ao computador via USB (do inglês, *Universal Serial Bus*) e é capaz de rastrear as mãos com maiores detalhes do que o Kinect.

Em (PHYSIOPEDIA, 2019) é possível ver as características dos três primeiros dispositivos citados e sua utilização em reabilitação virtual. Esta dissertação terá como foco o *Leap Motion Controller*.

Desde o seu lançamento, o LMC tem sido estudado como uma possibilidade alternativa para interface de controle. Pesquisadores já consideram promissora a viabilidade de seu uso como interface para computadores (BACHMANN, WEICHERT e RINKENAUER, 2015), (FALCÃO, LEMOS e SOARES, 2015), (SEIXAS, CARDOSO e DIAS, 2015), (AZIZ e RESHMA, 2016) e (ERRA, MALANDRINO e PEPE, 2019). Em (BASSILY, *et al.*, 2014) foi apresentada uma interface de comunicação para o controle de um braço robótico de 6 graus

de liberdade utilizando o LMC. Seu uso combinado com um sensor inercial acoplados a um suporte fixo à mão também foi apresentado como uma interface para a interação musical por gestos (BROWN, *et al.*, 2016).

Pesquisadores também têm avaliado a aptidão do LMC para o reconhecimento de gestos (SHAO, 2016). O dispositivo apresentou bons resultados no reconhecimento de gestos em linguagens de sinais árabe (KHELIL e AMIRI, 2016), australiana (POTTER, ARAULLO e CARTER, 2013), indiana (NAGLOT e KULKARNI, 2016), americana (NAGLOT e KULKARNI, 2016) e (MARIN, DOMINIO e ZANUTTIGH, 2014) e brasileira (REMBOSK, DE SOUZA e DE AGUIAR, 2017), (SANTOS, 2015) e (FAGUNDES e ALONSO, 2018). Em (POTTER, ARAULLO e CARTER, 2013) o dispositivo se mostrou bastante preciso quando não ocorre oclusão de alguns dedos. Problemas com oclusão também são observados em (SHAO, 2016) e (NAGLOT e KULKARNI, 2016). Em (MARIN, DOMINIO e ZANUTTIGH, 2014) foi proposto um sistema combinado com o *Kinect* que apresentou acuracidade acima de 90% no reconhecimento de gestos.

Neste contexto, esta dissertação visa o desenvolvimento de um sistema que utiliza o sensor *Leap Motion Controller* para a reabilitação dos membros superiores através de jogos sérios.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento de um jogo sério para a reabilitação virtual do antebraço humano tem como justificativas:

- A reabilitação em si, que auxilia os pacientes a restabelecerem total ou parcialmente os movimentos funcionais do corpo;
- A reabilitação das funções na região do pulso e mão. A mão é uma das estruturas do corpo humano que é utilizada na maior parte das atividades realizadas no cotidiano. As mãos são necessárias para a boa execução de tarefas desde simples, como o ato de segurar um objeto ou girar uma maçaneta, até mais complexas, como escrever uma carta ou utilizar um smartphone. A possibilidade da recuperação do controle das funções motoras das mãos corresponde à conquista da independência do ser humano.
- A reabilitação virtual com o uso de jogos sérios aliados à reabilitação convencional como estímulo adicional na motivação do paciente, uma vez que oferece novos significados às atividades repetitivas realizadas durante a terapia.

- Dada a sua portabilidade, o uso do *Leap Motion Controller* pode oferecer a comodidade de poder ser usado em casa entre sessões de terapia, trazendo benefícios na reabilitação do paciente.
- O *Leap Motion Controller* sendo uma ferramenta com grande potencial para o rastreamento dos movimentos da mão, consegue calcular e fornecer alguns dos parâmetros necessários para a avaliação do desempenho do usuário na atividade realizada. A estimativa do desempenho do paciente por parte do aparelho pode assistir ao profissional da saúde na hora de prescrever novos exercícios e avaliar seus resultados.
- E, de modo geral, a melhoria da qualidade de vida dos pacientes e dos profissionais da saúde.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é a validação do sensor *Leap Motion Controller* para o desenvolvimento de um jogo sério para a reabilitação virtual com foco na região do antebraço humano.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- ✓ A revisão dos trabalhos realizados com foco na validação das leituras do LMC;
- ✓ A revisão dos trabalhos realizados no campo de reabilitação virtual que utilizaram o sensor LMC como dispositivo base;
- ✓ A análise da precisão, acuracidade e consistência das leituras adquiridas pelo sensor LMC através da avaliação experimental da eficiência e aptidão do sensor no rastreamento de diferentes posições, orientações e configurações da mão humana;
- ✓ A avaliação, através dos resultados obtidos nos experimentos, da aptidão do LMC para o uso em terapias de reabilitação virtual;
- ✓ O desenvolvimento de ferramentas em *software* que facilitem a utilização do LMC em jogos sérios por pessoas com limitações físicas;
- ✓ O desenvolvimento de um jogo sério focado na reabilitação virtual.

1.4 Estrutura da Dissertação

A apresentação dos conceitos fundamentais, desenvolvimento, resultados e conclusões desta dissertação está organizada neste documento da forma descrita a seguir.

No Capítulo 2 é apresentado um resumo sobre a análise da precisão e acuracidade do sensor LMC e uma revisão sobre a sua utilização em terapias de reabilitação.

No Capítulo 3 é feito um estudo sobre o dispositivo, apresentando suas principais características. Em seguida são apresentados os materiais utilizados em sua validação experimental, bem como a metodologia utilizada para a avaliação da acuracidade e precisão de suas leituras. Adiante é descrito o procedimento realizado para a calibração dos experimentos que são classificados de acordo com diversos parâmetros. A descrição de cada um dos tipos de experimentos realizados é feita em seguida, evidenciando as variáveis pertinentes em cada. Após isso, são exibidos e analisados os resultados obtidos para a palma da mão nos experimentos através de gráficos e tabelas. Por fim, uma conclusão embasada nos experimentos realizados é feita avaliando a sua aptidão e seu potencial na utilização em reabilitação virtual.

No Capítulo 4 é apresentada a concepção da temática do jogo sério, sua motivação e objetivo. Em seguida são apresentados os *softwares* utilizados durante o seu desenvolvimento. Após isso, é descrito o funcionamento do mecanismo de interação desenvolvido para a utilização por pacientes com limitações motoras. Adiante, os menus de navegação do jogo são mostrados e a criação da ferramenta para o controle de sua interface é descrita. O ambiente virtual do jogo é então apresentado junto às telas de jogo onde são realizadas as atividades necessárias para o cumprimento de seu objetivo. Ao final, são feitas considerações a respeito do jogo sério desenvolvido.

A conclusão da dissertação é apresentada no Capítulo 5, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros. Logo após têm-se as referências bibliográficas utilizadas na confecção desta.

Por fim, no Apêndice A são apresentados os resultados obtidos para as pontas dos dedos nos experimentos realizados para a validação do LMC.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O *Leap Motion Controller* tem sido objeto de estudo em diversas pesquisas em diversas áreas do conhecimento. Por ser um sensor ótico que realiza medições de vários parâmetros das mãos, a avaliação de sua precisão e exatidão em diversas aplicações precisa ser feita para que sejam conhecidas as suas limitações. Na sessão seguinte, serão apresentadas algumas pesquisas desenvolvidas com o objetivo de avaliar a qualidade dos dados calculados pelo sensor.

2.1 Revisão sobre a Análise da Precisão e Acuracidade do Leap Motion Controller

WEICHERT, *et al.* (2013) foram os primeiros a publicarem um artigo sobre a análise do LMC. Em sua pesquisa, foi utilizada uma caneta acoplada a um braço robótico industrial Kuka Robot KR 125/3 como um apontador a ser rastreado pelo LMC (Fig. 2.1). O sistema de referência do robô, cuja repetibilidade é abaixo de 0,2 mm, foi utilizado como padrão de referência para a validação do sensor. Os pesquisadores avaliaram a precisão e repetibilidade do dispositivo de acordo com a norma ISO 9283 (1998), utilizada na avaliação de robôs industriais. Foram realizados dois tipos de experimentos, cujo primeiro foi através de uma abordagem estática, e o segundo em uma abordagem dinâmica. Na abordagem estática, foram utilizadas canetas de referência com diferentes diâmetros de 3, 4, 5, 6, 8 e 10 mm que foram movidas para posições desejadas e se mantiveram paradas até que finalizasse a coleta de 5000 *frames*. Na abordagem dinâmica, a caneta de referência se movia em trajetórias lineares de 200 mm de comprimento nos três eixos e em uma trajetória senoidal.

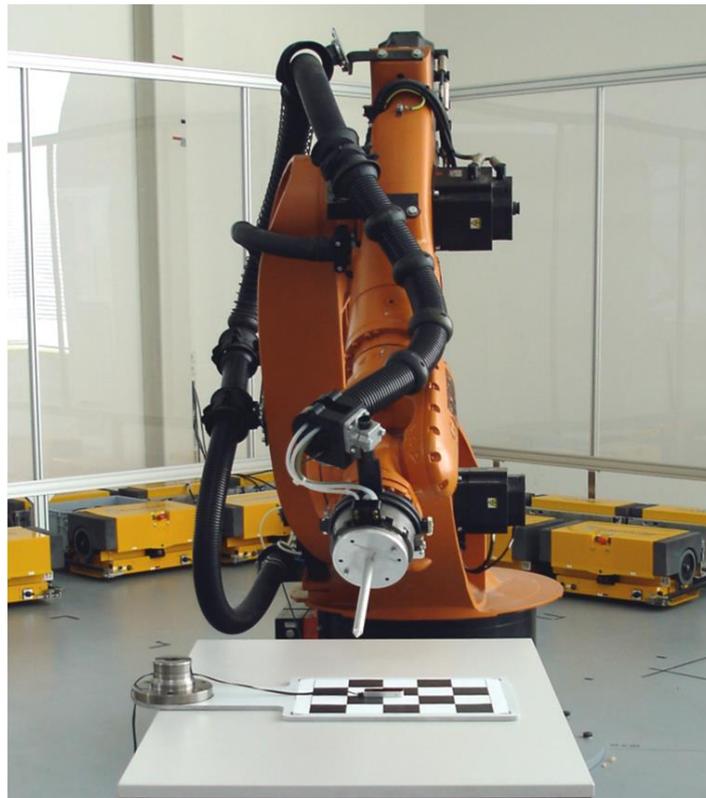


Figura 2.1 – Disposição dos experimentos de WEICHERT, et al. (2013) consistindo do LMC e o robô industrial (Kuka Robot KR 125/3) com a caneta de referência.

O erro calculado para as leituras do LMC nos ensaios estáticos foi menor que 0,2 mm, independentemente do eixo analisado, e nos dinâmicos 1,2 mm em média. A repetibilidade observada nos ensaios estáticos foi menor que 0,17 mm para o eixo X e nos dinâmicos de 0,4 mm em média.

O sistema cartesiano de referência utilizado pelo LMC possui origem no centro de sua superfície superior e orientação conforme mostrado na Fig. 2.2.

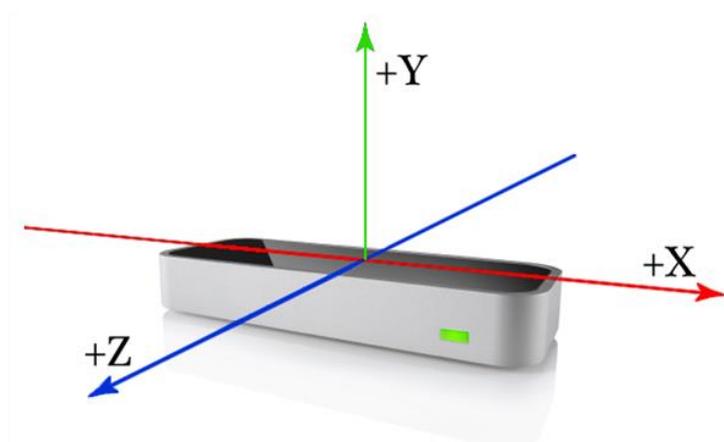


Figura 2.2 – Sistema de referência do *Leap Motion Controller* (API Overview, 2017).

Em 2014, foi avaliada a precisão, confiabilidade e a frequência de amostragem do LMC utilizando 8 câmeras de alta velocidade Oqus 3+ junto ao software Qualisys Track Manager como sistema de referência (GUNA, *et al.*, 2014). Foram realizados experimentos estáticos e dinâmicos. Nos estáticos (Figura 2.3a), uma mão de plástico fixa em um suporte foi utilizada para a simulação da mão humana em 37 posições diferentes dentro do espaço de trabalho do LMC. Os resultados deste experimento mostraram um desvio padrão menor que 0,5 mm.

Nos experimentos dinâmicos (Figura 2.3b) foi utilizada uma ferramenta em formato de "V" simulando dois dedos da mão. A distância entre as pontas da ferramenta era constante e o operador movimentava a ferramenta com as próprias mãos em uma trajetória aleatória com velocidade constante de 100 mm/s. Foi avaliada a medida da distância entre as duas pontas da ferramenta durante os experimentos. Os resultados mostraram uma queda na precisão das medidas conforme a ferramenta se distanciava do sensor.



Figura 2.3 – Disposição dos experimentos de GUNA, *et al.*, 2014: (a) Estáticos e (b) Dinâmicos.

Em ambos os tipos de experimentos, a frequência de amostragem se mostrou bastante inconsistente, apresentando uma média de 39 Hz com desvio padrão de 12,8 Hz. Os autores concluíram que o *Leap Motion Controller* não pode ser utilizado como um sistema de rastreamento profissional.

No ano seguinte, em 2015, HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015) propuseram um sistema onde um braço robótico (UR10) reproduzia os movimentos de uma mão humana em tempo real. Seu objetivo era conseguir realizar operações complexas sem nenhuma restrição de movimentação para o operador. Os autores também fizeram a avaliação da exatidão e acuracidade do LMC, com a SDK (do inglês, *Software Development Kit*) na versão 1.0.8 utilizando o braço robótico como sistema de referência (Fig. 2.4a). Em sua avaliação, foi fixada uma haste de metal de 7 mm de diâmetro ao elemento terminal do robô industrial, e a ponta

da haste foi rastreada em ensaios estáticos e dinâmicos. Nos ensaios estáticos, posições discretas foram medidas em trajetórias compostas de 27 linhas, formando um cubo (Fig. 2.4b). O erro medido nos experimentos estáticos foi menor que 0,01 mm, quando a haste estava próxima à origem do LMC, e a repetibilidade de 1 mm. Os autores também observaram que a repetibilidade piora conforme a ferramenta se afasta do sensor.

Nos ensaios dinâmicos, foram realizadas trajetórias circulares de 50 mm de raio nos planos XY e XZ e avaliada a sua acuracidade. No plano XZ, o erro médio absoluto foi de aproximadamente 1,4 mm e no plano XY de 2 mm. A conclusão dos autores nestes ensaios foi de que o sensor é viável para o uso na reprodução do movimento da mão humana.



Figura 2.4 – (a) Disposição dos experimentos em HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015) e (b) Cubo virtual utilizado em seus experimentos.

Em TUNG, *et al.* (2015) os autores avaliaram a precisão e repetibilidade do LMC (versão 1.2.0 da SDK) na medição da posição dos dedos e sua taxa de amostragem. Para a validação, utilizaram um sistema com marcadores de captura de movimento OptoTrak 3020. Os experimentos foram realizados com 9 adultos saudáveis apontando para 15 alvos posicionados na tela de um computador em duas condições: Tocando o alvo na tela e apontando para o alvo à uma distância de 4 cm. O erro médio quadrático do LMC foi de 17,30 mm com desvio padrão de 9,56 mm. A média da taxa de amostragem foi de 65,47 Hz com desvio padrão de 21,53 Hz.

Ainda em 2015, pesquisadores avaliaram a acuracidade do LMC (HORNSEY e HIBBARD, 2015) ao medir a distância entre a ponta do dedo indicador e do polegar quando a mão está em uma configuração de pinça (Fig. 2.5a). Distâncias de 10 a 130 mm foram utilizadas entre as pontas dos dedos nos ensaios e, para cada distância, 20 medições foram realizadas. Foi verificado que o erro médio quadrático (RMS) geral foi de 4,44 mm, tendo sido menor para distâncias maiores (Fig. 2.5b).

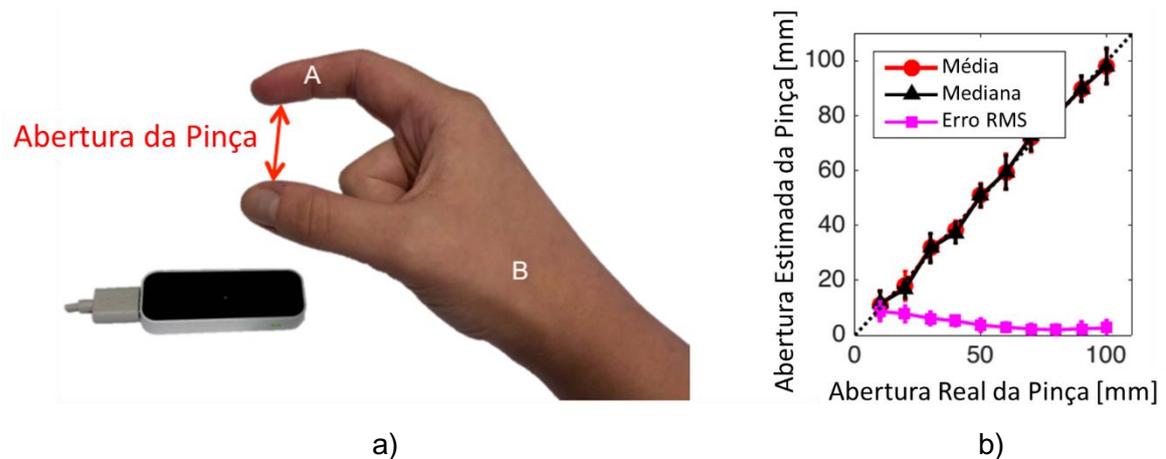


Figura 2.5 – (a) Medida da abertura da pinça pelo LMC e (b) Média, Mediana e Erro RMS da abertura estimada da pinça (traduzido de HORNSEY e HIBBARD, 2015).

Em 2016, SMERAGLIUOLO, *et al.* (2016) avaliaram a capacidade do LMC (versão 2.3.0 da SDK) em rastrear os movimentos de flexão/extensão (Fig. 2.6a) e abdução/adução (Fig. 2.6b) do punho e de pronação/supinação (Fig. 2.6c) do antebraço. Para validação, foi utilizado um sistema de captura de movimento com marcadores da Motion Analysis Corporation[®] (MAC). Nos experimentos, voluntários foram instruídos a realizar os três tipos de movimento enquanto o LMC e o MAC os rastreavam (Fig. 2.6d).

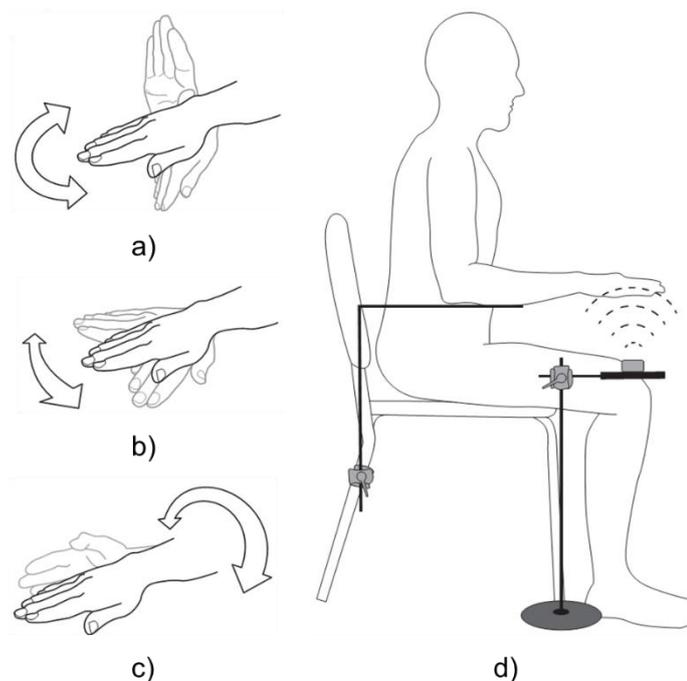


Figura 2.6 – Movimentos de (a) Flexão/Extensão, (b) Abdução/Adução e (c) Supinação/Pronação; (d) Disposição dos experimentos de SMERAGLIUOLO, *et al.* (2016).

Os resultados dos experimentos mostraram que os erros médios quadráticos foram de $11,6^\circ$ para os movimentos de flexão/extensão, $12,4^\circ$ para abdução e adução e $38,4^\circ$ para supinação/pronação. Sua conclusão foi de que o LMC consegue prover medidas satisfatórias para os movimentos de flexão/extensão e abdução/adução.

No mesmo ano, VALENTINI e PEZZUTI (2016) fizeram uma avaliação experimental do LMC, no qual voluntários foram instruídos a posicionar as pontas dos dedos da mão direita em posições conhecidas em uma placa transparente situada acima do sensor (Fig. 2.7). Desta forma, foram calculados os erros no rastreamento pelo LMC em relação às posições já conhecidas. O erro médio calculado foi entre 4 e 5 mm e os autores concluíram que o LMC possui boa precisão no rastreamento das mãos do usuário e que há zonas mais adequadas para um melhor desempenho do sensor.

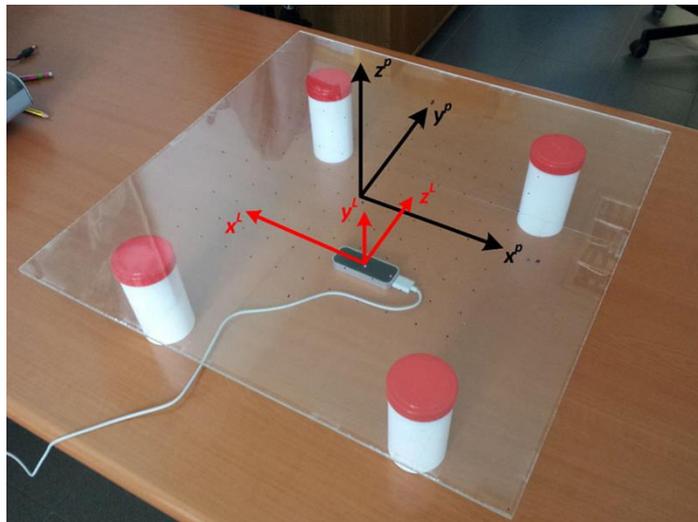


Figura 2.7 – Aparato experimental (VALENTINI e PEZZUTI, 2016).

Em CURIEL-RAZO, *et al.* (2016), os autores realizaram a validação do LMC utilizando uma CMM (do inglês, *Coordinated Measuring Machine*) como sistema de referência. Uma haste de alumínio de 70 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro foi acoplada ao fuso do CMM, simulando um dedo da mão humana, que foi posicionada em posições conhecidas. O erro unidimensional encontrado foi menor nos eixos X e Z, com valores menores que 0,1 mm, e o erro tridimensional foi de 9,6 mm.

Ainda em 2016, KINCAID (2016) utilizou o LMC (versão 2.3.1 da SDK) para avaliar a sua capacidade de medir o tremor nas mãos de voluntários saudáveis e concluiu que sistemas de captura de movimento sem marcadores estão prestes a se tornar adequados para o uso clínico de rotina.

Em 2017, TREJO, *et al.* (2017) desenvolveram um software chamado *LeapAngles* que utiliza o LMC para fazer medições goniométricas da mão (Fig. 2.8). Seus resultados

permitiram afirmar que o software utilizando o sensor consegue medir com boa precisão os ângulos de abdução dos dedos, porém melhorias precisam ser feitas para as medições do ângulo entre os metacarpos e as falanges.

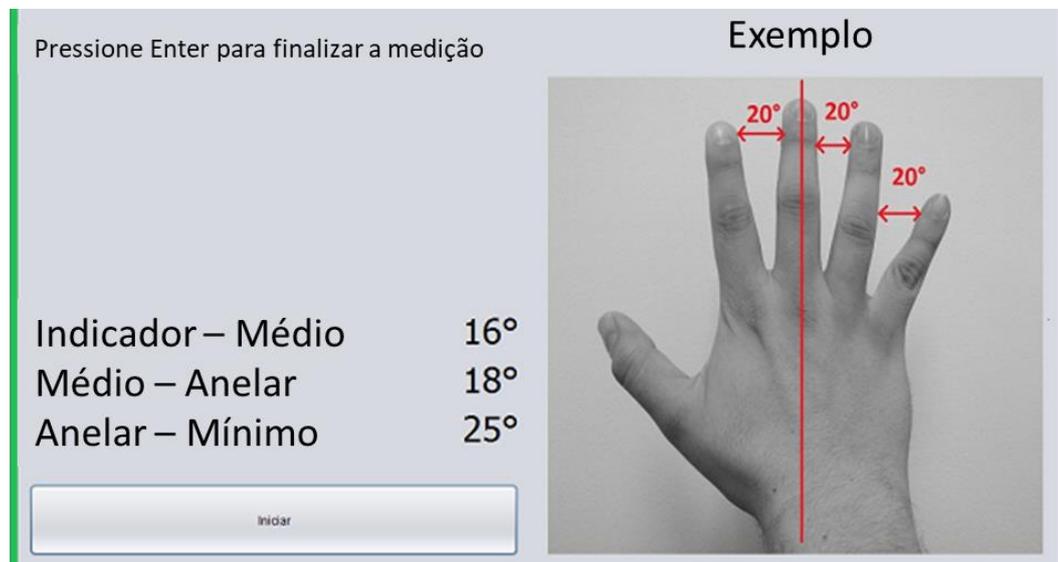


Figura 2.8 – Interface de usuário (traduzido de TREJO, *et al.*, 2017).

Em 2018, PLACIDI, *et al.* (2018) desenvolveram um sistema chamado *Virtual Glove* que utiliza dois LMCs dispostos perpendicularmente um ao outro para evitar oclusões nas poses da mão. Como referência, utilizaram uma máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado), com 0,01 mm de precisão e uma haste fixada ao seu elemento terminal (Fig. 2.9). O erro de posicionamento calculado foi menor que 6 mm e a combinação dos dois sensores reduziu os problemas relacionados à oclusão. Os autores concluíram que os resultados foram promissores. É válido ressaltar que, como nas novas versões da SDK o rastreamento de ferramentas como hastes foi descontinuado, os autores provavelmente utilizaram uma versão mais antiga.



Figura 2.9 – *Virtual Glove* em seu suporte de alumínio (PLACIDI, *et al.*, 2018).

Ainda em 2018, pesquisadores exploraram a capacidade do LMC em medir a amplitude dos movimentos da mão e punho de 20 voluntários saudáveis (NIZAMIS, *et al.*, 2018). Foram medidos os movimentos de flexão/extensão, pronação/supinação, abdução/adução, flexão/extensão do polegar e abertura e fechamento da mão, e um goniômetro foi utilizado como comparação. Os resultados mostraram baixa conformidade entre as medidas do LMC e do goniômetro, mas ainda assim, os autores consideraram o LMC com grande potencial para a contribuição no desenvolvimento de protocolos de reabilitação para as mãos.

Os trabalhos verificados indicam um potencial moderado do LMC como um instrumento de medida, porém é promissor o seu uso em atividades relacionadas à reabilitação. Sendo assim, uma etapa desta pesquisa será a validação do sensor com relação à sua exatidão e repetibilidade.

Apresentados os trabalhos que realizaram a validação das medidas adquiridas pelo LMC, segue-se com a revisão bibliográfica dos trabalhos que utilizaram o dispositivo em terapias de reabilitação.

2.2 Revisão sobre o Uso do Leap Motion Controller em Terapias de Reabilitação

Desde o seu lançamento, vários pesquisadores da área de reabilitação têm visto o grande potencial do uso do LMC em terapias.

Em 2014, pesquisadores utilizaram o jogo *Fruit Ninja*® sendo controlado através do LMC para avaliar 14 pacientes que sofreram Acidente Vascular Encefálico (KHADEMI, *et al.*,

2014). Os resultados permitiram os autores concluir que o desempenho mostrado no jogo é um bom indicador da funcionalidade das mãos dos pacientes.

Ainda em 2014, FILHO, *et al.* (2014) apresentaram a integração do LMC no jogo sério PEPE (Programa de Escovação para o Paciente Especial) focado no tratamento odontológico de crianças com Paralisia Cerebral. No jogo, os movimentos das mãos dos pacientes eram capturados pelo LMC a fim de amplificar ou acelerar as ações do personagem principal (Fig. 2.10). O estudo foi realizado durante o tratamento de 20 crianças e obteve bons resultados quanto a sua usabilidade, aceitação dos pacientes e facilitação do tratamento.



Figura 2.10 – Interação do jogo sério PEPE com o LMC (FILHO, *et al.*, 2014).

Em 2015, um estudo com crianças diagnosticadas com autismo foi feito através de jogos sérios utilizando o LMC (ZHU, *et al.*, 2015). O objetivo era avaliar a eficácia da reabilitação utilizando o dispositivo. Como resultados, os dois participantes, de 9 e 10 anos, obtiveram melhoria em sua coordenação motora fina e, após a intervenção, sua pontuação em habilidades cognitivas no jogo utilizado melhorou 100%.

No mesmo ano, GÜTTLER, *et al.* (2015) propuseram um sistema de detecção de tremores para o diagnóstico de Mal de Parkinson (MP) utilizando o LMC combinado com o *Vuzix Smart Glasses M100*[®] e afirmaram que os resultados obtidos através das medições realizadas pelo dispositivo podem ser utilizados como ferramenta de diagnóstico.

Em 2016, OLIVEIRA, *et al.* (2016) apresentaram o desenvolvimento de um jogo sério para a reabilitação cognitiva e motora de crianças com PC utilizando o *Leap Motion Controller* e o sensor *Mindwave*[®] (Fig. 2.11). O estudo foi realizado em pacientes com faixa etária entre 4 e 8 anos e sua validação foi feita através de um questionário respondido por oito especialistas que acompanharam as sessões. Como resultado, a utilização do LMC na reabilitação de pacientes com PC demonstrou ser viável pelos especialistas e estes se

mostraram bastante otimistas com a possível eficácia do ambiente virtual na reabilitação motora e cognitiva.

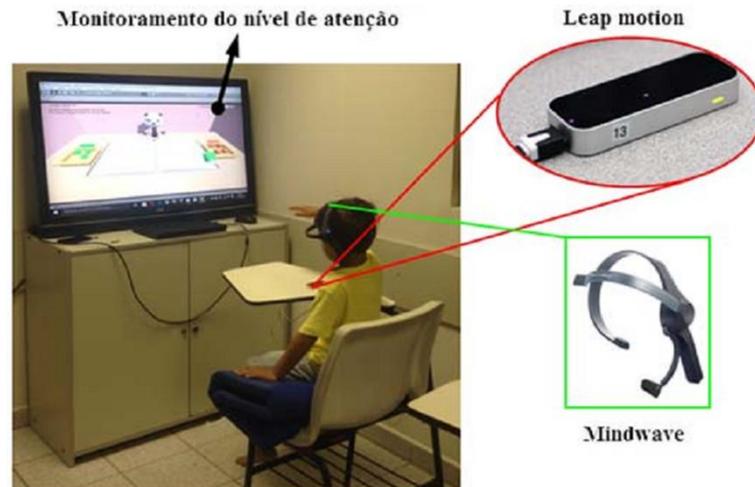


Figura 2.11 – Utilização do ambiente virtual em OLIVEIRA, *et al.*, 2016.

Em uma dissertação no mesmo ano (HOSSEINPOUR, 2016), o autor avalia o uso do sensor *Kinect* e do LMC para estimar sintomas do Mal de Parkinson. O LMC foi utilizado para a detecção de tremores nas mãos dos pacientes. O autor conclui que a tecnologia combinada dos dois sensores pode auxiliar no diagnóstico dessa doença.

Ainda em 2016, TREVIZAN (2016) compara a viabilidade do uso do LMC, *Kinect* e *tablet* em exercícios realizados por pacientes de Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA). Seus resultados apontam que, em comparação com o dispositivo com tela sensível ao toque (*tablet*), os dispositivos virtuais possuem menor eficácia devido à sua característica abstrata.

Em 2017, SOARES, *et al.* (2017) avaliaram a aplicabilidade do LMC na reabilitação do membro superior através do jogo *Playground 3D*® em 3 pacientes que sofreram AVE (Fig. 2.12). Os resultados do treinamento com o LMC se mostraram promissores, proporcionando participação ativa dos pacientes em sua reabilitação.

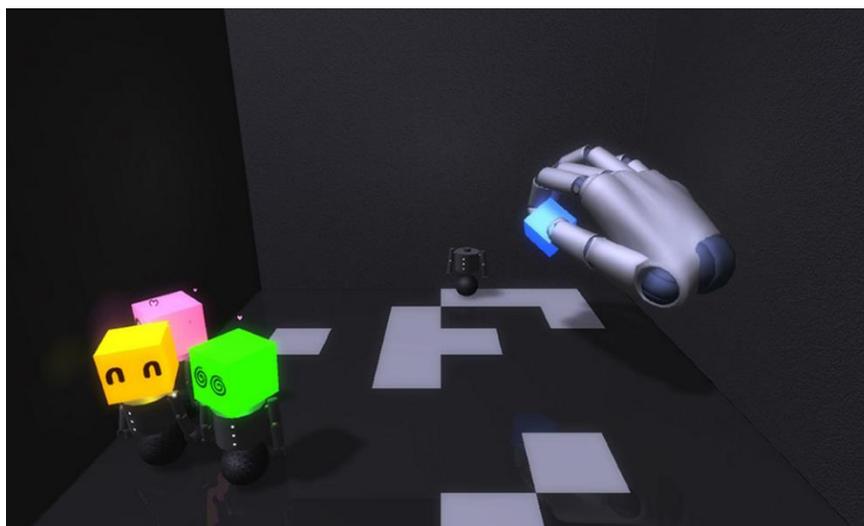


Figura 2.12 – Jogo *Playground 3D*® utilizado em SOARES, *et al.*, 2017.

Em LUGO, *et al.* (2017), os autores criaram um cenário em realidade virtual para avaliar e classificar o tremor das mãos de 33 pacientes com MP utilizando o LMC. A conclusão que chegaram é que o sistema que criaram consegue classificar o estágio do Mal de Parkinson com eficácia.

BUTT, *et al.* (2017) investigam o potencial do uso do LMC na avaliação do desempenho motor em pacientes com Mal de Parkinson. Os resultados permitiram aos autores concluir que o LMC possui limitações na avaliação do desempenho motor devido ao tremor persistente mesmo em ações estáticas.

Ainda em 2017, VANBELLINGEN, *et al.* (2017) avaliaram a aplicabilidade do uso de jogos utilizando o LMC na reabilitação da coordenação motora fina de 13 pacientes que sofreram AVE como um adicional à terapia convencional. Os resultados mostraram uma excelente praticidade no uso do sistema enquanto os pacientes apresentaram melhora significativa na destreza de suas mãos. Como conclusão, a terapia utilizando jogos e LMC se mostrou uma boa ferramenta para a reabilitação motora de pacientes que sofreram AVE.

Em LI, *et al.* (2017), os autores desenvolveram um sistema composto de um algoritmo que monitora gestos utilizando o LMC durante a reabilitação residencial de pacientes que sofreram AVE. Os resultados mostraram eficácia acima de 97% no reconhecimento dos gestos utilizados no experimento.

Em 2018, WU, *et al.* (2018) avaliaram a capacidade do LMC em auxiliar na reabilitação de atividades motoras da mão de pessoas que sofreram queimaduras em uma explosão que aconteceu em um parque aquático em Taiwan. Durante a pesquisa, 16 participantes foram divididos entre o grupo de controle e o grupo utilizando o LMC. No grupo de controle, os participantes fizeram terapia ocupacional durante 60 minutos e no grupo do LMC eram 40 minutos de terapia ocupacional e 20 minutos utilizando jogos do LMC (Fig. 2.13). As sessões

eram realizadas duas vezes por semana durante quatro meses. Os autores observaram um aumento na amplitude do movimento do polegar e na força de preensão palmar e diminuição da cicatriz. A conclusão foi de que o treinamento utilizando o LMC poderia ajudar pacientes que sofreram queimaduras aumentando a amplitude de movimento dos dedos, diminuindo a cicatriz e melhorando a função da mão.



Figura 2.13 – Jogos utilizados como terapia em WU, *et al.*, 2018.

Em SYAHPUTRA, *et al.* (2018), os autores utilizaram a tecnologia de realidade aumentada combinada com o LMC para contar para crianças com autismo histórias sociais (histórias curtas que tem como objetivo auxiliar crianças com autismo a interpretar e entender situações sociais) (Fig. 2.14).



Figura 2.14 – História social em realidade aumentada utilizando o LMC em SYAHPUTRA, *et al.*, 2018.

Ainda em 2018, LIN, *et al.* (2018) utilizaram uma combinação do LMC com outros dispositivos para a realização de reabilitação em pacientes que sofreram AVE. Os autores

acreditam que a integração de realidade virtual e fisioterapia pode motivar os pacientes, além de melhorar a sua eficácia e diminuir a duração do tratamento.

Já em 2019, LEE, *et al.* (2019) apresentaram um método de quantificação da bradicinesia (lentidão na execução de movimentos voluntários) em portadores de Mal de Parkinson utilizando o LMC. Oito pacientes participaram dos testes nos quais realizaram exercícios de movimentação da mão e punho com e sem estimulação cerebral profunda e eram simultaneamente avaliados por três profissionais e rastreados pelo LMC. Ao final, os autores concluíram que o método desenvolvido consegue quantificar rigorosamente a bradicinesia em acordo com as observações clínicas.

Em TARAKCI, *et al.* (2019), o objetivo dos autores foi avaliar a eficácia do Treinamento Baseado no LMC, um método terapêutico para reabilitação dos membros superiores, comparando-o com a reabilitação convencional. O estudo foi realizado durante oito semanas com crianças e adolescentes portadores de Artrite Idiopática Juvenil, Paralisia Cerebral e Lesão do Plexo Braquial ao Nascimento (Fig. 2.15). Como conclusão, os autores afirmaram, através da análise quantitativa dos resultados dos testes, que o treinamento baseado em LMC deveria ser usado como uma alternativa eficiente no tratamento de crianças e adolescentes portadores de deficiência física.



Figura 2.15 – Jogos utilizados por crianças e adolescentes no Treinamento Baseado em LMC (OHNISHI, IWASAKI e TANAKA, 2019).

Em OHNISHI, IWASAKI e TANAKA (2019), os autores almejavam realizar uma avaliação automática para a análise SIAS (do inglês, *Stroke Impairment Analysis Set*), um conjunto de métodos de avaliação do corpo hemiplégico causado por AVC. Os resultados alcançados se mostraram razoáveis nos métodos testados.

Assim, os trabalhos aqui apresentados sobre a utilização do LMC em terapias de reabilitação confirmam o seu potencial como um dispositivo de reabilitação virtual. Após a sua validação neste trabalho, será desenvolvido um jogo sério a fim de se explorar esta capacidade.

CAPÍTULO III

ESTUDO SOBRE O LEAP MOTION CONTROLLER

No Capítulo II, foram apresentados diversos trabalhos sobre a análise da precisão e acuracidade do LMC. Entretanto, como a sua API tem sido aprimorada ao longo dos anos, pode-se dizer que alguns trabalhos que utilizaram versões anteriores de sua SDK já estão com sua avaliação defasada. Nesta dissertação, pretende-se desenvolver uma aplicação que precisa usufruir ao máximo o potencial deste dispositivo e, para isso, é necessário realizar uma análise experimental bem aprofundada de suas capacidades e limitações na versão que o jogo utilizará.

3.1 Características do Leap Motion Controller

Lançado para desenvolvedores em outubro de 2012 e, posteriormente, para o público geral, em julho de 2013, o *Leap Motion Controller* consiste, basicamente, em duas câmeras e três LEDs infravermelhos (Fig. 3.1). O seu funcionamento baseia-se no princípio da estereoscopia e as imagens obtidas pelas câmeras são gravadas em sua memória interna para posteriormente serem transmitidas via interface USB para o software de rastreamento (COLGAN, 2014).



Figura 3.1 - Composição do *Leap Motion Controller* (COLGAN, 2014).

A partir das imagens colhidas pelas câmeras, são retiradas informações como coordenadas cartesianas de posição e orientação das pontas dos dedos e da palma da mão, por exemplo (API Overview, 2017).

O aparelho, vendido no próprio site do fabricante por 80,00 dólares, possui um espaço de trabalho de 80 cm acima do controlador, com 80 cm de largura em cada lado em um ângulo de 150°, com 80 cm de profundidade em cada lado em um ângulo de 120°, como esquematizado na Fig. 3.2.

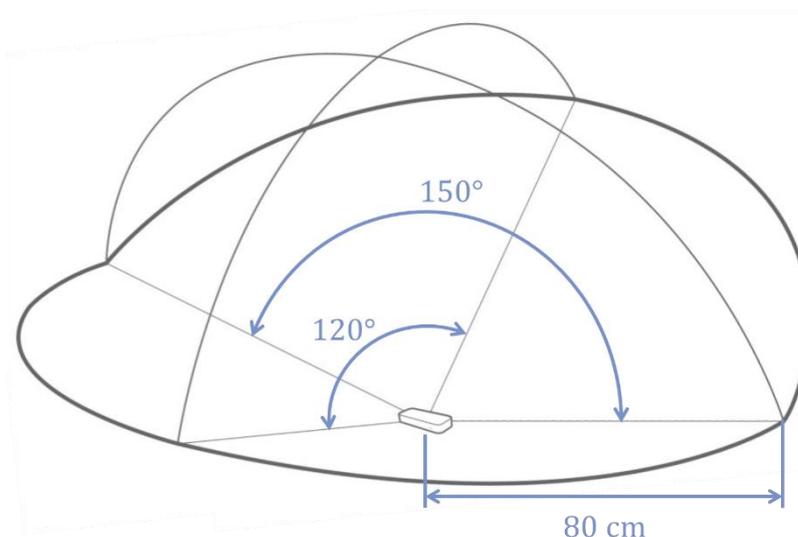


Figura 3.2 – Espaço de trabalho do *Leap Motion Controller* (Adaptado de COLGAN, 2014).

O processamento dos dados retirados das imagens é feito pela Interface de Programação de Aplicativos (API, do inglês *Application Programmer Interface*) que pode ser adquirida sem custos através de uma SDK disponível para download no site da *Leap Motion*. A API do LMC disponibiliza um conjunto de funções que podem ser acessadas através de diversas aplicações para se obter os parâmetros calculados a partir do sensor, como esquematizado na Fig. 3.3.

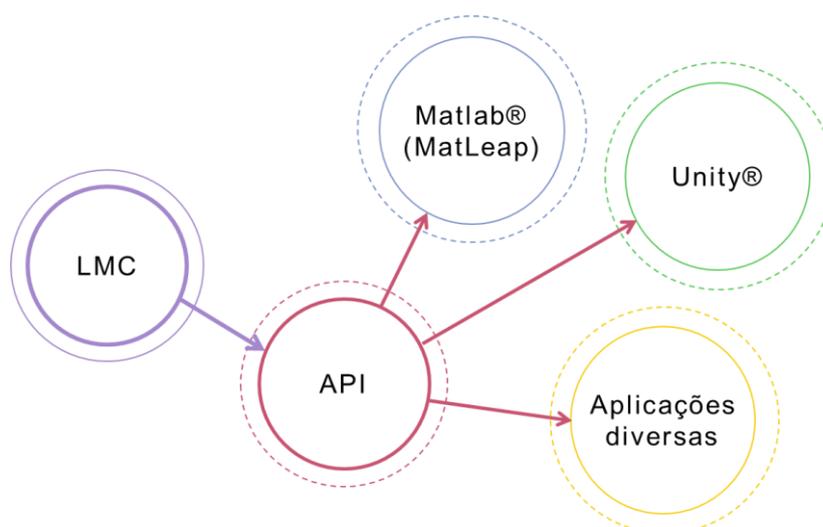


Figura 3.3 – Fluxograma de leitura dos parâmetros do *Leap Motion Controller*.

Os parâmetros possíveis de se extrair e os métodos utilizados em seu cálculo dependem da versão do SDK.

Em sua primeira versão de software, o rastreamento dos dedos não era tão eficiente havendo problemas como a oclusão dos dedos. Já em maio de 2014, sua primeira grande atualização de software (V2) foi disponibilizada para download. Segundo a própria empresa, a nova versão aprimorou a robustez em relação a problemas de oclusão de dedos e melhorou a resistência à luz infravermelha externa (BUCKWALD, 2014). Também aumentou o número de dimensões colhidas para cada mão com um melhor rastreamento do esqueleto das mãos e foram adicionados parâmetros especiais para identificar configurações da mão em forma de pinça, por exemplo. Até essa versão, a API também era capaz de rastrear ferramentas, como hastes e canetas, funcionalidade que foi retirada nas versões futuras (SDK Releases, 2019).

Em fevereiro de 2016, foi lançada a terceira versão do software (V3), também denominada Orion (Introducing Orion, 2016). Esta versão foi projetada visando a integração com visores de realidade virtual. A empresa alega que, na versão Orion, foi melhorada a precisão e rapidez do rastreamento das mãos, além de ter aumentado o alcance visual. Já em junho de 2018, foi lançada a quarta versão (V4), que foi considerada um aprimoramento da versão Orion (Orion V4, 2018). Nesta versão, algumas funcionalidades da API disponibilizadas desde a primeira versão foram descontinuadas, sendo substituídas por funções aprimoradas para o rastreamento em realidade virtual imersiva (Leap Motion Documentation, 2018).

Atualmente a empresa está empenhada no desenvolvimento de uma versão do sensor que seja compatível com dispositivos móveis, como smartphones (HOLZ, 2016) e no desenvolvimento de uma interface de realidade aumentada (Project North Star, 2018).

Os dados colhidos pelo LMC são disponibilizados pela API através de estruturas de dados chamadas *frames*. Cada *frame* é gerado a partir das imagens colhidas pelo LMC na atual iteração e contém informações sobre as entidades rastreadas como mãos, dedos e ossos dos dedos. A partir do *frame* também é possível acessar os dados brutos das imagens para criação de vídeos, por exemplo.

A classe de maior hierarquia da estrutura *frame* é a classe *hand*, que corresponde às mãos rastreadas pelo LMC. Esta classe possui atributos como as coordenadas de posição e velocidade da palma, vetores de direção e ângulo de preensão palmar. A partir da classe *frames*, segue-se uma hierarquia de classes, como mostrado na Fig. 3.4.

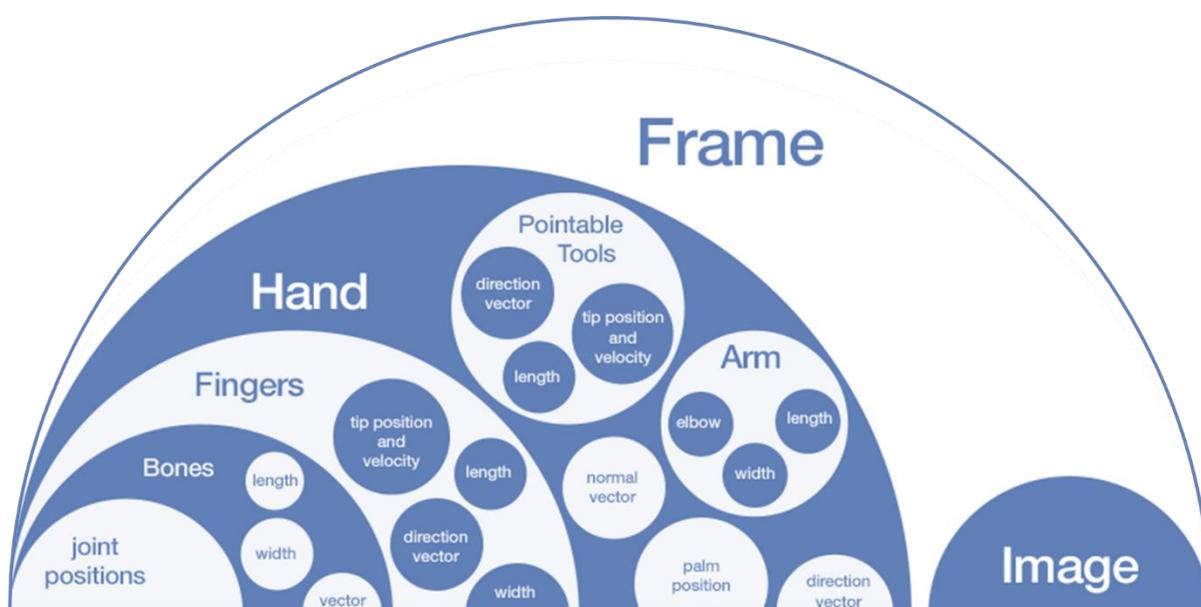


Figura 3.4 – Atributos e classes pertencentes à estrutura *frame* (DAVIS, 2014).

Dentro da classe *hand* tem-se também as classes *arm* e *fingers*, que correspondem ao antebraço e aos dedos da mão, respectivamente. A classe *arm* possui atributos como as coordenadas de posição do pulso e cotovelo, seus vetores de direção, largura e comprimento do antebraço. Já a classe *fingers* possui os atributos de tipo de dedo, coordenadas de posição e velocidade da ponta dos dedos, vetores de direção, largura e comprimento dos dedos. Abaixo da hierarquia da classe *fingers* há também a classe *bones*, que contém as coordenadas de posição dos ossos dos dedos e suas articulações, seus vetores de direção, largura e comprimento de cada osso. Uma representação das entidades pertencentes à classe *hand* é apresentada na Fig. 3.5, cujos pontos de interesse utilizados para esta dissertação estão circulos.

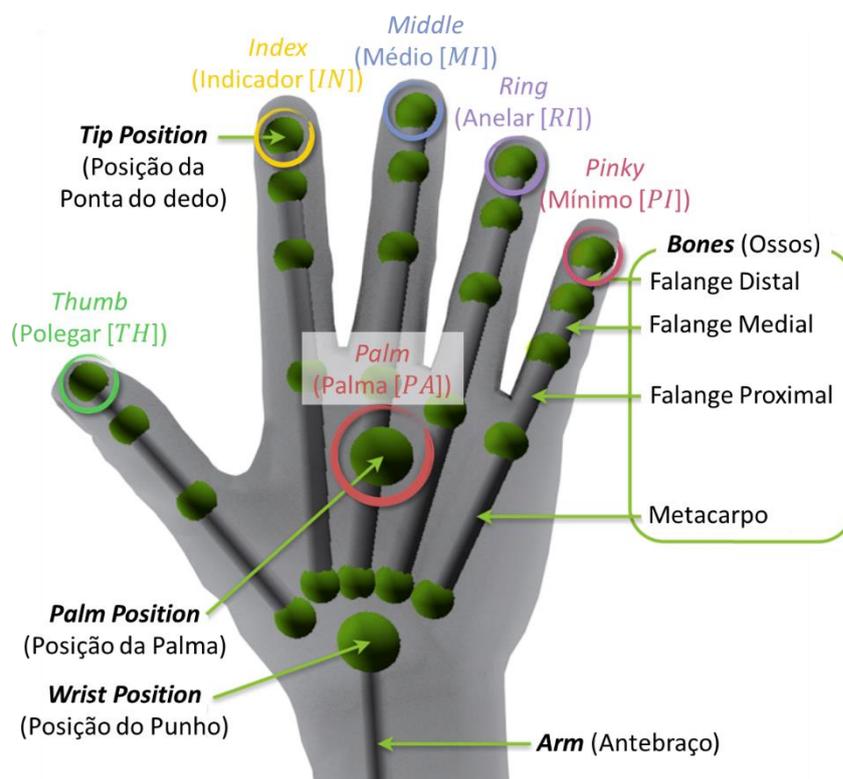


Figura 3.5 – Entidades pertencentes à classe hand (adaptado de DAVIS, 2014).

3.2 Materiais Utilizados nos Experimentos

Reunidas todas as informações pertinentes ao sensor LMC, parte-se para a sua análise experimental afim de se validar se sua precisão está de acordo com a bibliografia. Para isto foi proposto a utilização de um braço robótico industrial com um modelo de mão direita acoplado a partir de uma flange de alumínio ao seu elemento terminal para um posicionamento preciso da mão durante os experimentos. O braço robótico utilizado é o modelo Motoman HP6 (Fig. 3.6a) da marca Yaskawa® utilizando o controlador NX100 (Fig. 3.6b), disponível no Laboratório de Automação e Robótica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. O sistema de referência utilizado para a validação dos experimentos será a do próprio braço robótico, que possui repetibilidade de 0,08mm (HP6 Manipulator Manual, 2007) segundo a norma ISO 9283 (1998).

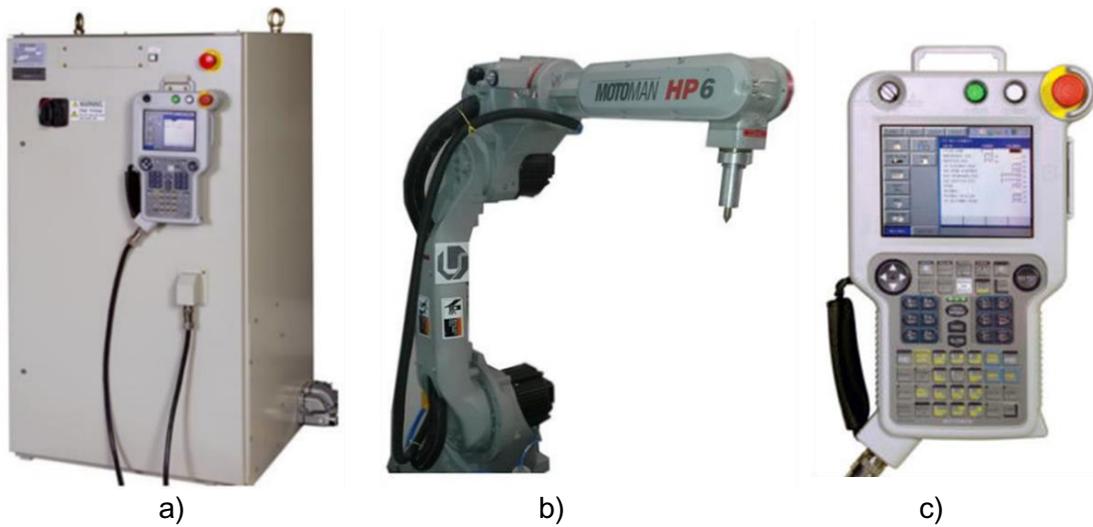


Figura 3.6 – (a) Controlador NX100, (b) Motoman HP6 e (c) *Teach Pendant* (adaptado de VIEIRA, 2016).

O *Leap Motion Controller* foi fixado em uma mesa a frente do braço robótico de forma que a mão de madeira fixa no elemento terminal do robô pudesse se deslocar em diversas orientações dentro do espaço de trabalho do sensor. Ao lado do LMC, à uma distância segura do robô, foi colocado o notebook para o controle dos experimentos. Também foram feitas marcações no chão para o correto posicionamento da mesa durante os ensaios. A disposição dos equipamentos nos ensaios, bem como o modelo de mão de madeira utilizado são mostrados na Fig. 3.7.

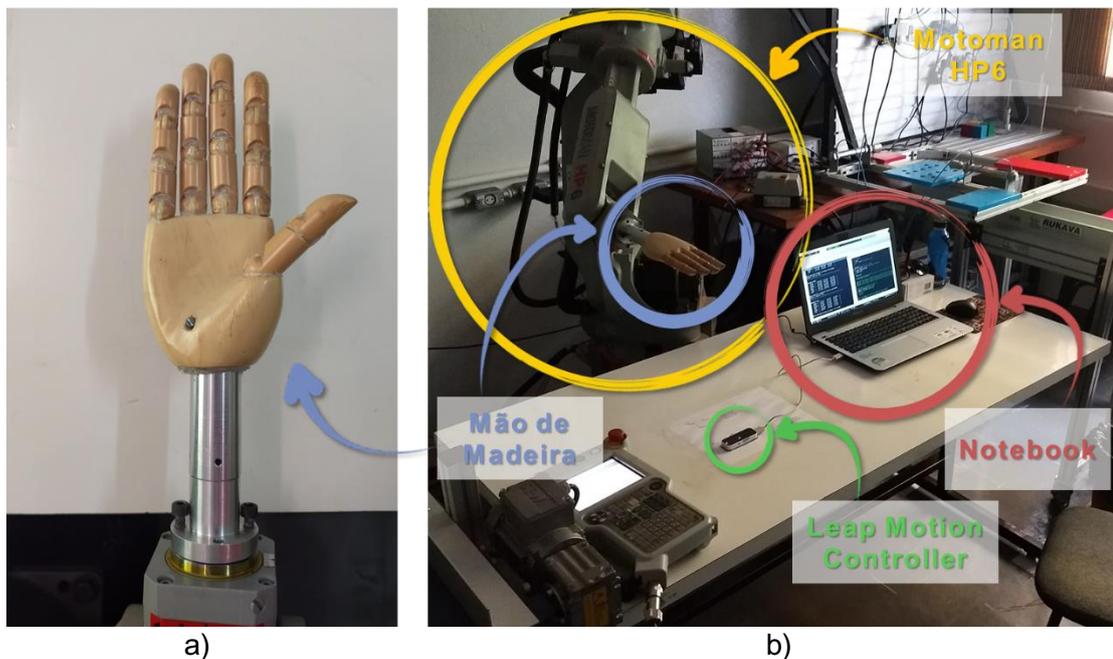


Figura 3.7 – (a) Modelo de mão de madeira e (b) Arranjo dos experimentos.

Para a aquisição dos dados foi utilizado o software Matlab[®] R2017b em um notebook (Intel[®] Core i7-6500U 2.5 GHz 8GB) com Windows[®] 10 e a API do LMC na versão V3. Para que o software se comunicasse com a API do LMC, foi utilizada uma adaptação da biblioteca MatLeap (PERRY, 2014), utilizada como interface entre o Matlab[®] e o sensor. A adaptação foi necessária para incrementar alguns atributos e classes necessários para os experimentos.

3.3 Metodologia dos Experimentos

Por questões de segurança, foi definida uma altura mínima de aproximadamente 15 cm que a palma da mão de madeira iria se aproximar da mesa e do sensor (Fig. 3.8a). Para garantir o correto alinhamento entre os sistemas de referência, foi necessário elaborar uma estratégia para se posicionar e orientar o sensor em relação ao sistema de referência do braço robótico. Sendo assim, um inclinômetro digital da *SmartTool*[®] com precisão de 0,1° (modelo Gen2 SmartTool - Technical Specs, 2019) foi utilizado para reduzir o desalinhamento em relação aos eixos horizontais (Fig. 3.8b e Fig. 3.8c). Com relação aos eixos verticais, foi utilizado o próprio braço robótico para apoiar o sensor durante a sua fixação na mesa (Fig. 3.8d). Desta forma, dentro das limitações apresentadas, o sensor foi posicionado de forma que houvesse o menor desvio possível nas medidas em seus eixos.

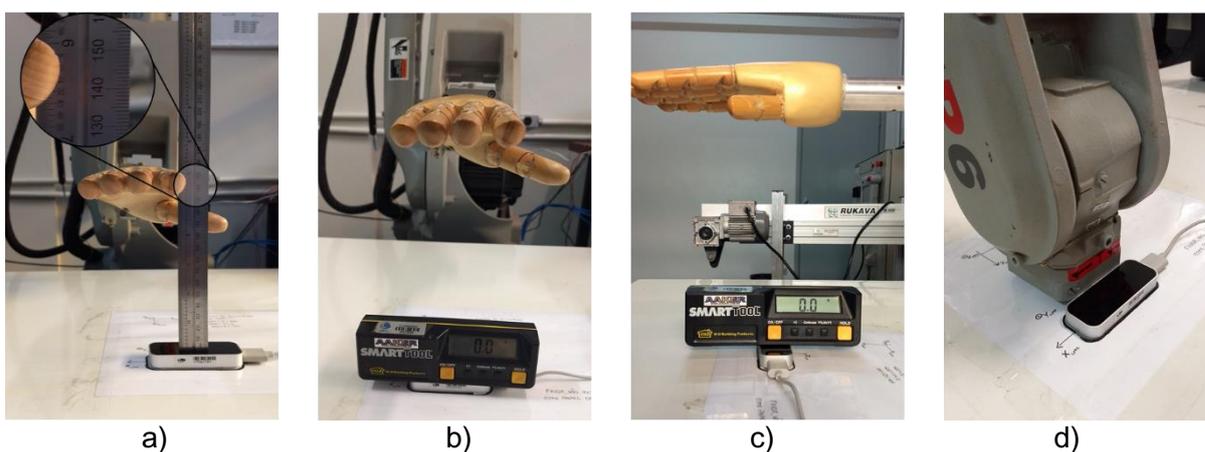


Figura 3.8 – (a) Altura mínima definida para os experimentos; Alinhamento dos eixos (b) Frontal, (c) Lateral e (d) Vertical do LMC.

Após o alinhamento, optou-se por utilizar nos experimentos os tipos de deslocamento linear e angular em cada um dos três eixos do sensor e deslocamentos de trajetória circular em três planos ortogonais entre si, além da realização de experimentos estáticos, possíveis de serem comparados com a literatura.

Também foram determinadas três configurações para o modelo de mão de madeira, com a mão aberta (Fig. 3.9a), com os dedos dobrados em 90° em relação eixo longitudinal da palma da mão (Fig. 3.9b) e com a mão cerrada (Fig. 3.9c), com os dedos em aproximadamente 180°. Em todas as configurações, o polegar fica afastado e os outros dedos próximos uns dos outros.

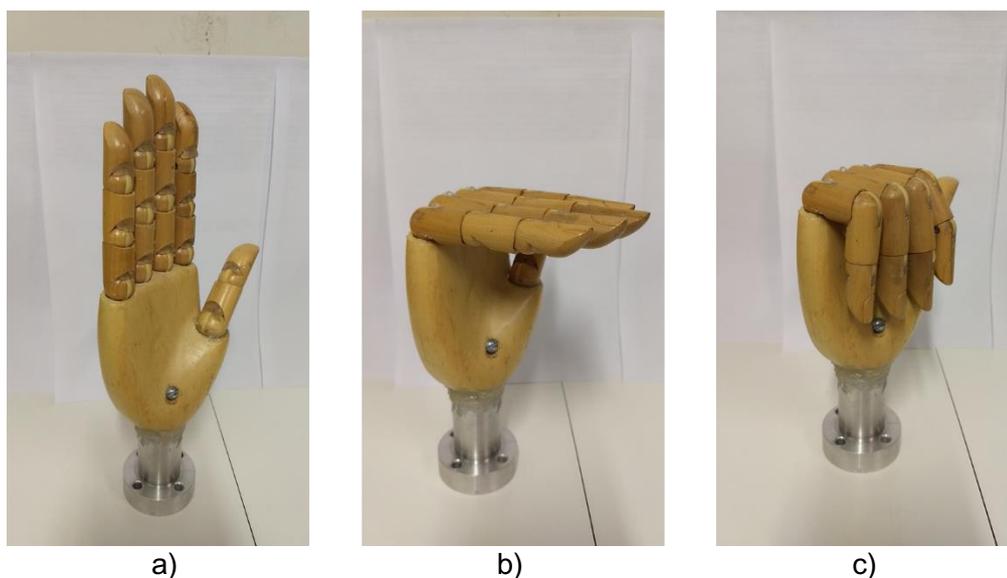


Figura 3.9 – Configurações (a) Aberta, (b) Dobrada e (c) Cerrada da mão de madeira.

3.3.1 Preparação do braço robótico

Na utilização de um braço robótico industrial são necessários diversos cuidados para com a segurança das pessoas no entorno do robô e para com a integridade deste, desta maneira sua manipulação deve ser feita à uma distância segura deste, e o operador precisa estar ciente dos objetos que estão dentro de seu espaço de trabalho.

É recomendado que qualquer instalação ou modificação de seu elemento terminal seja feita com o mesmo desligado, deste modo o acoplamento da mão de madeira foi feito antes do braço robótico ser energizado. Uma vez acionado, o manipulador foi posicionado em uma configuração inicial, a mesma mostrada na Fig. 3.8a.

Como a mesa com o sensor e o notebook precisa ficar próxima ao robô industrial, foram estabelecidos os limites para a movimentação deste em relação ao seu próprio sistema de coordenadas, como mostrado na Fig. 3.10.

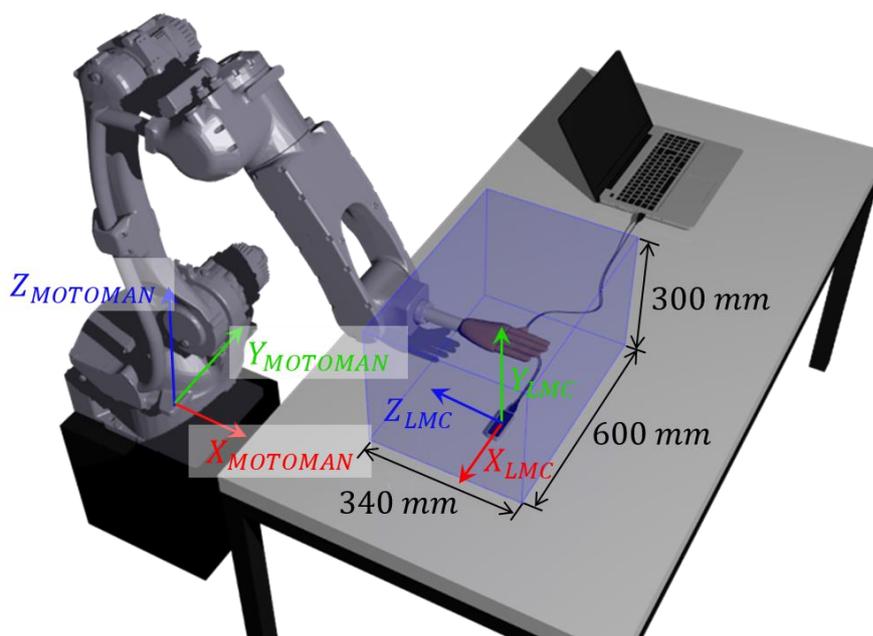


Figura 3.10 – Eixos cartesianos do braço robótico e espaço de trabalho utilizado nos experimentos.

Toda a manipulação e programação do Motoman HP6 é feita através do *teach pendant* (Fig. 3.6c), uma espécie de controle remoto que fica conectado ao controlador NX100. O *Teach pendant* possui botões para a manipulação direta do robô, para inserção de comandos na tela e seleção de modos de funcionamento do mesmo. Ademais, há também uma chave seletora que alterna entre os modos de operação do manipulador, um botão de emergência com trava, além de uma tela sensível ao toque.

Sua programação é feita a partir de instruções correspondentes ao posicionamento e orientação do elemento terminal e tipo de movimento que se deseja executar. Foi desenvolvido um programa diferente para cada experimento realizado, com exceção dos experimentos estáticos que apenas um era necessário. Sendo assim, em cada linha de código de cada programa é especificada as coordenadas cartesianas de posição e orientação para onde o elemento terminal do robô deverá se deslocar. Desta forma, os valores de posição e orientação necessários para se validar as medidas coletadas pelo LMC são conhecidos.

Mais detalhes sobre como é feita a programação deste manipulador utilizado podem ser encontrados em GONÇALVES, 2013.

3.3.2 Preparação do software para coleta de dados

Para que o computador esteja apto para a aquisição dos dados do *Leap Motion Controller*, é necessário ter instalado no sistema operacional e configurado a sua SDK (disponível em SDK Leap Motion), além do software Matlab[®] com a biblioteca Matleap

(PERRY, 2014). Uma vez instalada a API do sensor, é necessário realizar a sua calibração como instruído pelo próprio software.

Para a obtenção dos dados foi desenvolvido um código em Matlab[®] utilizando as funções disponíveis na biblioteca Matleap. Este código possui como parâmetros de entrada um valor do tipo inteiro correspondente ao tempo em segundos de duração do experimento e uma *string* que corresponde a um código identificador do tipo do experimento.

No início do programa de coleta, uma rotina de inicialização do LMC é executada onde são efetuadas quinhentas leituras do sensor. Entende-se por leitura o acesso, por intermédio da biblioteca Matleap, ao último *frame* gerado pela API, e armazenado em um *buffer*, a partir das imagens enviadas pelo LMC.

Uma vez cumprida a inicialização, inicia-se a rotina de leitura e armazenamento dos dados que ocorrerá durante o tempo estipulado como parâmetro de entrada da função. Nesta tarefa, é executada a leitura do atual *frame* e verificado se este é um *frame* novo a partir de sua *ID* (do inglês *identity*). Se o *frame* não for novo a leitura é efetuada novamente, do contrário, a estrutura é salva em uma matriz e um contador de *frames* c é incrementado. Também é verificado se o atual *frame* é válido, isto é, se foi identificada pelo menos uma mão nas imagens, se for válido um contador de *frames* válidos c_v é incrementado.

Ao final da rotina de leitura, a matriz preenchida é examinada e fragmentada em variáveis menores, organizando os dados pertinentes das entidades reconhecidas no ensaio e retirando o que for dispensável ao experimento. Essas variáveis são então salvas em um arquivo no formato padrão do software para a sua posterior análise. Também são armazenadas e salvas as imagens em dados brutos lidas pelo sensor para posterior verificação.

O fluxograma da função de coleta de dados é apresentado na Fig. 3.11.

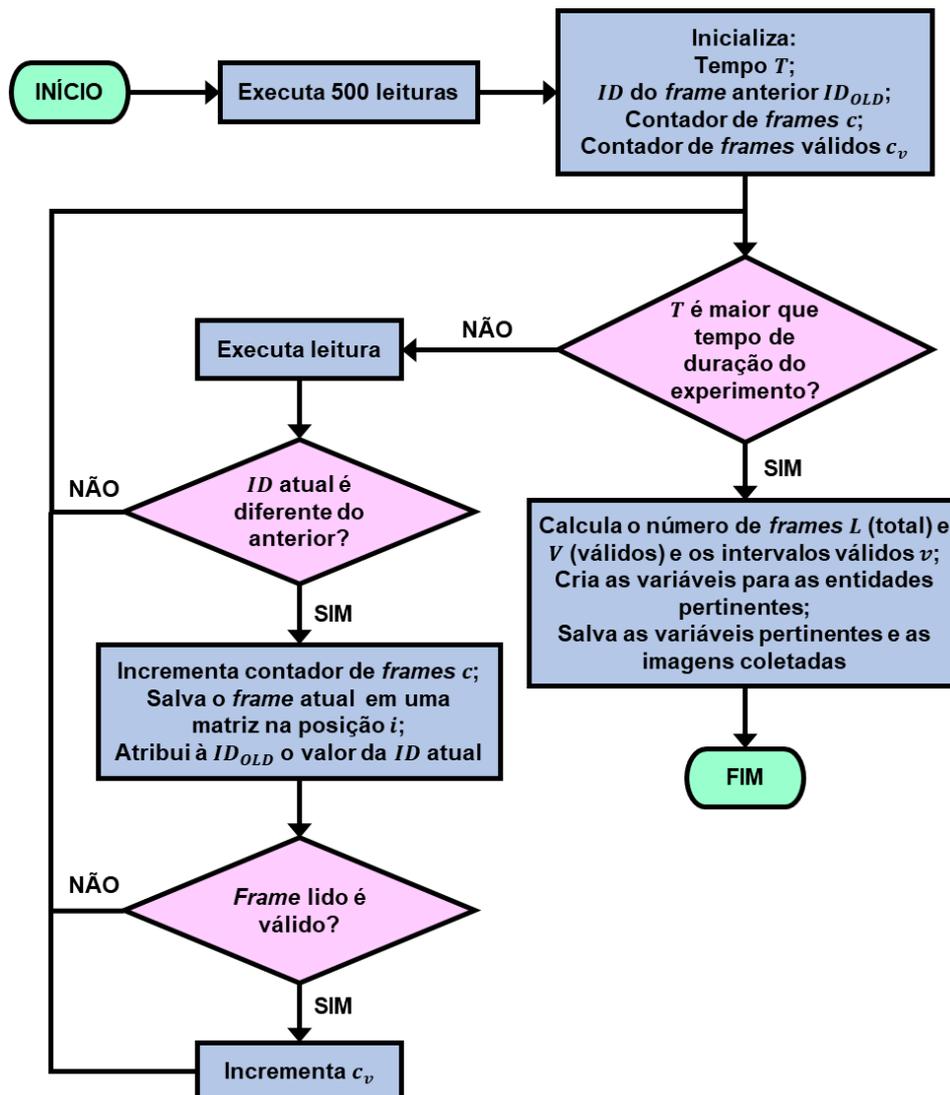


Figura 3.11 – Fluxograma do algoritmo de coleta dos dados do LMC.

Durante a concepção dos experimentos, foram levantados quais dados seriam pertinentes a cada tipo de ensaio. A partir daí, foram adicionadas à função de coleta todas as variáveis necessárias para o armazenamento destes valores. As variáveis coletadas, seu formato, origem e breve descrição são apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis coletadas nos experimentos.

Variável	Formato	Origem	Descrição
L	Inteiro	Contador de <i>frames</i> c	Contagem do número de <i>frames</i> coletados
T	Inteiro	Parâmetro de entrada da função de coleta	Tempo de duração do ensaio
$Time$	Vetor de tamanho L	Marcação do tempo da aquisição de cada <i>frame</i>	Tempo no instante da coleta do <i>frame</i> atual
Fps	Ponto flutuante	Divisão de L por T	Taxa de aquisição média em <i>frames</i> por segundo
V	Inteiro	Contador de <i>frames</i> válidos c_v	Número de <i>frames</i> válidos
$Conf$	Vetor de tamanho L	Atributo da classe <i>hand</i> : “ <i>hand.Confidence</i> ”	Matriz contendo valores de 0 a 1 correspondentes ao nível de convicção da API com relação às medidas feitas em cada <i>frame</i>
Int	Matriz ($v \times 2$)	Matriz criada na função de coleta	Matriz contendo as posições dos <i>frames</i> inicial e final dos v intervalos onde $Conf = 1$
Pos	Célula de 6 matrizes $L \times 3$	Matrizes 1 a 5: Atributos da classe <i>finger</i> : “ <i>finger.StabilizedTipPosition</i> ” Matriz 6: Atributo da classe <i>hand</i> : “ <i>hand.StabilizedPalmPosition</i> ”	As cinco primeiras matrizes contêm as coordenadas cartesianas da posição da ponta de cada um dos dedos em cada <i>frame</i> e a última da posição da palma da mão em cada <i>frame</i>
Dir	Célula de 6 matrizes $L \times 3$	Matrizes 1 a 5: Atributos da classe <i>finger</i> : “ <i>finger.Direction</i> ” Matriz 6: Atributo da classe <i>hand</i> : “ <i>hand.Direction</i> ”	As cinco primeiras matrizes contêm os vetores unitários da direção a qual cada dedo aponta em cada <i>frame</i> e a última o vetor unitário na direção da palma da mão até os dedos em cada <i>frame</i>
Ang	Célula de 6 matrizes $L \times 3$	Matrizes 1 a 5: Atributos da classe <i>finger</i> : (“ <i>finger.Direction.Pitch</i> ”, “ <i>finger.Direction.Yaw</i> ”, “ <i>finger.PalmNormal.Roll</i> ”) Matriz 6: Atributos da classe <i>hand</i> : (“ <i>hand.Direction.Pitch</i> ”, “ <i>hand.Direction.Yaw</i> ”, “ <i>hand.PalmNormal.Roll</i> ”)	As cinco primeiras matrizes contêm os ângulos das pontas de cada um dos dedos em cada <i>frame</i> e a última os ângulos aeronáuticos da palma da mão em cada <i>frame</i>
α	Vetor de tamanho L	Atributo da classe <i>hand</i> : “ <i>hand.GrabAngle</i> ”	O ângulo entre o vetor de direção da palma da mão e a média dos vetores de direção dos dedos da mão (exceto o polegar) em cada <i>frame</i> . Retorna de 0° se a mão estiver aberta até 180° se a mão estiver fechada

Uma vez estabelecidas as variáveis a serem lidas nos ensaios, serão apresentados os tipos de experimentos realizados.

3.3.3 Procedimento para a análise de erros

Na versão Orion da API, não é mais possível rastrear ferramentas como canetas ou hastes (SDK Releases, 2019), e isto torna a sua validação desafiante visto que na mão não há um ponto bem definido para verificar a sua posição absoluta. Sendo assim, optou-se por fazer a validação das medidas através da distância entre o mesmo ponto na mão lido em diferentes posições, visto que o modelo de mão é considerado rígido. Para isto, uma posição de referência foi definida em cada um dos tipos de experimento.

A avaliação do sensor será então feita através do cálculo do erro sistemático, relativo à posição de referência pré-determinada em cada tipo de experimento, e sua precisão (repetibilidade). A estimativa destes parâmetros será feita de acordo com a norma ISO 9283 (1998), relativa à avaliação de desempenho de manipuladores industriais.

A verificação dos experimentos cujos indicadores a serem avaliados são as coordenadas cartesianas da posição dos pontos de interesse, será descrita a seguir.

3.3.3.1 Verificação das medidas de posição

Para a análise das medidas de posição, será considerada a variável Pos coletada nos experimentos. Como a variável é uma célula composta de 6 matrizes $L \times 3$ referentes às entidades lidas na mão, cada matriz será analisada individualmente.

A avaliação dos erros de posição será categorizada conforme o tipo de trajetória do experimento, sendo separada em duas classes: análise a partir de posições bem definidas e análise a partir de uma trajetória contínua. Na primeira, apenas serão considerados para o cálculo, os *frames* em que a mão de madeira se posiciona em uma localização evidente, ou seja, em experimentos estáticos, ou nos quais o braço robótico executa uma parada programada em sua trajetória. Nestes experimentos, uma posição de referência será definida e o erro de medição será calculado a partir do deslocamento programado no robô.

Na Figura 3.12a são representados os vetores médios da posição de referência e da posição de leitura n e suas coordenadas cartesianas.

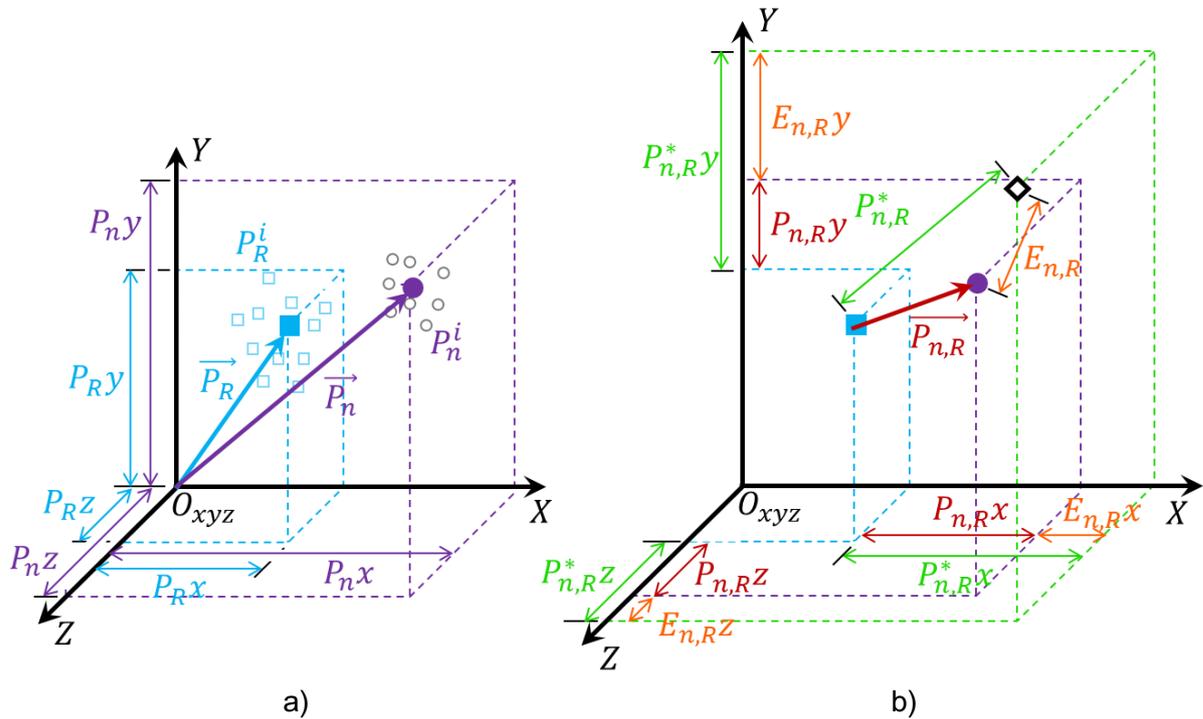


Figura 3.12 – Representação (a) dos vetores médios de posição do ponto de referência (\vec{P}_R) e da posição n de leitura (\vec{P}_n) e (b) do vetor médio, relativo à referência, da posição de leitura ($\vec{P}_{n,R}$), o deslocamento conhecido ($\vec{P}_{n,R}^*$) e seu erro de medição ($\vec{E}_{n,R}$).

As coordenadas medidas na posição n no *frame* i são denotadas pelo vetor $P_n^i = (P_{nx}^i, P_{ny}^i, P_{nz}^i)^T \in \mathbb{R}^3$, para $i = 1, \dots, V_n$ e $n = 1, \dots, N$. O número de posicionamentos da mão durante os experimentos é indicado por N e V_n se refere ao número de *frames* considerados válidos para a verificação. Incluso neste conjunto de vetores posição está o vetor que será usado como referência para as outras $N - 1$ posições daquele tipo de experimento, denotado por $P_R^i = (P_{Rx}^i, P_{Ry}^i, P_{Rz}^i)^T \in \mathbb{R}^3$, para $i = 1, \dots, V_R$. Na Figura 3.12a, os pontos relativos aos vetores P_n^i e P_R^i estão representados através dos símbolos “o” e “□”, respectivamente.

Os vetores que representam a média aritmética da posição n , denotado por \vec{P}_n , e a posição de referência, denotado por \vec{P}_R , são calculados pelas Eq. (3.1) e (3.2), respectivamente, e seus pontos representados na Fig. 3.12a pelos símbolos “•” e “■”.

$$\vec{P}_n = \frac{1}{V_n} \sum_{i=1}^{V_n} \vec{P}_n^i = (P_{nx}, P_{ny}, P_{nz})^T \quad (3.1)$$

$$\vec{P}_R = \frac{1}{V_R} \sum_{i=1}^{V_R} \vec{P}_R^i = (P_{Rx}, P_{Ry}, P_{Rz})^T \quad (3.2)$$

O vetor da posição n relativo à posição de referência é denotado por $\overrightarrow{P_{n,R}} = (P_{n,Rx}, P_{n,Ry}, P_{n,Rz})^T \in R^3$ (Fig. 3.12b) e calculado pela Eq. (3.3).

$$\overrightarrow{P_{n,R}} = \overrightarrow{P_n} - \overrightarrow{P_R} \quad (3.3)$$

O deslocamento real $P_{n,R}^* = (P_{n,Rx}^*, P_{n,Ry}^*, P_{n,Rz}^*)$ entre a posição de referência e a posição n , representado na Fig. 3.12b pelo símbolo “ \diamond ”, é conhecido. Os erros das medidas de posição Ex_n , Ey_n e Ez_n da posição n relativa à posição de referência em cada um dos eixos cartesianos, são expressos pelas Eq. (3.4), (3.5) e (3.6)

$$Ex_n = P_{n,Rx} - P_{n,Rx}^* \quad (3.4)$$

$$Ey_n = P_{n,Ry} - P_{n,Ry}^* \quad (3.5)$$

$$Ez_n = P_{n,Rz} - P_{n,Rz}^* \quad (3.6)$$

e o erro de medição da posição n é calculado pela Eq. (3.7).

$$E_n = \sqrt{Ex_n^2 + Ey_n^2 + Ez_n^2} \quad (3.7)$$

A repetibilidade representa a correlação média, ou grau de concordância, entre as medições sucessivas de uma mesma posição e é representada na Fig. 3.13.

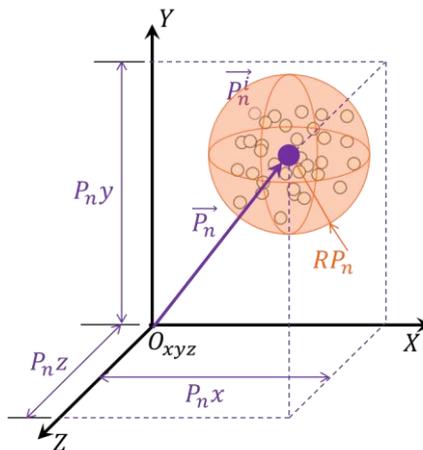


Figura 3.13 – Representação da repetibilidade da medida de uma posição n .

De acordo com a norma ISO 9283 (1998), o cálculo da medida da repetibilidade RP_n da posição n é dada pela Eq. (3.8)

$$RP_n = lP_n + 3SP_n \quad (3.8)$$

sendo lP_n a média dos valores dos desvios lP_n^i entre a posição P_n^i , medida em cada *frame*, e a média dos valores da mesma (P_n), calculados pelas Eq. (3.9) e (3.10)

$$lP_n = \frac{1}{V_n} \sum_{i=1}^{V_n} lP_n^i \quad (3.9)$$

$$lP_n^i = \sqrt{(P_n^i x - P_n x)^2 + (P_n^i y - P_n y)^2 + (P_n^i z - P_n z)^2} \quad (3.10)$$

e SP_n o desvio padrão calculado na posição P_n , dado pela Eq. (3.11).

$$SP_n = \sqrt{\frac{1}{V_n - 1} \sum_{i=1}^{V_n} (lP_n^i - lP_n)^2} \quad (3.11)$$

Resumindo, a avaliação da exatidão e da precisão do LMC em posições bem definidas será feita a partir da análise do erro de medição E_n e da repetibilidade RP_n de cada posição P_n , com $n = 1, \dots, N$.

Para os experimentos em que não há uma posição bem definida na qual o braço robótico executa uma trajetória com movimentação contínua (trajetória circular), a posição de referência para o cálculo do erro será a média das posições lidas.

Desta forma, conhecida a movimentação realizada pelo modelo da mão, calcula-se o erro em relação ao curso já pré-determinado.

A verificação dos experimentos cujos indicadores a serem avaliados são os ângulos medidos nos pontos de interesse será descrita a seguir.

3.3.3.2 Verificação das medidas de orientação

Para a análise das medidas de orientação serão consideradas as variáveis *Ang* coletadas nos experimentos. Como a variável é uma célula composta de 6 matrizes $L \times 3$, referentes às entidades lidas na mão, cada matriz será analisada separadamente. As colunas dessas matrizes representam os ângulos aeronáuticos de arfagem θ , guinada ψ e rolagem ϕ referentes ao vetor direção unitário \vec{U}_n^i (da posição n no *frame* i) armazenado na variável *Dir*.

De acordo com o site do desenvolvedor (Leap Vector), o ângulo θ_n^i simboliza uma rotação do vetor direção \vec{U}_n^i no eixo X e equivale ao ângulo entre o eixo Z negativo e a projeção deste vetor no plano Y-Z. O ângulo ψ_n^i corresponde a uma rotação do vetor direção \vec{U}_n^i no eixo

Y e equivale ao ângulo entre o eixo Z negativo e a projeção deste vetor no plano X-Z. Já o ângulo ϕ_n^i caracteriza uma rotação do vetor direção \vec{U}_n^i no eixo Z e equivale ao ângulo entre o eixo Y e a projeção deste vetor no plano X-Y.

Na Figura 3.14 são representados os ângulos aeronáuticos em relação ao vetor direção unitário.

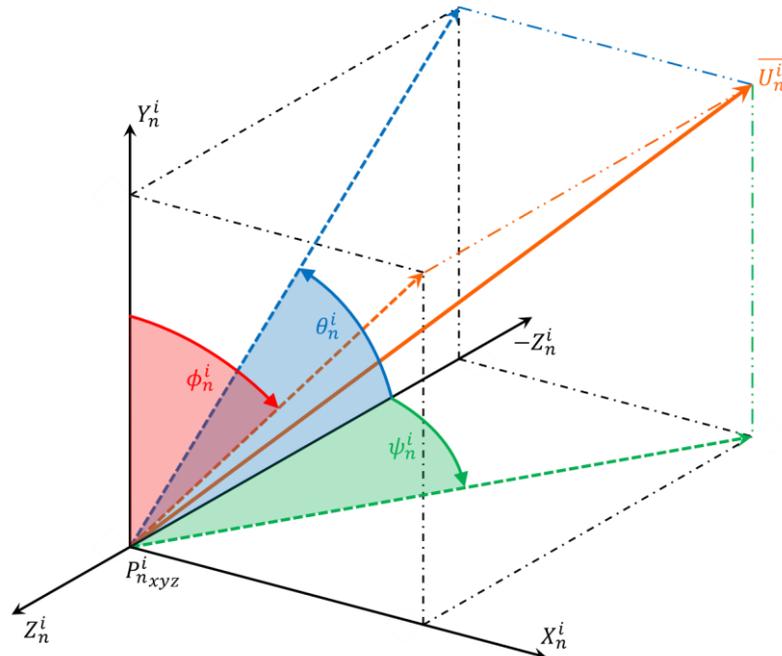


Figura 3.14 – Representação espacial dos ângulos θ_n^i , ψ_n^i e ϕ_n^i em relação ao vetor direção unitário \vec{U}_n^i .

Semelhante ao cálculo das medidas de posição, a verificação das medidas de orientação também será feita utilizando uma referência pré-determinada. O vetor direção da posição n no *frame* i é denotado pelo vetor $U_n^i = (U_n^i x, U_n^i y, U_n^i z)^T \in \mathbb{R}^3$, para $i = 1, \dots, V_n$ e $n = 1, \dots, N$.

Como a API da Leap Motion já faz o processamento dos ângulos aeronáuticos, toda a manipulação necessária será feita a partir dos mesmos. Desta maneira, denota-se por vetor angular $\vec{A}_n = (\theta_n, \psi_n, \phi_n)$ o vetor composto pela média aritmética dos ângulos aeronáuticos medidos na posição n , expresso pela Eq. (3.12).

$$\vec{A}_n = \frac{1}{V_n} \sum_{i=1}^{V_n} (\theta_n^i, \psi_n^i, \phi_n^i) \quad (3.12)$$

Incluso neste conjunto de vetores angulares está o vetor que será usado como referência para as outras $N - 1$ posições utilizadas naquele tipo de ensaio, denotado por $\vec{A}_R = (\theta_R, \psi_R, \phi_R)^T \in \mathbb{R}^3$, para $i = 1, \dots, V_R$.

O vetor angular da posição n relativo à posição de referência é expresso pela Eq. (3.13).

$$\vec{A}_{n,R} = \vec{A}_n - \vec{A}_R \quad (3.13)$$

O deslocamento angular real $A_{n,R}^* = (\theta_{n,R}^*, \psi_{n,R}^*, \phi_{n,R}^*)^T \in \mathbb{R}^3$ entre a posição de referência e a posição n é conhecido. É pertinente antecipar que, nos ensaios de avaliação da orientação, os deslocamentos angulares serão executados em torno de cada eixo separadamente, isto é, não haverá combinação de dois ou mais ângulos. Desta forma, o cálculo dos erros de medida de orientação $E\theta_n$ será feito de maneira independente, através da Eq. (3.14) e análogo para $E\psi_n$ e $E\phi_n$.

$$E\theta_n = \theta_{n,R} - \theta_{n,R}^* \quad (3.14)$$

Os ângulos θ , ψ e ϕ medidos em cada plano, bem como os vetores unitários que os representam e seus erros associados estão retratados nas Fig. 3.15a, Fig. 3.15b e Fig. 3.15c, respectivamente.

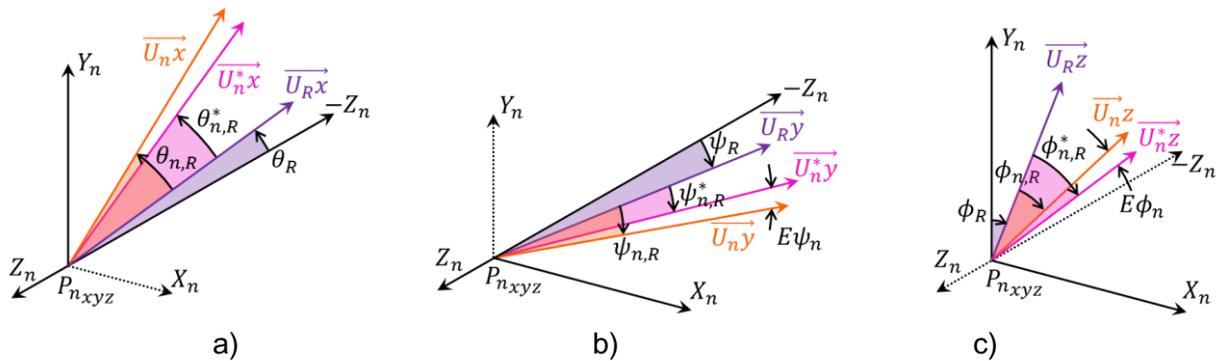


Figura 3.15 – Representação dos ângulos (a) θ , (b) ψ e (c) ϕ medidos e seus erros associados.

Para o cálculo da repetibilidade das medidas de orientação em cada posição n , o mesmo procedimento do tópico anterior será utilizado, porém separadamente para cada ângulo, conforme apresentado na Eq. (3.15) e análogo para ψ e ϕ .

$$R\theta_n = l\theta_n + 3S\theta_n \quad (3.15)$$

Como não haverá combinação entre os ângulos medidos nos eixos ortogonais, a Eq. (3.10) será fragmentada, como mostrado nas Eq. (3.16) e (3.17) e análogo para ψ e ϕ

$$l\theta_n^i = \sqrt{(\theta_n^i - \theta_n)^2} = |\theta_n^i - \theta_n| \quad (3.16)$$

$$l\theta_n = \frac{1}{V_n} \sum_{i=1}^{V_n} |\theta_n^i - \theta_n| \quad (3.17)$$

e o desvio padrão dos ângulos medidos, conforme expresso na Eq. (3.18) e análogo para ψ e ϕ .

$$s\theta_n = \sqrt{\frac{1}{V_n - 1} \sum_{i=1}^{V_n} (l\theta_n - l\theta_n^i)^2} \quad (3.18)$$

3.3.4 Classificação dos experimentos

Durante a elaboração dos experimentos, foi cogitada qual seria a melhor orientação do LMC em relação à mão de madeira e que resultaria em uma melhor qualidade nas leituras. Deste modo, dois arranjos foram verificados em cada tipo de experimento:

- Disposição Longitudinal, cujo eixo paralelo à mão é o eixo longitudinal do LMC;
- Disposição Transversal, cujo eixo paralelo à mão é o eixo transversal do LMC.

Uma representação dos dois arranjos é exibida na Fig. 3.16.

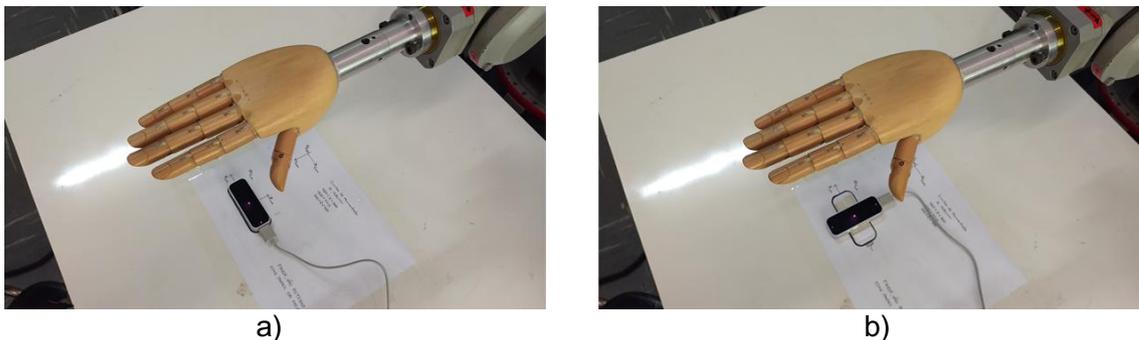


Figura 3.16 – Disposições do LMC utilizadas nos experimentos: (a) Transversal e (b) Longitudinal.

Além da divisão dos experimentos de acordo com a disposição do LMC, foi feita também a classificação conforme o tipo de movimentação do braço robótico. Deste modo, os ensaios foram categorizados em:

- Experimentos Estáticos (EEST);

- Experimentos de Deslocamento Linear (EDL);
- Experimentos de Deslocamento Angular (EDA);
- Experimentos de Deslocamento Circular (EDC).

Para os experimentos de deslocamento angular e circular, também será calculada a média do ângulo α , referente ao ângulo de abertura da mão. Para fins de comparação, foi realizada a medida deste ângulo antes dos ensaios, utilizando um goniômetro de 1° de resolução. O ângulo medido no goniômetro para as configurações aberta (Fig. 3.17a), dobrada (Fig. 3.17b) e cerrada (Fig. 3.17c) foram de, respectivamente, 0°, 90° e 175°.

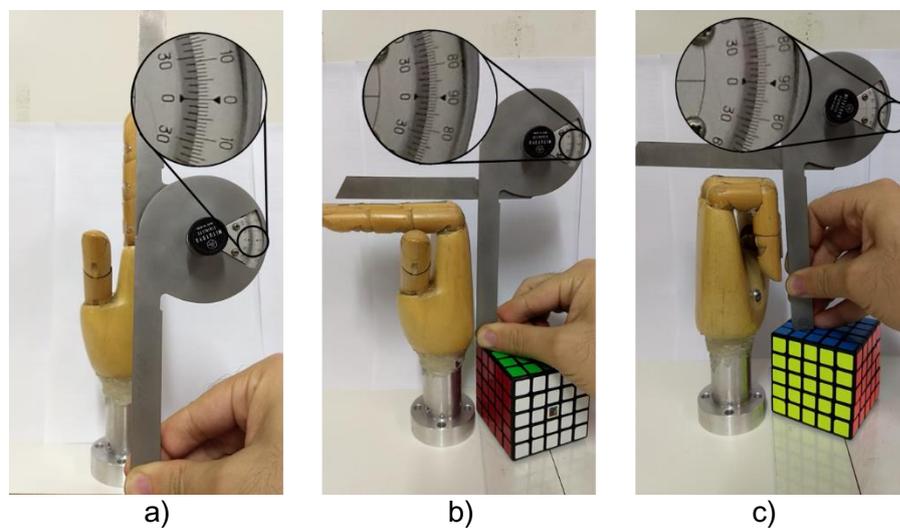


Figura 3.17 – Medida dos ângulos de abertura da mão para as configurações (a) Aberta, (b) Dobrada e (c) Cerrada.

Como o cálculo do ângulo α pela API é feito a partir do vetor direção médio dos dedos, não será feito o cálculo do erro em relação às medidas feitas pelo goniômetro. Será observado, ao invés disso, se o sensor consegue identificar as diferentes configurações da mão e o desvio padrão dessas medidas.

A especificação de cada tipo de experimento será descrita a seguir.

3.3.4.1 Experimentos estáticos

Este tipo de experimento possui como objetivos específicos:

- ✓ A observação da taxa de aquisição do sensor em *frames* por segundo;
- ✓ A verificação da consistência das leituras estáticas no espaço de trabalho do sensor dentro dos limites estipulados na Fig. 3.10, isto é, a porcentagem dos *frames* capturados considerados confiáveis pela API;
- ✓ O cálculo do erro da medida da distância entre duas posições de leitura, sendo uma delas considerada referência;
- ✓ O cálculo da repetibilidade das leituras em uma mesma posição.

Os experimentos estáticos são compostos de 27 posições diferentes para a mão de madeira, separadas em três níveis de altura. Como os experimentos foram executados utilizando as duas disposições do LMC (Fig. 3.16), 54 ensaios estáticos foram feitos no total. Para este tipo de ensaio apenas a configuração de mão aberta foi utilizada e em cada experimento foram coletados 30 segundos de leitura. As posições foram definidas no espaço de um cubo de 200 mm de lado e sua disposição é esquematizada na Fig. 3.18.

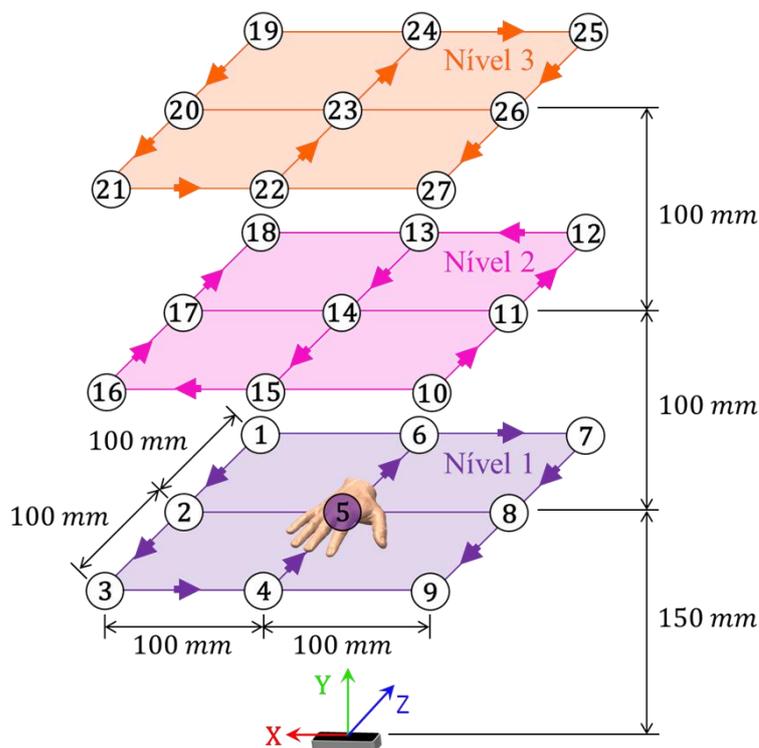


Figura 3.18 – Posições de leitura dos experimentos estáticos.

Nota-se na Figura 3.18 que a posição número 5 está destacada e isto se deve ao fato desta ter sido escolhida como a posição de referência utilizada para o cálculo das distâncias,

pela sua proximidade ao sensor. Logo, são avaliados os erros e a repetibilidade de cada uma das 26 posições restantes para cada disposição LMC considerada.

3.3.4.2 Experimentos de deslocamento linear

Este tipo de experimento possui como objetivos específicos:

- ✓ A observação da taxa de aquisição do sensor;
- ✓ A verificação da consistência das leituras feitas quando há um deslocamento linear;
- ✓ O cálculo do erro das medidas da distância entre duas posições de leitura, sendo uma delas considerada referência;
- ✓ A avaliação da repetibilidade nas posições avaliadas;
- ✓ A investigação de quais eixos do LMC possuem melhor qualidade nas leituras de posição.

Semelhante aos experimentos estáticos, neste apenas a configuração de mão aberta foi utilizada. Neste tipo de ensaio, o modelo de mão executa trajetórias lineares paralelas aos eixos ortogonais do sensor. O movimento se inicia e termina no ponto médio de cada trajetória, sendo realizados cinco ciclos iguais de deslocamento. A sequência de movimentos é descrita na Fig. 3.19.

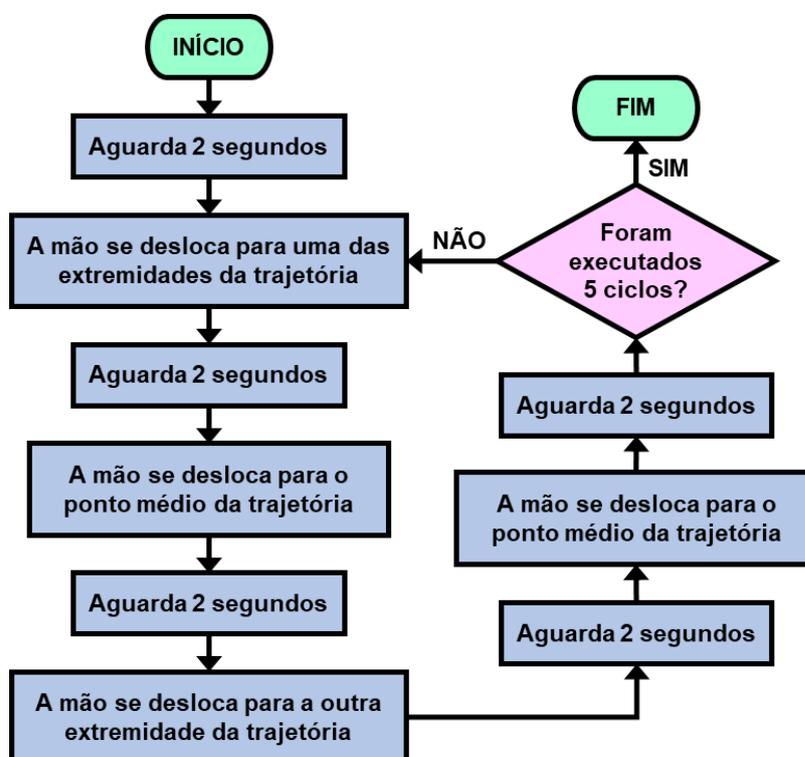


Figura 3.19 – Fluxograma de execução dos experimentos de deslocamento linear.

São sete os experimentos de deslocamento linear, três com trajetória paralela ao eixo lateral do braço robótico (deslocamento lateral), três paralelas ao eixo frontal (deslocamento frontal) e um com deslocamento vertical, paralelo ao eixo Y do sensor (deslocamento vertical). Como os experimentos foram executados utilizando as duas disposições do LMC, 14 ensaios de deslocamento linear foram feitos no total. Em todos estes experimentos, a mão de madeira permanece orientada com a palma da mão virada para baixo, assim como nos experimentos estáticos.

As trajetórias de cada experimento deste tipo de ensaio, bem como o comprimento de cada deslocamento estão esquematizados na Fig. 3.20.

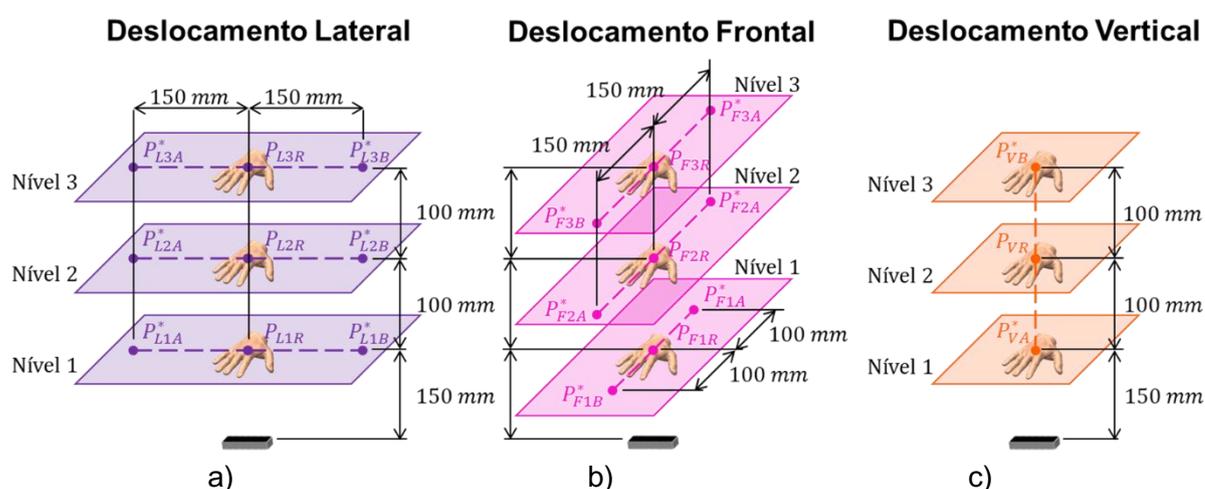


Figura 3.20 – Experimentos de deslocamento linear: deslocamentos (a) Lateral, (b) Frontal e (c) Vertical.

É importante salientar que o EDL Frontal no primeiro nível possui uma trajetória menor que as dos outros níveis em razão da restrição na movimentação do braço robótico. O tempo de duração total de cada experimento foi calculado a partir da cronometragem da execução de cinco ciclos da trajetória. Desta forma, a duração de cada experimento foi de:

- 77 segundos para os EDL Laterais;
- 68 segundos para o EDL Vertical;
- 68 segundos para o EDL Frontal no primeiro nível;
- 77 segundos para os EDL Frontais nos níveis 2 e 3.

Como se pode observar pela Figura 3.20, as posições localizadas no ponto médio da trajetória possuem o índice 'R' por serem as posições consideradas como referência para cada experimento. Assim, as distâncias apresentadas representam o deslocamento real do braço robótico em relação à posição central. Os índices 'A' e 'B' são para diferenciar as posições na apresentação dos resultados. São avaliadas então duas posições para cada um

dos 7 experimentos de deslocamento linear, totalizando 28 posições nas duas disposições do sensor.

3.3.4.3 *Experimentos de deslocamento angular*

Este tipo de experimento possui como objetivos específicos:

- ✓ A observação da taxa de aquisição do LMC;
- ✓ A verificação da consistência das leituras feitas quando há mudança de orientação da mão;
- ✓ O cálculo do erro das medidas angulares;
- ✓ A avaliação da repetibilidade em cada posição considerada;
- ✓ Verificação dos melhores eixos de medição de posições angulares;
- ✓ A verificação da qualidade das leituras para diferentes configurações da mão de madeira;
- ✓ A apuração dos ângulos de abertura para cada configuração da mão.

Neste ensaio, as três configurações da mão serão utilizadas na realização dos três experimentos que compõem este tipo. Em cada um deles, a mão de madeira muda a sua orientação em torno dos três eixos ortogonais do sensor. Cada experimento se inicia e termina com a mão orientada em uma posição de referência, sendo realizados cinco ciclos iguais de deslocamento angular. O fluxograma que representa a sequência de movimentos neste ensaio é apresentado na Fig. 3.21.

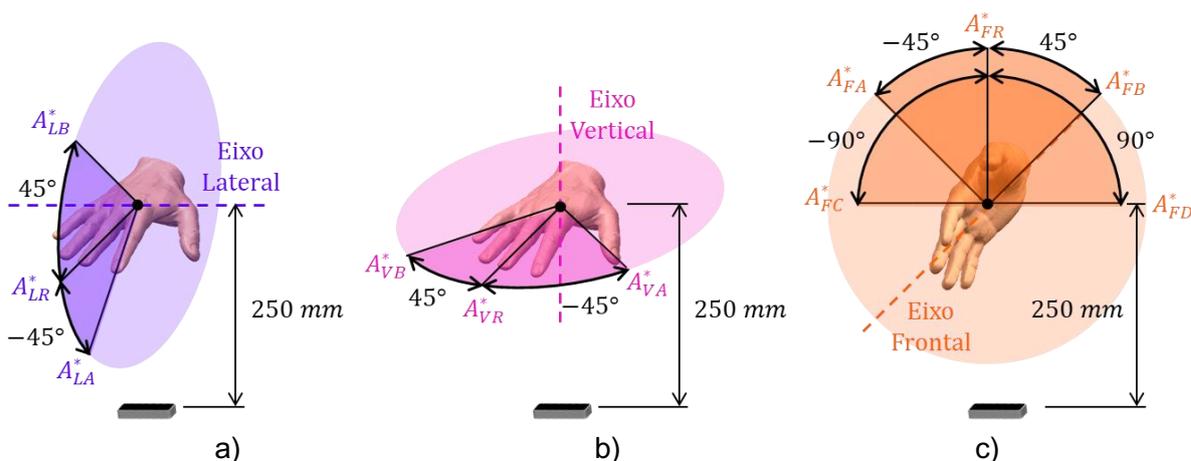


Figura 3.22 – Experimentos de deslocamento angular nos eixos (a) Lateral, (b) Vertical e (c) Frontal.

Como os experimentos foram executados utilizando três configurações da mão para cada um dos três eixos, nas duas disposições do LMC, 18 ensaios de deslocamento angular foram feitos no total sendo avaliadas 48 posições angulares ao todo.

3.3.4.4 Experimentos de deslocamento circular

Este tipo de experimento possui como objetivos específicos:

- ✓ A observação da taxa de aquisição do LMC;
- ✓ A verificação da consistência das leituras feitas quando há deslocamento em mais de um eixo do sensor;
- ✓ O cálculo do erro em relação à trajetória programada;
- ✓ A avaliação da correlação entre dois eixos ortogonais;
- ✓ A apuração dos ângulos de abertura para cada configuração da mão.

Semelhante aos ensaios angulares, este também avalia as três configurações da mão de madeira nos três eixos, porém em uma trajetória circular contínua de 100 mm de raio e sem pausas (Fig. 3.23). A mão de madeira permanece com a palma orientada para baixo em todos os experimentos cujas coordenadas de posição são medidas. A duração de cada um dos ensaios desse tipo é a de cinco ciclos cronometrados, sendo 40 segundos cada.

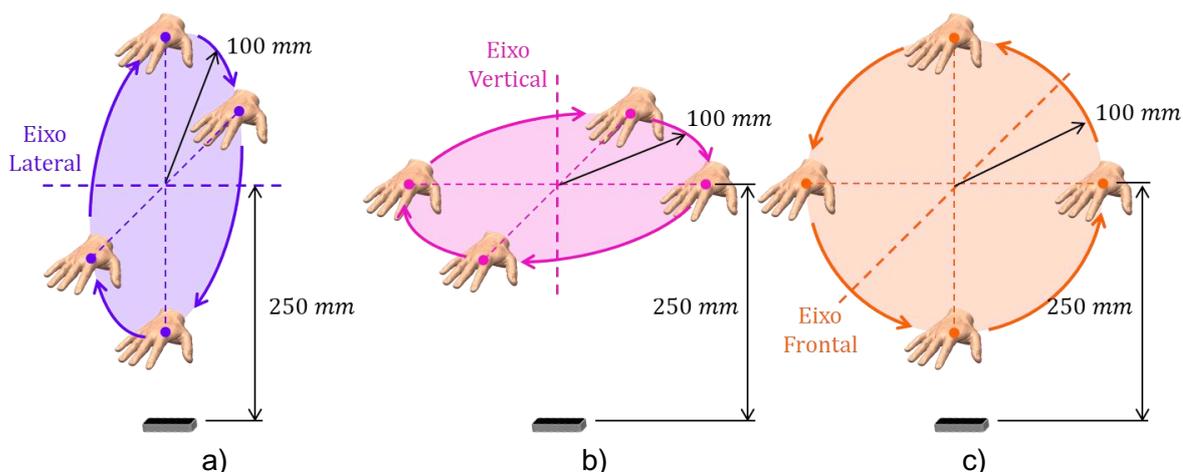


Figura 3.23 – Experimentos de deslocamento circular nos eixos (a) Lateral, (b) Vertical e (c) Frontal.

São três experimentos para cada uma das três configurações da mão, nas duas disposições do LMC, totalizando 18 experimentos.

3.4 Resultados dos Experimentos

A fim de se garantir uma melhor qualidade de leitura nos experimentos, alguns cuidados com o ambiente do laboratório foram tomados, como reduzir a interferência de luz externa, vedando as janelas para não ter influência da luz solar. Outro cuidado que foi tomado foi o de desmarcar algumas opções da API do sensor referentes à orientação automática de seus eixos e ao modo robusto, que aumenta a intensidade dos LEDs infravermelhos conforme sua necessidade. Ambas opções podem prejudicar os experimentos devido ao fato de modificarem automaticamente os parâmetros de leitura.

Ao final de todas as coletas, foi verificada a taxa de aquisição média em *frames* por segundo de cada tipo de experimento e disposição do sensor, como pode ser verificado na Fig. 3.24.

Taxa de aquisição média nos experimentos

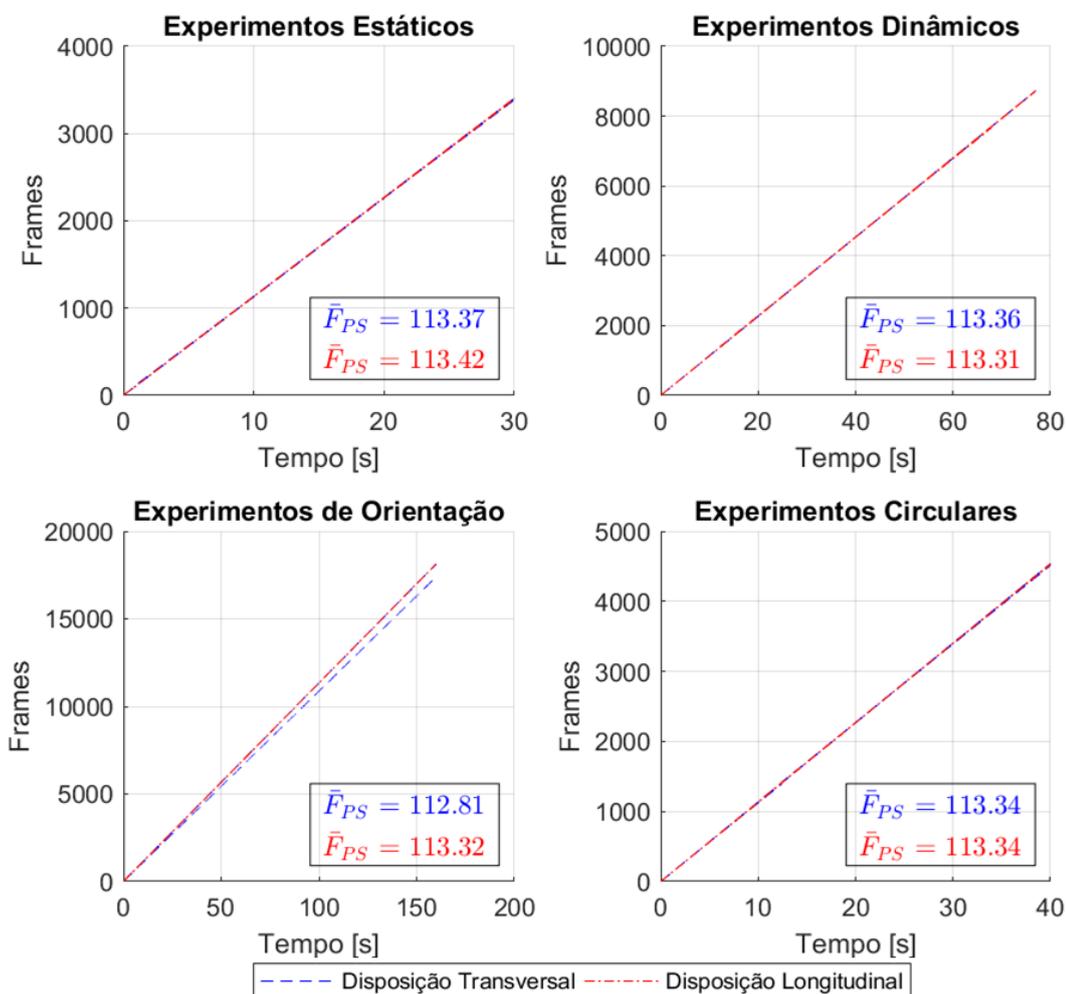


Figura 3.24 – Taxa de aquisição média dos experimentos

Como é possível notar em todos os experimentos, a forma da curva foi uma reta, o que representa uma taxa de aquisição constante. A taxa média de 113,28 fps é muito acima da faixa de 15 a 30 fps considerada satisfatória para a aplicação em um jogo (CLAYPOOL e CLAYPOOL, 2009). Nota-se também que a taxa de aquisição calculada foi o triplo da observada por GUNA, *et al.* (2014) e quase o dobro da observada por TUNG, *et al.* (2015).

Nesta sessão, serão analisados os dados relativos apenas à palma da mão, visto que, a priori, não se pretende utilizar no jogo entradas referentes a cada dedo individualmente. A exposição dos erros relativos aos dedos será apresentada no APÊNDICE A - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA OS DEDOS DA MÃO.

Os resultados referentes a cada um dos tipos de experimentos serão apresentados a seguir.

3.4.1 Análise dos experimentos estáticos para a palma da mão

Visando uma melhor organização, os resultados obtidos nos EEST serão distribuídos conforme a disposição do LMC utilizada, assim, inicialmente, são apresentados na Fig. 3.25 as posições relativas da palma da mão na disposição transversal dispostas em seis gráficos. Os três de cima expõem as posições de todos os experimentos nos planos frontais (XY_{LMC} na disposição transversal), sendo o primeiro relacionado às posições cujo deslocamento em Z_{LMC} é positivo, o segundo com deslocamento em Z_{LMC} nulo e o terceiro com deslocamento em Z_{LMC} negativo. Os três gráficos abaixo exibem as posições de todos os experimentos, porém nos planos horizontais (XZ_{LMC}), sendo o primeiro referente às posições presentes no nível 1, o segundo no nível 2 e o terceiro no nível 3.

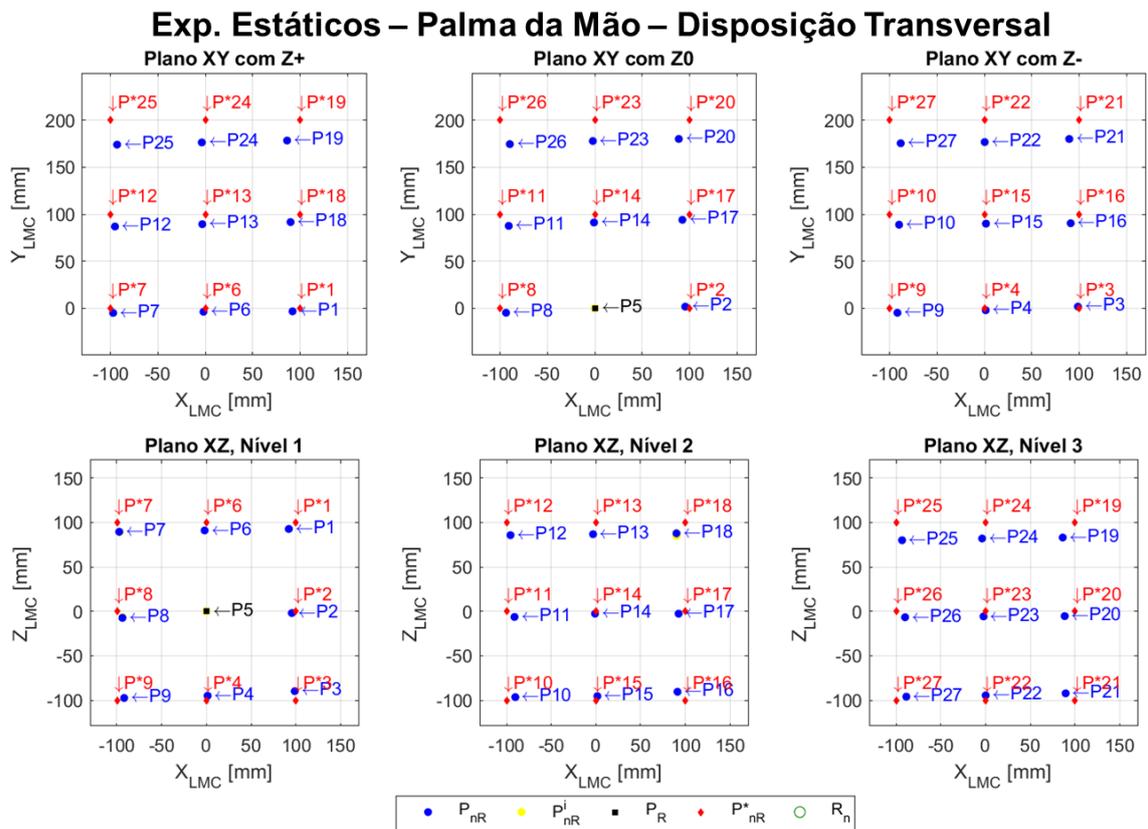


Figura 3.25 – EEST – Posições relativas da palma da mão na disposição transversal.

As coordenadas exibidas nos eixos dos gráficos da Fig. 3.25 são todas relativas à posição de referência P_5 (exibida na cor preta nos gráficos) e, por esse motivo, esta posição se situa na origem dos eixos. Ainda, as posições P_{nR} em azul indicadas nos gráficos correspondem à média das coordenadas da posição relativa de cada experimento. As posições P_{nR}^i indicadas em amarelo são as lidas em cada frame de cada experimento e as indicadas em vermelho P_{nR}^* correspondem ao deslocamento real de cada ensaio. Nos gráficos

da Figura 3.25 também estão os círculos em verde, centrados na posição média relativa de cada experimento, com raio correspondente à sua repetibilidade R_n associada. Deve-se destacar que os pontos indicados em amarelo e os círculos em verde não aparecem pelo fato de as medidas referentes à palma da mão possuírem repetibilidade baixa o suficiente para não se destacarem na escala utilizada para os gráficos. Esta observação também é válida para o gráfico referente à disposição longitudinal.

Os gráficos referentes às posições relativas da palma da mão na disposição longitudinal são apresentados na Fig. 3.26.

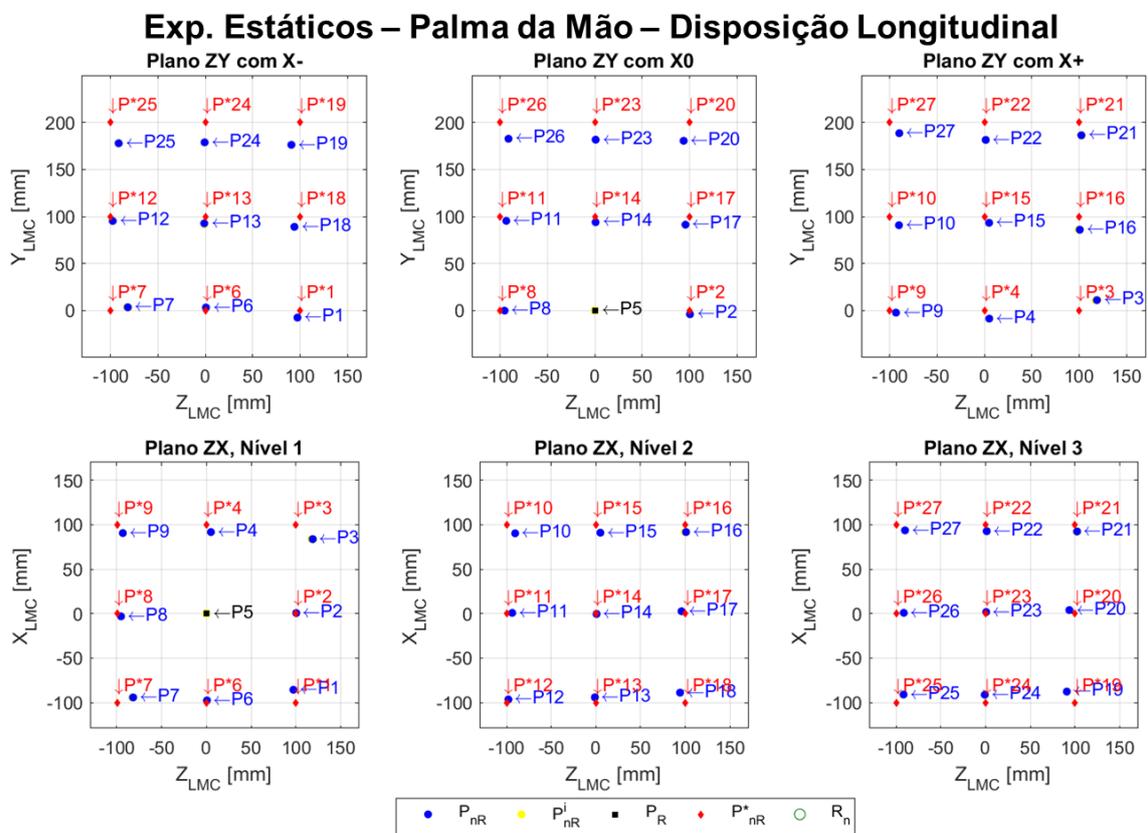


Figura 3.26 – EEST – Posições relativas da palma da mão na disposição longitudinal.

Similarmente aos gráficos na disposição transversal, os três gráficos de cima da Fig. 3.26 correspondem às posições relativas que se situam nos planos frontais (porém, para a disposição longitudinal, se utilizam os eixos YZ_{LMC}) sendo o primeiro relacionado às posições cujo deslocamento em X_{LMC} é negativo, o segundo com deslocamento em X_{LMC} nulo e o terceiro com deslocamento em X_{LMC} positivo. Os três gráficos debaixo correspondem aos planos horizontais, similarmente aos gráficos na disposição transversal.

Na Tabela 3.2 são mostrados os erros E_{nR} , as repetibilidades R_n calculados para todos os experimentos, bem como sua porcentagem de frames válidos V . A posição de referência P_5 está destacada em verde para ambas as disposições do LMC.

Tabela 3.2 - Resultados dos EEST para a palma da mão.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	11,27	0,05	100,00	1	P_1	16,35	0,13	100,00
	P_2	5,22	0,12	100,00		P_2	4,09	0,21	100,00
	P_3	10,37	0,05	100,00		P_3	27,25	1,26	100,00
	P_4	5,61	0,05	100,00		P_4	13,06	0,14	100,00
	P_5	-	0,03	100,00		P_5	-	0,27	100,00
	P_6	10,01	0,05	100,00		P_6	3,92	0,23	100,00
	P_7	12,01	0,52	100,00		P_7	19,25	0,59	100,00
	P_8	10,75	0,64	100,00		P_8	5,54	0,10	100,00
	P_9	9,76	0,15	100,00		P_9	11,76	0,29	100,00
Média	9,38	0,19	100,00	Média	12,65	0,36	100,00		
2	P_{10}	15,37	0,19	100,00	2	P_{10}	16,64	0,11	100,00
	P_{11}	16,68	0,19	100,00		P_{11}	7,99	0,08	100,00
	P_{12}	20,02	0,07	100,00		P_{12}	6,29	0,26	100,00
	P_{13}	17,36	0,07	100,00		P_{13}	9,44	0,83	100,00
	P_{14}	9,35	0,07	100,00		P_{14}	6,25	0,35	100,00
	P_{15}	11,22	0,21	100,00		P_{15}	12,37	0,14	100,00
	P_{16}	16,16	0,22	100,00		P_{16}	16,47	0,85	100,00
	P_{17}	10,06	0,14	100,00		P_{17}	10,13	0,19	100,00
	P_{18}	17,95	2,18	100,00		P_{18}	16,72	0,12	100,00
Média	14,91	0,37	100,00	Média	11,37	0,32	100,00		
3	P_{19}	30,81	0,13	100,00	3	P_{19}	28,35	0,23	98,50
	P_{20}	23,69	0,20	100,00		P_{20}	20,94	0,18	100,00
	P_{21}	23,88	0,19	100,00		P_{21}	15,95	0,47	100,00
	P_{22}	23,99	0,21	100,00		P_{22}	20,11	0,13	100,00
	P_{23}	23,12	0,15	100,00		P_{23}	18,56	0,16	100,00
	P_{24}	30,16	0,13	100,00		P_{24}	23,01	0,20	100,00
	P_{25}	33,65	0,13	100,00		P_{25}	25,39	0,43	100,00
	P_{26}	28,31	0,29	100,00		P_{26}	19,51	0,09	100,00
	P_{27}	27,52	0,17	100,00		P_{27}	16,58	0,19	100,00
Média	27,24	0,18	100,00	Média	20,93	0,23	99,83		
Média*	17,47	0,25	100,00	Média*	15,07	0,30	99,94		
Máximo**	33,65	2,18	100,00	Máximo**	28,35	1,26	100,00		

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

Pela Tabela 3.2 é possível notar que as porcentagens médias dos *frames* válidos para as disposições transversal e longitudinal foram de 100,00% e 99,94%, respectivamente, proporcionando uma boa consistência das leituras estáticas no espaço de trabalho dos EEST.

Os erros médio e máximo observados nos EEST transversais foram de 17,47 e 33,65 mm, respectivamente, ligeiramente maiores que nos EEST longitudinais, com 15,07 e 28,35 mm. Também é possível concluir, a partir das médias calculadas em cada nível, que os maiores erros foram calculados no terceiro nível, onde a mão estava mais afastada do sensor.

Os valores médios para a repetibilidade em ambas disposições do sensor foram de 0,25 e 0,30 mm (transversal e longitudinal), indicando boa precisão em condição de repetibilidade.

Analisando os resultados observados na revisão bibliográfica, WEICHERT, *et al.* (2013), HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015), CURIEL-RAZO, *et al.* (2016) e PLACIDI, *et al.* (2018) utilizaram em seus trabalhos uma versão da SDK do LMC na qual ainda era possível o rastreamento de ferramentas. Desta forma, suas medições foram todas feitas utilizando uma haste como elemento rastreado, o que facilita sua medição por questões geométricas. A análise feita nesta sessão da dissertação foi referente à palma da mão, cujo ponto medido não é bem definido. Ainda assim, os erros médios observados nos EEST transversais e longitudinais são maiores que os apresentados por VALENTINI e PEZZUTI (2016) e próximos aos apresentados por TUNG, *et al.* (2015), trabalhos estes nos quais as medições foram feitas nas pontas dos dedos.

Já com relação às repetibilidades calculadas, seus valores médios foram menores que o observado em GUNA, *et al.* (2014), HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015) e TUNG, *et al.* (2015), e próximos do valor encontrado por WEICHERT, *et al.* (2013).

3.4.2 Análise dos experimentos de deslocamento linear para a palma da mão

A análise dos experimentos de deslocamento linear foi organizada conforme o tipo de trajetória utilizada. Inicialmente serão apresentados os resultados referentes aos deslocamentos laterais. Na Figura 3.27, são exibidos os gráficos de deslocamento linear por tempo, com as disposições do sensor separadas em duas colunas e os experimentos organizados em três linhas.

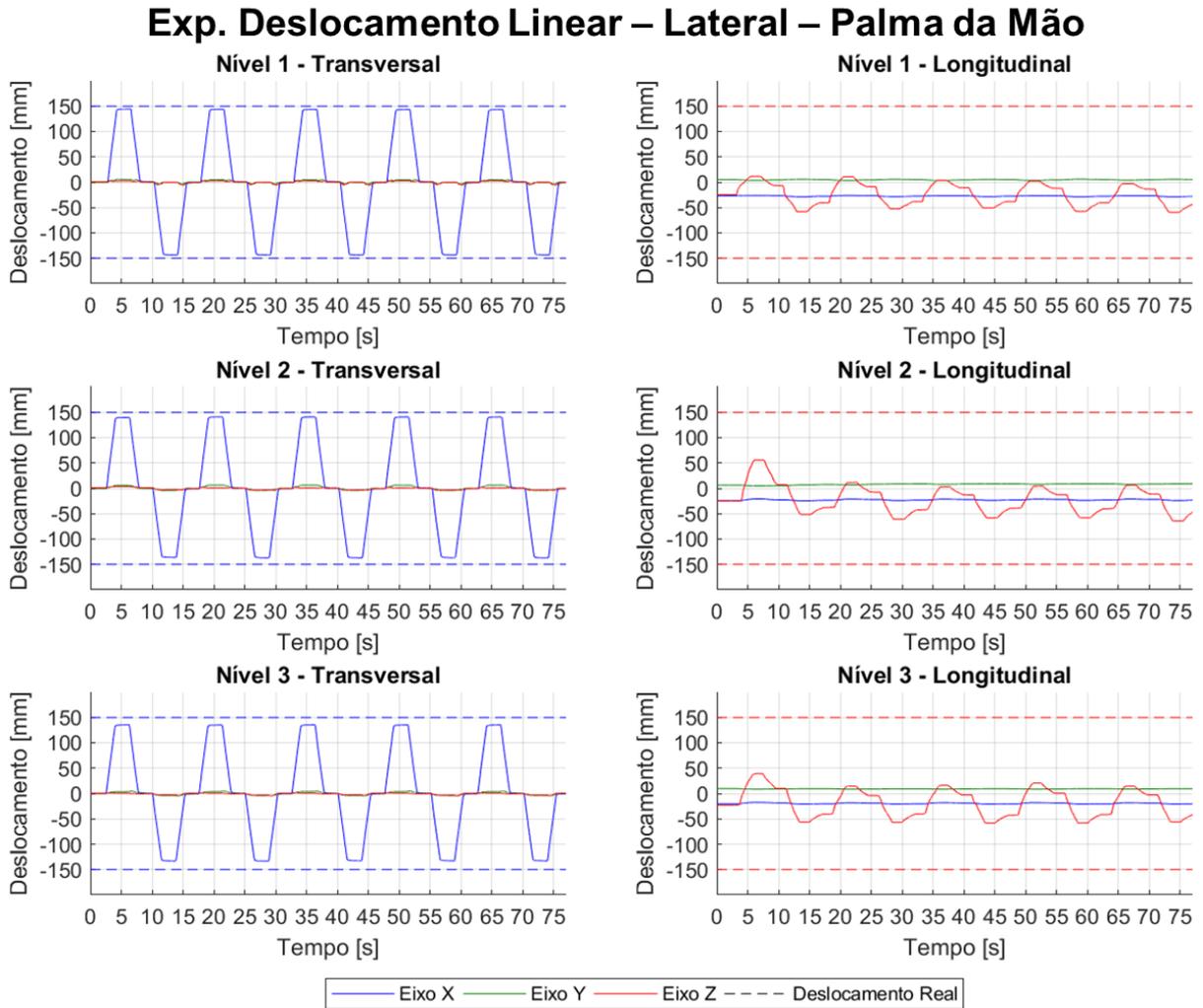


Figura 3.27 – EDL Lateral – Posições relativas da palma da mão.

Os eixos X_{LMC} , Y_{LMC} e Z_{LMC} são diferenciados na Fig. 3.27 pelas cores azul, verde e vermelho, respectivamente e as linhas tracejadas representam os reais deslocamentos com suas cores relacionadas aos eixos em que sua trajetória é predominante. Na análise destes gráficos, espera-se observar um deslocamento bem evidente e de tamanho constante nos eixos onde a trajetória é predominante e uma variação imperceptível para os outros eixos.

Para os EDL laterais transversais, o deslocamento no eixo X_{LMC} é notável, enquanto nos outros eixos a variação é quase imperceptível. A sua forma de onda também corresponde ao movimento realizado pela mão de madeira, sendo perceptíveis os trechos onde houve deslocamento e onde a mão ficou parada. Já nos EDL longitudinais, o deslocamento no eixo Z_{LMC} é evidente, a forma de onda corresponde à trajetória, porém os deslocamentos não apresentam tamanho constante, exibindo uma perceptível variação de uma posição de referência para outra.

Na Tabela 3.3 são apresentados os erros referentes à cada posição de cada um dos EDL laterais.

Tabela 3.3 - Resultados dos EDL Laterais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{L1R}	-	2,29		P_{L1R}	-	28,53	
P_{L1A}	8,36	1,41	100,00	P_{L1A}	121,59	12,41	100,00
P_{L1B}	6,83	0,44		P_{L1B}	118,14	6,26	
P_{L2R}	-	2,08		P_{L2R}	-	35,62	
P_{L2A}	11,41	3,27	100,00	P_{L2A}	111,26	52,64	100,00
P_{L2B}	14,23	1,22		P_{L2B}	114,29	11,28	
P_{L3R}	-	2,01		P_{L3R}	-	40,13	
P_{L3A}	15,42	0,67	100,00	P_{L3A}	110,80	24,66	100,00
P_{L3B}	18,08	0,92		P_{L3B}	112,15	1,85	
Média	12,39	1,59	100,00	Média	114,71	21,71	100,00
Máximo	18,08	3,27	100,00	Máximo	121,59	52,64	100,00

A Tabela 3.3 é dividida horizontalmente conforme a disposição do sensor utilizada e verticalmente conforme o experimento realizado. Em cada experimento são exibidas informações referentes à posição de referência (em verde) e às posições de índice 'A' e 'B' referentes às extremidades das trajetórias.

É possível observar que a média dos erros nos EDL na disposição transversal é dez vezes menor que a média da disposição longitudinal. Uma explicação para isso pode ser que o eixo Z_{LMC} possui baixa exatidão quando comparado ao eixo X_{LMC} .

Com relação à repetibilidade, sua média nos EDL transversais é de 5 à 10 vezes menor que nos longitudinais, indicando baixa precisão em leituras no eixo Z_{LMC} em comparação ao eixo X_{LMC} .

Os gráficos referentes aos EDL verticais são exibidos na Fig. 3.28.

Exp. Deslocamento Linear – Vertical – Palma da Mão

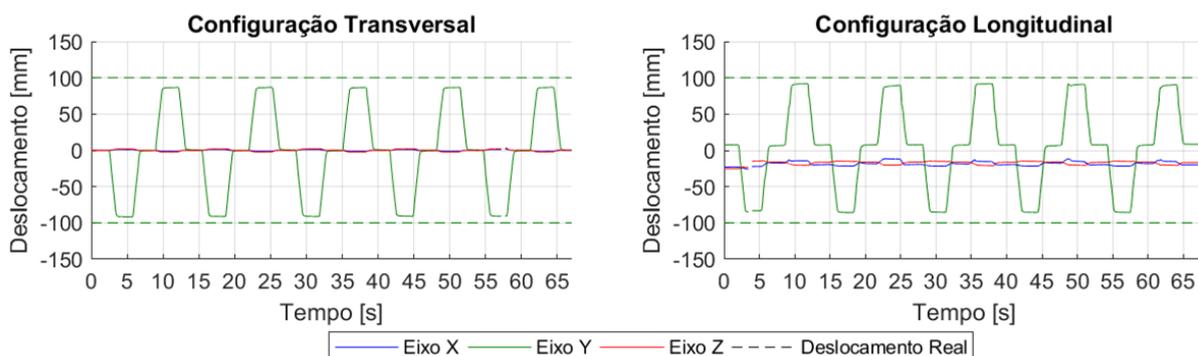


Figura 3.28 – EDL Vertical – Posições relativas da palma da mão.

Analisando a Figura 3.28, é possível notar que, em ambas as disposições, as leituras foram predominantemente no eixo Y_{LMC} , como esperado, e a forma de onda também correspondente ao deslocamento realizado pela mão. Isto indica uma boa qualidade no rastreamento de movimentos verticais.

A Tabela 3.4 apresenta informações sobre os cálculos realizados nos EDL verticais.

Tabela 3.4 - Resultados dos EDL Verticais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	1,48		P_{VR}	-	8,67	
P_{VA}	9,33	1,09	99,21	P_{VA}	8,26	5,71	99,25
P_{VB}	13,70	0,55		P_{VB}	18,14	4,19	
Média	11,52	1,04	99,21	Média	13,20	6,19	99,25
Máximo	13,70	1,48	99,21	Máximo	18,14	8,67	99,25

É possível observar na Tabela 3.4 que a consistência do sensor em ambos EDL verticais foi próxima de 100%, o que indica boa qualidade da amostra.

A média dos erros nos EDL verticais foram de 11,52 e 13,20 mm para as disposições transversal e longitudinal, respectivamente. Já o valor máximo do erro no experimento longitudinal foi maior que o transversal. Outra observação possível de ser feita é que o erro na posição 'B' em ambas as disposições é maior que na posição 'A', o que indica leituras melhores em posições mais próximas ao sensor, como observado em GUNA, *et al.* (2014).

Com relação à repetibilidade, o ensaio transversal obteve média de 1,04 mm, seis vezes menor que o longitudinal, de 6,19 mm. Pode-se constatar para esse tipo de experimento que a disposição transversal obteve melhores resultados que a longitudinal.

Na Figura 3.29 são mostrados os gráficos referentes aos EDL frontais.

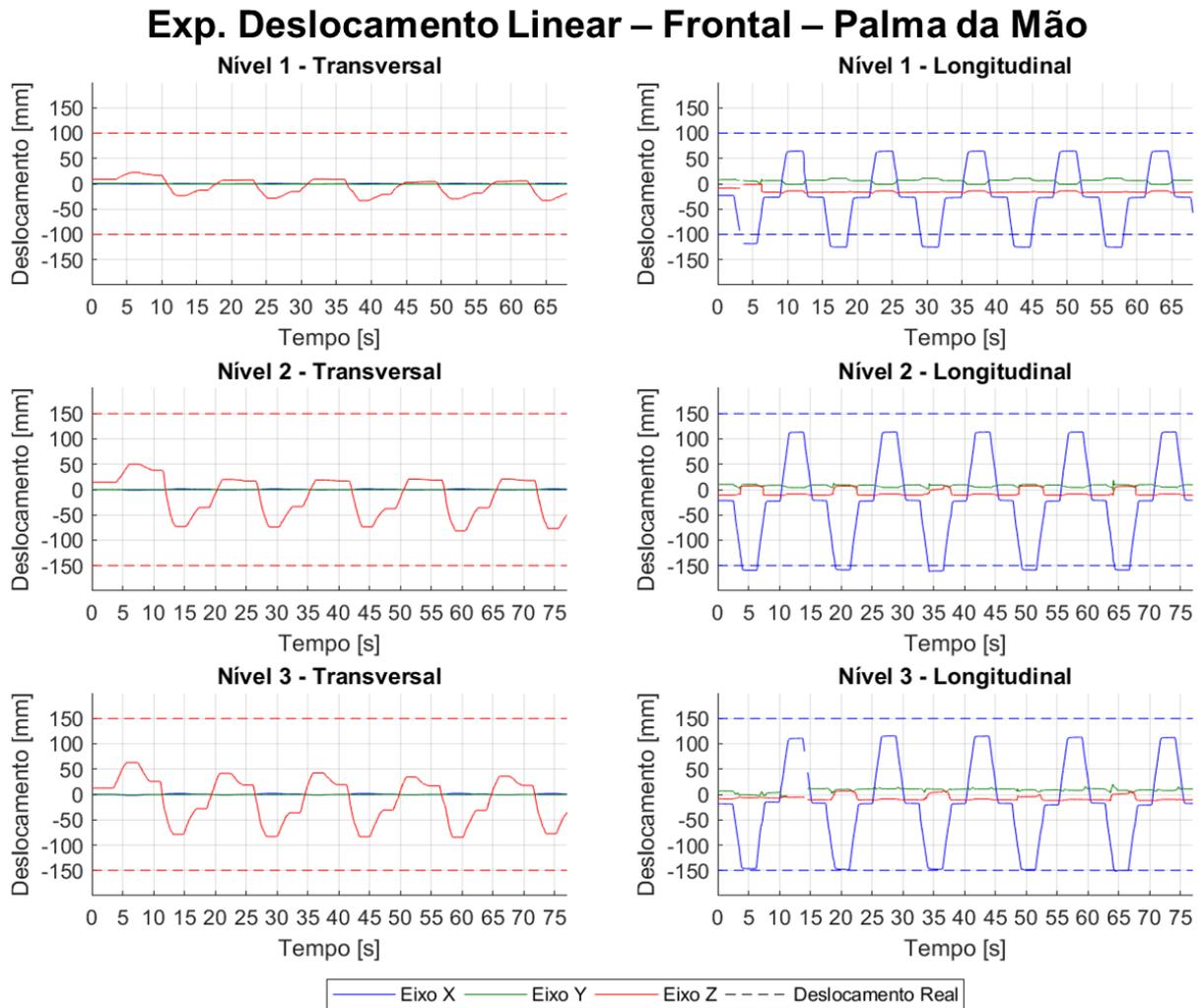


Figura 3.29 – EDL Frontal – Posições relativas da palma da mão.

Os gráficos referentes aos EDL frontais na disposição transversal (Fig. 3.29) apresentam curvas predominantemente no eixo Z_{LMC} , como esperado, porém há uma notável variação entre medidas consecutivas da posição de referência. Já nos gráficos da disposição longitudinal, o eixo X_{LMC} é o predominante e sua forma de onda é condizente com as trajetórias realizadas nos experimentos.

Na Tabela 3.5 são apresentados os cálculos feitos na análise dos EDL frontais.

Tabela 3.5 - Resultados dos EDL Frontais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	26,89		P_{F1R}	-	8,31	
P_{F1A}	91,11	18,32	100,00	P_{F1A}	4,70	17,96	99,27
P_{F1B}	70,28	9,56		P_{F1B}	12,30	1,12	
P_{F2R}	-	54,96		P_{F2R}	-	1,62	
P_{F2A}	123,87	31,04	100,00	P_{F2A}	20,84	7,96	100,00
P_{F2B}	74,28	7,32		P_{F2B}	15,58	0,93	
P_{F3R}	-	45,90		P_{F3R}	-	7,86	
P_{F3A}	106,51	27,87	100,00	P_{F3A}	22,72	14,06	99,36
P_{F3B}	68,45	5,33		P_{F3B}	18,99	16,80	
Média	89,09	25,24	100,00	Média	15,85	8,51	99,54
Máximo	123,87	54,96	100,00	Máximo	22,72	17,96	100,00

Analisando a Tabela 3.5, nota-se que houve boa consistência na coleta das amostras, com praticamente 100% dos *frames* considerados válidos pela API.

Como observado nos EDL laterais, os EDL frontais também apresentaram erro maior quando o eixo predominante é o eixo Z_{LMC} , o que pode ser conferido nos valores médio (89,09 mm) e máximo (123,87 mm) dos experimentos na disposição transversal. Já na disposição longitudinal, cujo eixo X_{LMC} é predominante, os valores médio e máximo (15,85 e 22,72 mm, respectivamente) foram próximos aos observados nos EDL laterais.

Na repetibilidade dos EDL frontais acontece o mesmo fenômeno observado no erro, cujo valor médio (25,24 mm) e máximo (54,96 mm) na disposição transversal foram superiores aos da disposição longitudinal (8,51 e 17,96 mm, respectivamente).

Convém destacar que, tanto os erros quanto as repetibilidades observados nos experimentos de deslocamento linear são bem maiores que os observados nos experimentos dinâmicos de WEICHERT, *et al.* (2013).

Pode-se concluir pelos experimentos de deslocamento linear que os eixos X_{LMC} e Y_{LMC} possuem leituras de melhor qualidade, quando comparado ao eixo Z_{LMC} .

3.4.3 Análise dos experimentos de deslocamento angular para a palma da mão

Semelhante à análise feita nos experimentos de deslocamento linear, os EDA também serão analisados em cada eixo separadamente, iniciando pela análise do deslocamento angular no eixo lateral, seguido pelos eixos vertical e frontal.

Na Figura 3.30, para os EDA laterais, os gráficos são organizados em colunas conforme a disposição do sensor nas coletas e em linhas de acordo com a configuração da mão utilizada nos ensaios. A primeira linha de gráficos mostra os deslocamentos angulares da mão aberta (Fig. 3.9a), na segunda linha os da mão dobrada (Fig. 3.9b) e na terceira os da mão cerrada (Fig. 3.9c);

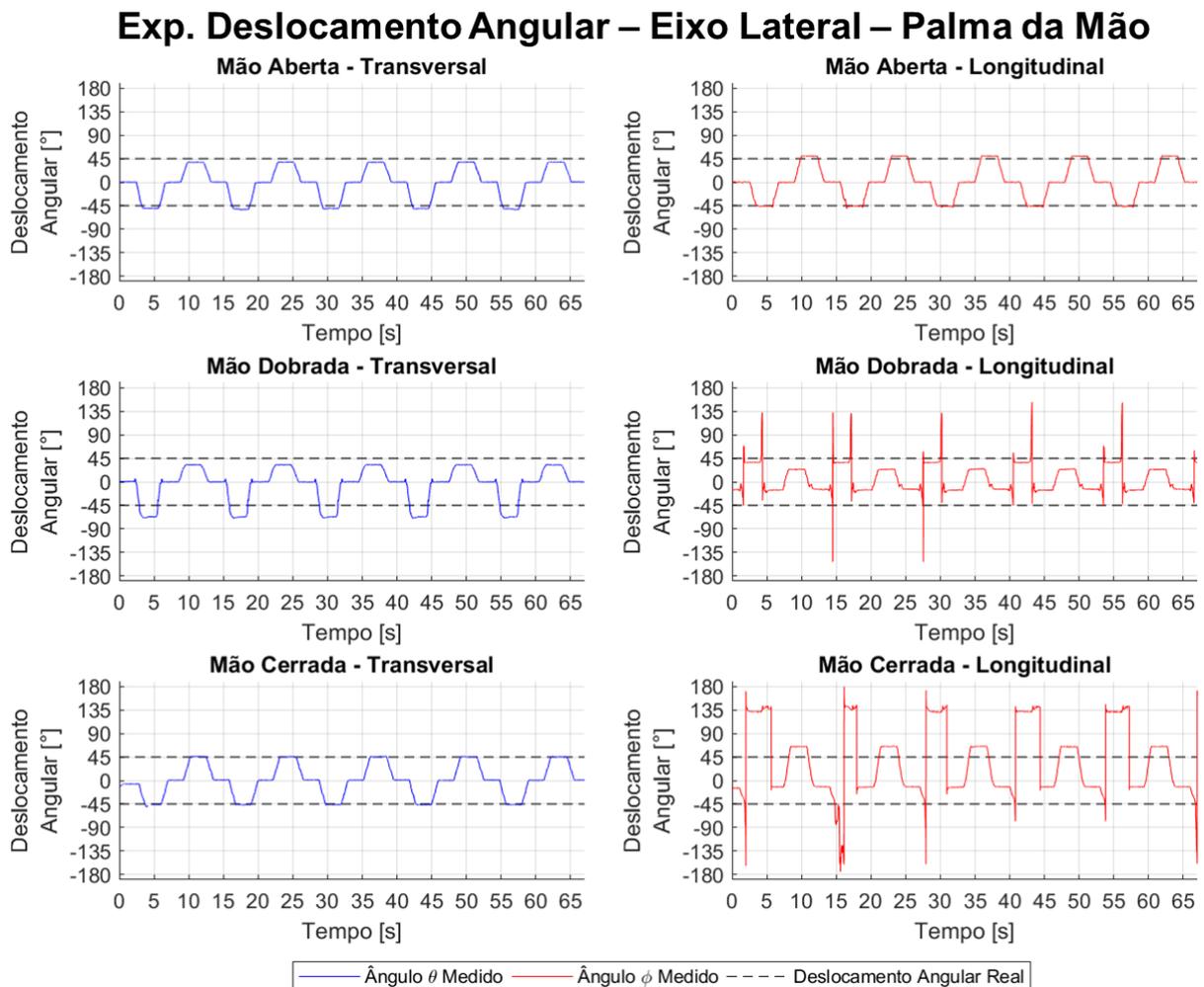


Figura 3.30 – EDA Lateral – Posições angulares relativas da palma da mão.

Observa-se na Figura 3.30 que os eixos predominantes de ambas as disposições do sensor são diferentes, sendo medidos nos ensaios transversais o ângulo θ (referente ao eixo X_{LMC}) na cor azul e, nos ensaios longitudinais, o ângulo ϕ (referente ao eixo Z_{LMC}) na cor vermelha. As formas de onda observadas nos ensaios transversais condizem com os deslocamentos angulares realizados pela mão, já nos ensaios longitudinais, apenas o gráfico referente à mão aberta apresenta forma de onda condizente. Ainda, nos gráficos correspondentes aos ensaios longitudinais com a mão dobrada e cerrada, um fenômeno se destaca no que aparenta ser uma inversão de 90° e 180° , respectivamente, no eixo

predominante quando a mão cerrada se orienta em -45° e o sensor faz a leitura do ângulo ϕ próximo à 45° e 135° , respectivamente.

Na Tabela 3.6 são apresentados os resultados obtidos no cálculo dos erros relativos $E\theta_{nR}$ e $E\phi_{nR}$, repetibilidade $R\theta_n$ e $R\phi_n$, e da porcentagem V de *frames* válidos.

Tabela 3.6 - Resultados dos EDA Laterais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V [\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V [\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	0,79		ϕ_{LR}^{aberta}	-	0,96	
θ_{LA}^{aberta}	-5,91	2,00	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	-0,89	2,13	100,00
θ_{LB}^{aberta}	-6,75	0,57		ϕ_{LB}^{aberta}	5,08	0,49	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	0,59		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	2,17	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	-22,65	1,91	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	96,98	0,82	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	-12,60	0,37		$\phi_{LB}^{dobrada}$	-6,10	0,78	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	6,76		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	1,92	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	-1,48	1,86	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	-167,62	8,75	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	0,62	0,80		$\phi_{LB}^{cerrada}$	32,33	1,45	
Média	-8,13	1,74	99,75	Média	53,30	2,16	100,00
Máximo*	22,65	6,76	100,00	Máximo	167,62	8,75	100,00

* Máximo absoluto

Analisando a Tabela 3.6, nota-se que a consistência de todos os EDA laterais ficou próxima dos 100%, caracterizando uma boa qualidade das amostras.

A média dos erros calculada da variável θ foi de $-8,13^\circ$ com um erro máximo absoluto de $22,65^\circ$. Já nos ensaios longitudinais, a média dos erros foi de $53,30^\circ$ com um máximo de $167,62^\circ$. Acredita-se que o alto valor do erro se deve ao fenômeno de inversão observado na Fig. 3.30, pois os erros medidos na longitudinal com a mão aberta foram próximos, em escala de grandeza, dos erros na transversal.

Destaca-se também que é possível comparar os erros calculados na mão aberta ($-5,91^\circ$ e $-6,75^\circ$ na disposição transversal e $-0,89^\circ$ e $5,08^\circ$ na longitudinal) com o erro observado por SMERAGLIUOLO, *et al.* (2016), nos experimentos de flexão/extensão (erro RMS de $11,6^\circ$). Nota-se que, em módulo, o erro calculado foi menor que o observado na revisão.

Já a repetibilidade média em ambas as disposições se manteve relativamente baixa com valores de $1,74^\circ$ e $2,16^\circ$ para os ensaios transversais e longitudinais, respectivamente.

Na Figura 3.31 são mostrados os gráficos referentes aos EDA verticais.

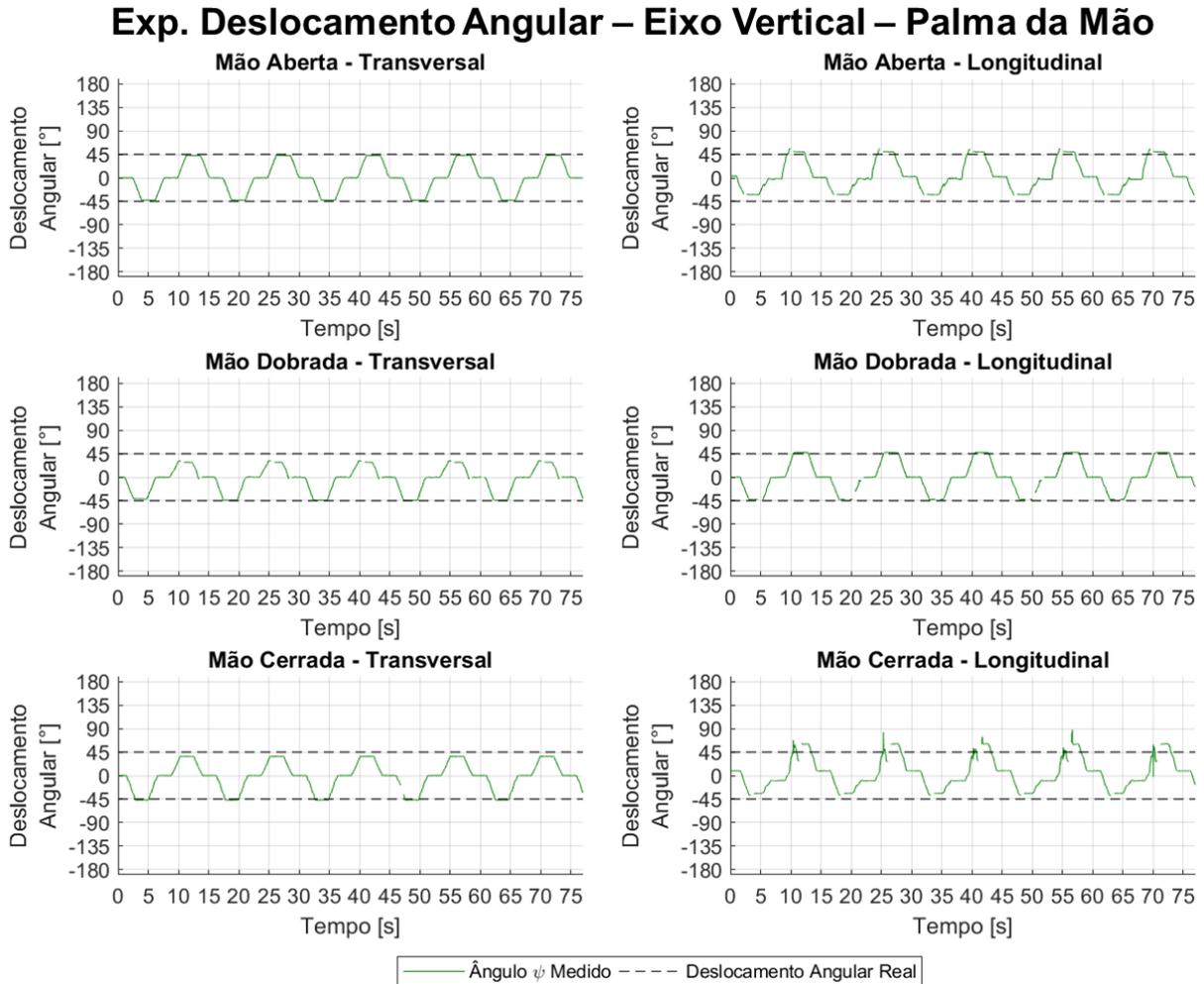


Figura 3.31 – EDA Vertical – Posições angulares relativas da palma da mão.

Para os EDA verticais mostrados na Fig. 3.31, o eixo predominante é o Y_{LMC} , sendo então medido o ângulo ψ (na cor verde) em cada experimento. A forma de onda observada em todos os experimentos condiz com as trajetórias realizadas, porém tanto no experimento transversal com a mão dobrada, quanto nos longitudinais, nota-se uma certa descontinuidade próxima ao ângulo de 45° .

Para a análise dos erros $E\psi_{nR}$ para os EDA verticais, sua repetibilidade $R\psi_n$ e consistência das leituras V , analisa-se a Tab. 3.7.

Tabela 3.7 - Resultados dos EDA Verticais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]	ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,27		ψ_{VR}^{aberta}	-	4,50	
ψ_{VA}^{aberta}	2,12	0,14	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	13,04	0,32	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	-2,06	0,59		ψ_{VB}^{aberta}	4,94	0,64	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	0,63		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	0,51	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	1,58	2,68	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	2,36	0,62	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	-15,88	2,83		$\psi_{VB}^{dobrada}$	2,35	0,16	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,17		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	10,63	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	-1,91	0,16	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	10,50	3,61	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	-8,29	0,17		$\psi_{VB}^{cerrada}$	15,52	2,87	
Média	-4,07	0,85	97,37	Média	8,12	2,65	92,90
Máximo*	15,88	2,83	100,00	Máximo	15,52	3,61	93,43

* Máximo absoluto

Na Tabela 3.7 pode observar que a porcentagem média de *frames* válidos foi de 97,37% para os ensaios transversais e de 92,90% para os longitudinais. Esses valores mostram uma queda na consistência das medidas realizadas nos EDA frontais, e refletem nas inconsistências observadas nos gráficos da Fig. 3.31, porém, ainda assim, representa boa qualidade nas leituras.

A média dos erros nos experimentos transversais foi de -4,07°, com máximo absoluto de 15,88°, e nos experimentos longitudinais foi de 8,12°, com máximo de 15,52°. Também é possível comparar os erros calculados para a mão aberta com os medidos nos experimentos de abdução/adução por SMERAGLIUOLO, *et al.* (2016) (erro RMS de 12,4°). No caso da mão aberta, na disposição transversal o erro encontrado foi bem menor.

Já a repetibilidade nas leituras dos ensaios transversais foi de 0,85°, menor que nos longitudinais, de 2,65°.

Em seguida, são apresentados os gráficos referentes aos EDA frontais, na Fig. 3.32.

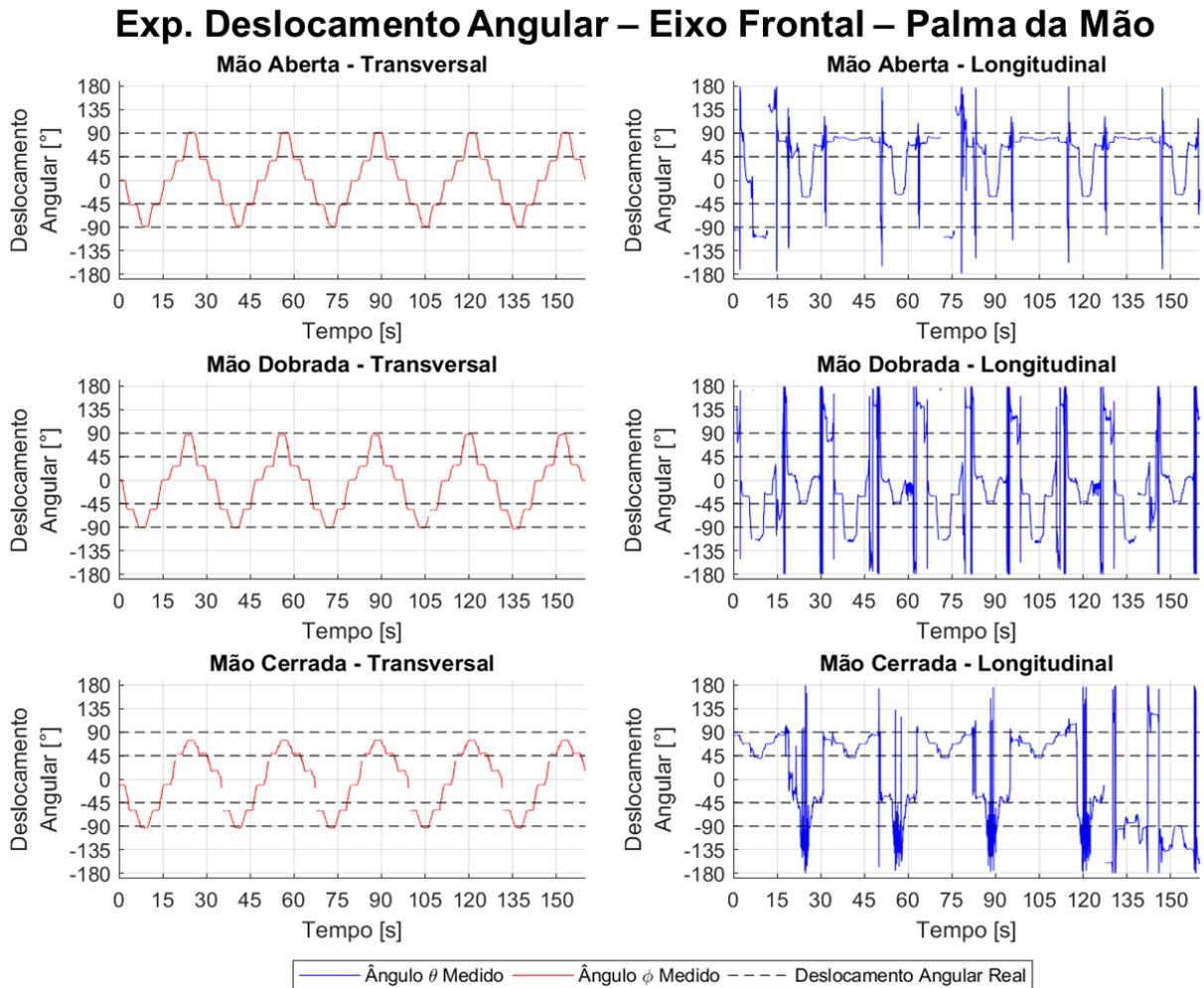


Figura 3.32 – EDA Frontal – Posições angulares relativas da palma da mão.

O eixo predominante dos EDA frontais transversais é o Z_{LMC} (correspondente ao ângulo ϕ , em vermelho) e, nos longitudinais, o eixo X_{LMC} (correspondente ao ângulo θ em azul). Os ensaios realizados com a disposição transversal possuem boa forma de onda, sendo condizente com a trajetória realizada pela mão de madeira. Já os experimentos longitudinais possuem forma de onda bastante ruidosa, impossibilitando a identificação das posições para os cálculos de erro e repetibilidade.

Na Tabela 3.8, são expostos os cálculos dos erros relativos $E\phi_{nR}$ e $E\theta_{nR}$, sua repetibilidade $R\phi_n$ e $R\theta_n$, e porcentagem de *frames* válidos V para os EDA frontais.

Tabela 3.8 - Resultados dos EDA Frontais para a palma da mão.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR}$ [°]	$R\phi_n$ [°]	V [%]	θ_n	$E\theta_{nR}$ [°]	$R\theta_n$ [°]	V [%]
ϕ_{FR}^{aberta}	-	0,91		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	-1,73	0,41		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	-6,37	1,81	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	2,63	2,99		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	1,35	0,24		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	1,59		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	-11,09	1,34		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-17,04	2,70	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	-1,39	2,73		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	-3,58	1,35		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	20,61		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	-14,92	0,89		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	3,97	1,36	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	-3,02	0,97		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-15,55	0,56		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	-5,56	2,70	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	17,04	20,61	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

Pela Tabela 3.8 é possível observar boa consistência nas leituras, representando uma média de 98,94% de *frames* válidos para os experimentos transversais e de 98,36% para os longitudinais.

A média dos erros nos ensaios transversais foi de $-5,56^\circ$, com máximo absoluto de $17,04^\circ$. Com relação aos experimentos longitudinais, devido aos ruídos observados, não foi possível calcular os erros em cada posicionamento angular. Também é possível verificar o erro máximo de $-6,37^\circ$ encontrado para a mão aberta com relação ao observado no experimento de supinação/pronação por SMERAGLIUOLO, *et al.* (2016) de $38,4^\circ$.

As repetibilidades associadas aos ensaios transversais tiveram valor médio de $2,70^\circ$ com máximo de $20,61^\circ$. Nos longitudinais não foi possível realizar o cálculo.

No geral, todos os eixos obtiveram erros relativamente pequenos nos experimentos com o LMC na disposição transversal. Já nos ensaios longitudinais, apenas as medições do ângulo ψ em todas as configurações da mão e do ângulo θ com a mão aberta obtiveram resultados satisfatórios.

Na Tabela 3.9 é possível realizar a comparação entre os erros médios nas diferentes configurações da mão.

Tabela 3.9 – Valores absolutos dos erros e repetibilidades médias dos EDA para as diferentes configurações da mão.

Disposição	Mão	$\overline{E\theta_{nR}} [^\circ]$	$\overline{R\theta_n} [^\circ]$	$\overline{E\psi_{nR}} [^\circ]$	$\overline{R\psi_n} [^\circ]$	$\overline{E\phi_{nR}} [^\circ]$	$\overline{R\phi_n} [^\circ]$
Transversal	Aberta	6,33	1,12	2,09	0,33	3,02	1,27
	Dobrada	17,63	0,96	8,73	2,05	8,28	1,94
	Cerrada	1,05	3,14	5,10	0,17	9,36	4,88
Longitudinal	Aberta	-	-	8,99	1,82	2,10	1,19
	Dobrada	-	-	2,35	0,43	45,44	1,26
	Cerrada	-	-	13,01	5,70	112,36	4,04

É possível observar, na Tabela 3.9, que os valores absolutos dos erros médios para os ângulos ψ e ϕ foram menores para a mão aberta, enquanto o ângulo θ foi menor para a mão cerrada.

Com relação às repetibilidades médias observadas, as configurações de mão aberta e dobrada apresentaram no geral menores valores que a de mão cerrada.

Na Tabela 3.10 são mostrados os valores médios $\bar{\alpha}$ e desvios S_α dos ângulos de abertura da mão para cada um dos EDA.

Tabela 3.10 – Valores do ângulo α de abertura da mão para os EDA.

Disposição	Experimento	Mão aberta		Mão dobrada		Mão cerrada	
		$\bar{\alpha} [^\circ]$	$S_\alpha [^\circ]$	$\bar{\alpha} [^\circ]$	$S_\alpha [^\circ]$	$\bar{\alpha} [^\circ]$	$S_\alpha [^\circ]$
Transversal	Lateral	17,22	8,09	105,91	20,67	176,91	7,93
	Vertical	23,18	6,58	132,61	21,03	180,00	0,02
	Frontal	10,89	7,59	150,30	23,43	175,99	10,40
	Média	17,09	7,42	129,61	21,71	177,63	6,12
Longitudinal	Lateral	33,25	14,23	99,38	41,18	160,82	14,07
	Vertical	44,30	11,79	103,30	10,38	157,04	20,15
	Frontal	45,50	27,99	130,98	28,57	141,28	53,98
	Média	41,02	18,00	111,22	26,71	153,04	29,40

É possível notar, pela Tabela 3.10, que os desvios do ângulo de abertura para os EDA transversais foram menores que para os longitudinais. Também se pode verificar que o sensor consegue identificar as diferentes configurações da mão pela distinção entre os ângulos.

3.4.4 *Análise dos experimentos de deslocamento circular para a palma da mão*

A verificação dos EDC será feita para cada eixo separadamente, iniciando pelo eixo lateral, seguido pelos eixos vertical e frontal.

A Figura 3.33 apresenta as trajetórias realizadas nos EDC laterais, sendo organizadas por coluna conforme a disposição do LMC nos ensaios e por linha conforme a configuração da mão de madeira. Em cada um dos gráficos é exibida a trajetória do experimento em dois sistemas de referência cartesianos, sendo o eixo à esquerda do gráfico referente ao plano do deslocamento da mão e o eixo à direita referente à uma vista ortogonal à primeira. O intuito dos gráficos interpostos é a possibilidade de se observar a trajetória nos três eixos principais.

Em todos os gráficos apresentados neste tipo de experimento foi utilizada a cor vermelha para as trajetórias exibidas a no plano XY_{LMC} , a cor verde para o plano XZ_{LMC} e a cor azul para o plano YZ_{LMC} . Além disso, todos os gráficos foram transladados para que o centro do círculo traçado nas trajetórias seja localizado na origem dos sistemas de referência.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Palma da Mão

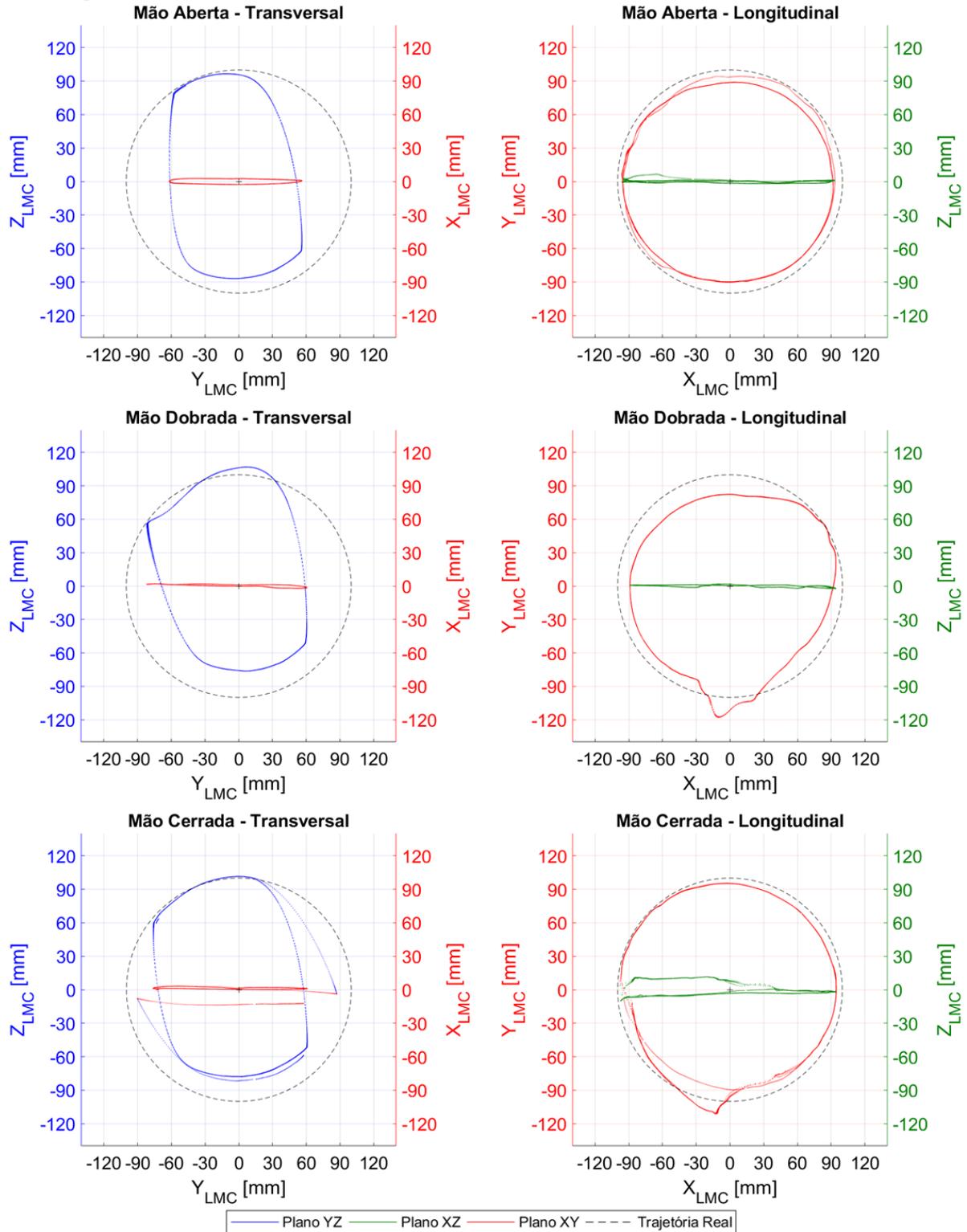


Figura 3.33 – EDC Lateral – Posições relativas da palma da mão.

Observa-se, na Figura 3.33, que os gráficos referentes aos EDC transversais possuem formato elíptico no eixo YZ_{LMC} enquanto que, nos EDC longitudinais, a forma da trajetória se

aproxima a de um círculo, sendo observada no plano XY_{LMC} . Já nos planos perpendiculares ao deslocamento da mão, os gráficos apresentam pequena variação, conforme esperado.

A Tabela 3.11 apresenta os erros calculados para os EDC laterais.

Tabela 3.11 - Resultados dos EDC Laterais para a palma da mão.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-13,35	-49,57	-1,08	100,00	Aberta	-7,66	-11,95	-1,34	100,00
Dobrada	-15,19	-41,31	7,25	100,00	Dobrada	-9,36	-18,36	18,45	100,00
Cerrada	-13,99	-43,23	1,51	97,47	Cerrada	-4,10	-13,33	12,36	100,00
	-14,18	-49,57	7,25	99,1		-7,04	-18,36	18,45	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio e porcentagem de *frames* válidos

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Como se pode observar pela Tabela 3.11, a porcentagem média de *frames* válidos foi de aproximadamente 100%, indicando boa qualidade nas leituras.

Os erros médios calculados nos EDC transversais foram de aproximadamente -14 mm, variando de -49,57 a 7,25 mm e nos longitudinais de aproximadamente -7 mm, variando de -18,36 a 18,45 mm.

Na Figura 3.34, são apresentados os gráficos referentes aos EDC verticais.

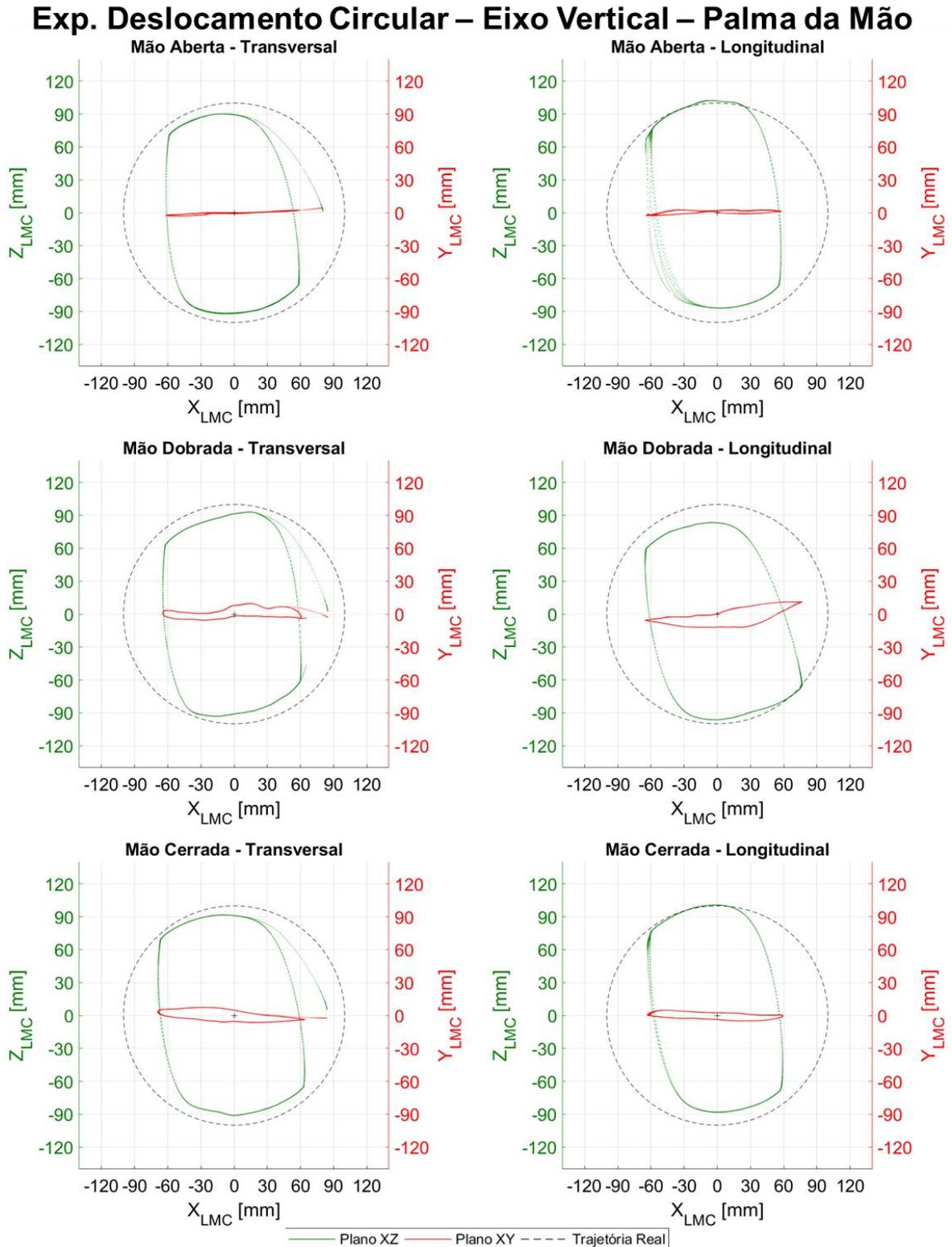


Figura 3.34 – EDC Vertical – Posições relativas da palma da mão.

Nota-se, pela Figura 3.34, que as trajetórias em todos os experimentos apresentam formato elíptico no plano XZ_{LMC} . Já no plano XY_{LMC} a variação foi menor para os experimentos com a mão aberta.

Na Tabela 3.12, são apresentados os erros referentes aos EDC verticais.

Tabela 3.12 - Resultados dos EDC Verticais para a palma da mão.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-13,05	-47,32	-6,03	100,00	Aberta	-11,47	-46,20	2,76	100,00
Dobrada	-13,47	-41,92	-2,81	100,00	Dobrada	-10,71	-42,13	1,70	100,00
Cerrada	-10,89	-42,40	-3,30	100,00	Cerrada	-11,24	-44,39	0,78	100,00
	-12,47	-47,32	-2,81	100,00		-11,14	-46,20	2,76	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio e porcentagem de *frames* válidos

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Observa-se, Tabela 3.12, que a porcentagem de *frames* válidos é de 100% em todos os experimentos, indicando boa consistência nas leituras.

Os erros médios observados nos EDC transversais foram de aproximadamente 12,5 mm, variando de -47,32 a -2,81 mm, enquanto nos EDC longitudinais os erros foram de aproximadamente -11 mm, variando de -46,20 a 2,76 mm.

Na Figura 3.35, são apresentados os gráficos referentes aos EDC frontais.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Frontal – Palma da Mão

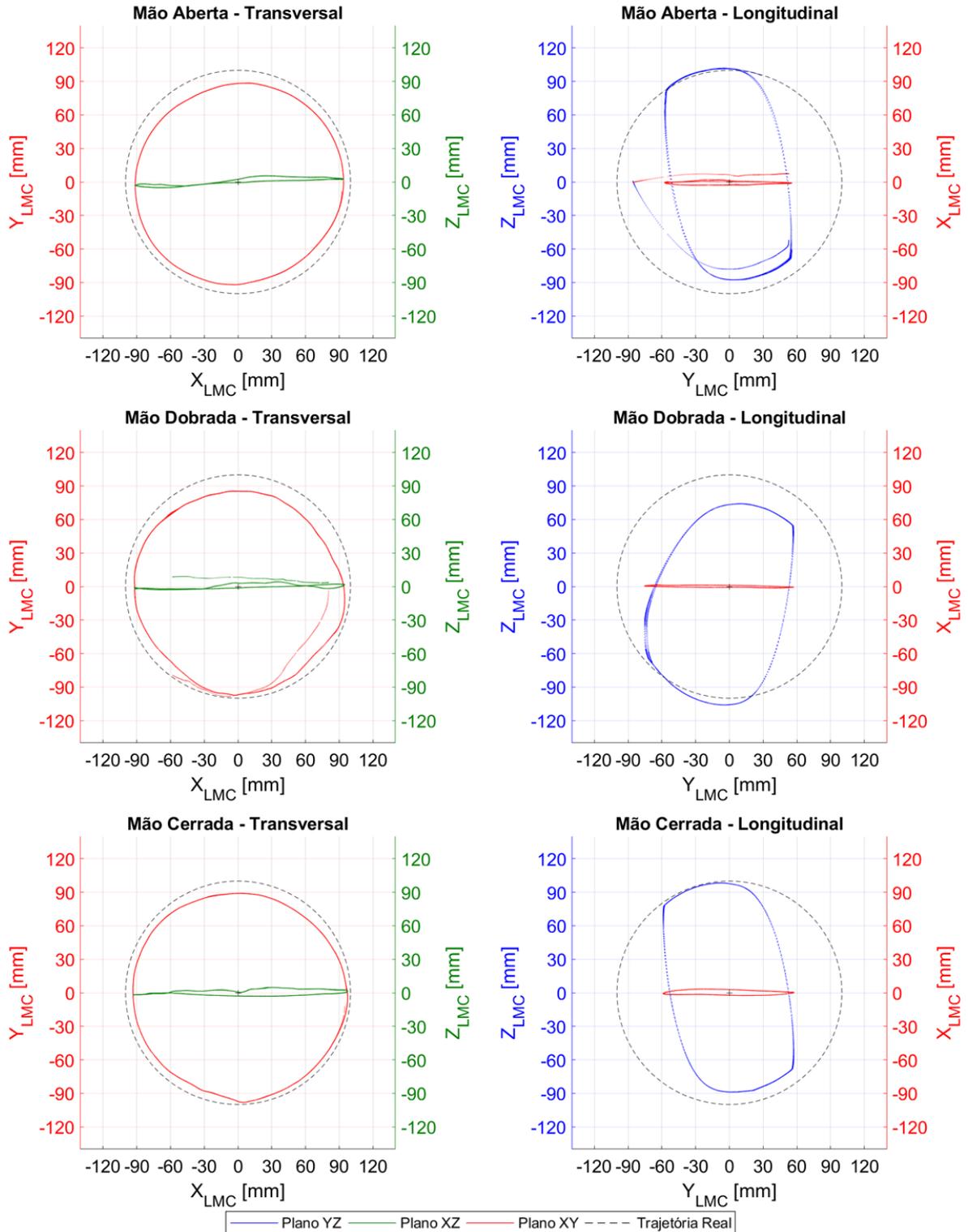


Figura 3.35 – EDC Frontal – Posições relativas da palma da mão.

Na Figura 3.35, observa-se trajetórias circulares bem próximas à trajetória real no plano XY_{LMC} para os EDC transversais, enquanto uma forma elíptica no plano YZ_{LMC} predomina dos

longitudinais. Houve pouca variação nas trajetórias no plano XZ_{LMC} nos EDC transversais e no plano XY_{LMC} nos EDC longitudinais.

A Tabela 3.13 apresenta os erros relacionados aos EDC frontais.

Tabela 3.13 - Resultados dos EDC Frontais para a palma da mão.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-9,00	-14,13	-6,04	100,00	Aberta	-11,99	-49,72	2,52	97,49
Dobrada	-9,45	-22,00	-0,73	98,72	Dobrada	-17,12	-47,54	6,21	100,00
Cerrada	-6,70	-11,24	-1,71	100,00	Cerrada	-11,77	-48,19	-0,76	100,00
	-8,38	-22,00	-0,73	99,57		-13,63	-49,72	6,21	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio e porcentagem de *frames* válidos

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Na Tabela 3.13, observa-se que a porcentagem de *frames* válidos foi próxima a 100%, indicando boa consistência nas leituras.

Os erros médios observados nos EDC transversais foram de aproximadamente -8 mm, variando de -22,00 a -0,73 mm, enquanto nos EDC longitudinais os erros foram de aproximadamente -13,5 mm, variando de -49,72 a 6,21 mm.

No geral, pode-se concluir que a melhor correlação entre eixos para este tipo de experimento foi entre os eixos X_{LMC} e Y_{LMC} , que exibiram trajetórias circulares mais próximas ao deslocamento real da mão nos ensaios, diferentemente do observado por HERNOUX, BÉARÉE e GIBARU (2015), que calcularam erros menores no plano XZ_{LMC} em seus experimentos circulares.

Na Tabela 3.14 são mostrados os valores médios $\bar{\alpha}$ e desvios S_{α} dos ângulos de abertura da mão para cada um dos EDC.

Tabela 3.14 – Valores do ângulo α de abertura da mão para os EDC.

Disposição	Experimento	Mão aberta		Mão dobrada		Mão cerrada	
		$\bar{\alpha}$ [°]	S_{α} [°]	$\bar{\alpha}$ [°]	S_{α} [°]	$\bar{\alpha}$ [°]	S_{α} [°]
Transversal	Lateral	16,50	5,32	143,35	32,75	177,65	4,80
	Vertical	16,88	7,26	140,50	24,23	179,73	0,84
	Frontal	20,31	10,99	136,37	18,52	179,61	1,57
	Média	17,90	7,85	140,08	25,16	178,99	2,40
Longitudinal	Lateral	50,13	12,21	100,67	20,67	173,73	9,57
	Vertical	43,30	15,78	102,02	13,46	164,67	13,70
	Frontal	60,10	13,67	97,05	9,61	163,98	13,25
	Média	51,18	13,88	99,91	14,58	167,46	12,17

É possível notar, pela Tabela 3.14, que os desvios do ângulo de abertura para a mão aberta e cerrada foram menores para os EDC transversais. Também se pode verificar que o sensor consegue identificar as diferentes configurações da mão pela distinção entre os ângulos.

3.5 Conclusão Sobre o Estudo do Leap Motion Controller

Neste capítulo foi feito um estudo do LMC, apresentando suas características como composição, espaço de trabalho, sistema de referência, funcionamento de sua API e constituição da estrutura de seus dados. Também foi apresentada a validação das medidas feitas pelo dispositivo através da análise de seu erro, repetibilidade e taxa de aquisição.

Tendo como fundamento as análises feitas a partir dos experimentos descritos, pode-se realizar algumas conclusões a respeito de sua utilização no desenvolvimento de um jogo sério:

- De início, a taxa de aquisição do sensor não será um problema, visto que, para a aplicação em reabilitação virtual, o usuário provavelmente estará em um ambiente fechado, com pouca interferência de luz externa.
- Analisando os experimentos de deslocamento angular, a melhor opção para a disposição do LMC é a transversal que conseguiu rastrear as mãos durante a mudança de orientação nos três eixos.

- Relativo às medidas colhidas na palma da mão, a repetibilidade do sensor se manteve com valores pequenos mesmo nas posições mais distantes do sensor e isso refletirá em um bom rastreamento das mãos durante o jogo.
- Com relação à consistência de suas medidas, pode-se afirmar que o sensor rastreou a mão em praticamente 100% do tempo experimental. Porém, o espaço de trabalho utilizado nos experimentos é pequeno quando se comparado ao espaço de trabalho dos membros superiores humanos. Desta forma, será preciso escolher criteriosamente como será feito o posicionamento do dispositivo em relação ao usuário do jogo.
- Nos experimentos de deslocamento linear, foi possível concluir que o eixo que possui maior erro em suas medições é o eixo Z que, na disposição transversal, se refere ao eixo frontal do usuário. Desta forma, no desenvolvimento do jogo, será prudente priorizar as atividades nas quais deslocamentos verticais e laterais são executados.
- Com relação à mudança na orientação da mão, a partir das análises feitas nos EDA, pode-se dizer que comandos angulares serão bem rastreados pelo dispositivo.
- Mesmo com a forma elipsoide observada em alguns planos nos EDC, o sensor conseguiu rastrear bem as mãos, identificando o quadrante em cada plano. A partir disso, será possível a execução de comandos através da execução de trajetórias circulares nos três eixos.
- A partir da análise feita para as diferentes configurações da mão, também pode-se afirmar que o LMC consegue diferenciar quando a mão está aberta e quando está fechada. Porém, com o erro observado nessas medidas, será prudente estipular uma amplitude angular na qual se identifica a mão aberta e fechada.

Estas conclusões serão levadas em consideração para o desenvolvimento do jogo apresentado no Capítulo IV.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DO JOGO SÉRIO DE REABILITAÇÃO VIRTUAL

Neste capítulo, será apresentado todo o desenvolvimento do jogo proposto. Será apresentada a sua motivação, a concepção de sua temática e a metodologia utilizada desde a disposição dos dispositivos necessários para o jogo até os programas através dos quais este será desenvolvido. Ainda, serão descritas as ferramentas utilizadas para a execução das atividades propostas e os elementos nos quais o jogo baseia o seu funcionamento. Por fim, serão apresentadas todas as fases do desenvolvimento do jogo e discutidos os resultados obtidos em sua execução.

4.1 Concepção da Temática do Jogo

Durante a fase de concepção do jogo, foram feitas algumas visitas à clínica de reabilitação da Universidade Federal de Uberlândia onde foi apresentada uma paciente que será chamada pelo nome de Marcinha (nome fictício). Alguns anos atrás, a Marcinha sofreu um acidente no qual lesionou uma de suas vértebras cervicais, deixando-a tetraplégica e comprometendo a função motora de suas mãos. Durante uma conversa com a paciente, foi questionado qual atividade ela gostaria de conseguir fazer novamente. Ao que ela respondeu três coisas:

- Conseguir digitar no teclado do celular e conversar com suas amigas;
- Poder rolar na cama, mudando de posição;
- Poder cozinhar novamente.

Foi perguntado também o que ela mais gostava de cozinhar e ela disse que adorava fazer bolos, de fubá, de mandioca, e vários outros.

Com a intenção de realizar um dos desejos de Marcinha e conhecendo o potencial do LMC, foi identificada a possibilidade de desenvolver um jogo onde o usuário possa cozinhar.

Para isso, será criado um ambiente virtual de uma cozinha onde o paciente terá que cozinhar um bolo. Neste jogo sério, todas as atividades realizadas farão o uso de oito funções básicas descritas a seguir:

- Alcançar (*REACH*): O usuário posiciona a mão próxima ao ingrediente que se pretende pegar. Desta forma é possível posicionar os ingredientes em diversos locais para que o paciente movimente suas mãos para alcançá-los;
- Pegar (*GRAB*) e soltar (*DROP*): Com a mão posicionada próxima ao ingrediente ou utensílio, o ato de fechar a mão faz com que o objeto seja carregado pelo usuário e o ato de abrir a mão faz com que o usuário solte o objeto;
- Mover (*MOVE*): O usuário, segurando um objeto, o movimenta para uma nova posição e orientação;
- Despejar (*POUR*): O usuário faz o movimento de supinação e pronação do punho para que o ingrediente carregado seja despejado em um vasilhame. Este movimento já foi verificado nos EDA frontais, cujo erro máximo foi de 17,04°;
- Deslocamentos circulares: Esse deslocamento em torno do eixo vertical pode ser usado no ato de misturar (*SPIN-Y*) os ingredientes em uma vasilha com uma colher. Em torno do eixo lateral pode se usar o ato de girar (*SPIN-X*) uma manivela em um ralador de queijo e no eixo frontal, o ato de girar (*SPIN-Z*) um botão ligando um fogão ou forno. Os movimentos circulares correspondem aos avaliados nos EDC.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as funções utilizadas na caracterização do movimento feito pelas mãos do usuário, bem como as variáveis rastreadas em sua execução.

Tabela 4.1 – Relação das atividades do jogo com as variáveis rastreadas.

Função	Atividade	Variáveis rastreadas
<i>REACH</i>	Alcançar o objeto	<i>Pos</i>
<i>GRAB</i>	Pegar o objeto	α
<i>DROP</i>	Soltar o objeto	α
<i>MOVE</i>	Deslocar o objeto para uma nova posição e orientação	<i>Pos, \alpha</i>
<i>POUR</i>	Inclinar o objeto no eixo frontal	ϕ, α
<i>SPIN-X</i>	Deslocar a mão em uma trajetória circular no plano lateral	<i>Pos, \alpha</i>
<i>SPIN-Y</i>	Deslocar a mão em uma trajetória circular no plano horizontal	<i>Pos, \alpha</i>
<i>SPIN-Z</i>	Deslocar a mão em uma trajetória circular no plano frontal	<i>Pos, \alpha</i>

Utilizando a culinária como temática, o objetivo principal do usuário no jogo será a preparação de um bolo através da execução das instruções exibidas na tela. O nome escolhido para o jogo em inglês foi “*You Can Cook Again!*” (YCCA), que significa “Você pode cozinhar novamente!”.

4.2 Metodologia

O primeiro passo foi decidir o posicionamento do LMC para o uso no jogo. Como o usuário precisará movimentar os braços livremente, o dispositivo precisará ficar em um lugar que não haja riscos de colisão com as mãos. Outra consideração é que o YCCA também será jogado por cadeirantes e isso requer que o LMC tenha um suporte próprio que se adeque a qualquer tipo de usuário.

Decidiu-se então por utilizar um pedestal para microfone articulado com tripé para possibilitar que o LMC se aproxime o máximo possível do usuário. Foi projetado no programa SolidWorks® uma base para a fixação do LMC e de um nível de bolha circular para auxiliar no nivelamento do sensor. A partir do seu desenho, a peça foi impressa em material ABS (do inglês, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) a partir de uma impressora 3D (Fig. 4.1a). Esta peça é acoplada no cachimbo do pedestal e sua montagem pode ser vista na Fig. 4.1b.



Figura 4.1 – (a) Base do LMC com nível de bolha e (b) Suporte montado no pedestal.

Para melhorar a experiência do usuário, uma televisão com entrada de vídeo poderá ser utilizada como recurso visual. Foi determinado que o sensor será posicionado acima dos joelhos do usuário, porém mais próximo do seu abdômen e alinhado com seu plano sagital como mostrado na Fig. 4.2.



Figura 4.2 – Disposição dos equipamentos para a utilização no jogo YCCA.

O posicionamento do LMC foi planejado de forma que seu espaço de trabalho consiga incluir qualquer movimento do usuário durante o jogo. Assim, o plano XY_{LMC} ficará paralelo ao plano frontal do usuário, o plano XZ_{LMC} será paralelo ao plano horizontal e o plano YZ_{LMC} coincidente com o plano sagital do paciente. Na Figura 4.3 são apresentadas as vistas frontal (a), lateral direita (b) e superior (c) do espaço de trabalho do LMC (em vermelho) durante sua utilização no jogo.

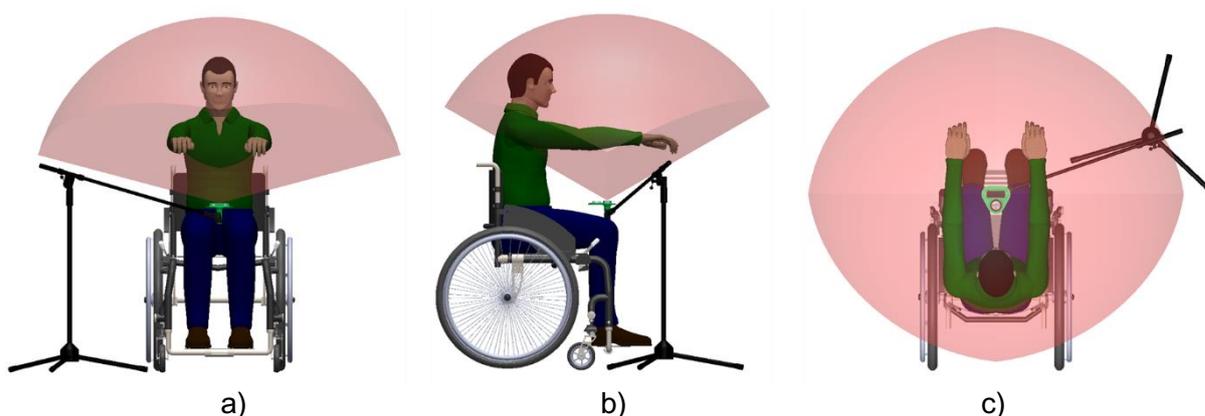


Figura 4.3 – Vistas (a) Frontal, (b) Lateral direita e (c) Superior do espaço de trabalho do LMC durante o jogo.

Uma vez definida a disposição dos equipamentos, parte-se para a preparação dos *softwares* para o desenvolvimento do jogo.

4.2.1 Preparação dos softwares para o jogo

Para se desenvolver um jogo, primeiro é necessário fazer a modelagem gráfica de todos os objetos presentes nele. Sendo assim, em um jogo com temática de culinária, será necessário modelar o ambiente da cozinha, os utensílios, os recipientes e os ingredientes que serão utilizados. Dois *softwares* para a modelagem tridimensional foram utilizados: o SolidWorks[®] 2019 e o Blender[®].

O SolidWorks[®] é um programa de CAD (do inglês, *Computer Aided Design*) muito utilizado na engenharia para projetos de peças e mecanismos e a escolha por sua utilização foi pela familiaridade com a sua interface. Neste software, além da modelagem, também é possível realizar uma montagem na qual os objetos desenhados são organizados utilizando-se de restrições. Assim, uma vez modelado todo o ambiente do jogo, cada objeto é salvo no formato STL (do inglês, *Standard Triangle Language*) para ser editado no Blender.

O Blender[®] é um *software* de código aberto utilizado para a modelagem, animação, texturização, entre outras funcionalidades. Uma vez modelado, cada objeto precisará ser preparado para o uso no *Software* de Desenvolvimento do Jogo (SDJ), ou seja, alguns objetos precisarão ter uma textura vinculada a eles, outros precisam ser redimensionados ou ter seu sistema de coordenadas reorientado para serem corretamente utilizados. O Blender[®] possibilita todo esse preparo dos objetos e a escolha por sua utilização foi por ser um *software* de código aberto com uma grande comunidade de usuários que disponibilizam diversos tutoriais sobre sua utilização. Após a preparação do objeto, este é salvo em formato FBX (abreviado do inglês, *Filmbox*) para ser importado pelo SDJ.

É no SDJ que o jogo será projetado. Dentre suas funcionalidades, pode-se destacar a renderização de gráficos 2D ou 3D, a simulação da física do jogo, o suporte a animação e sons, entre outros. O SDJ que será utilizado é o Unity3D[®], criado pela Unity Technologies[®] (Unity, 2019). O Unity3D[®] possui uma versão gratuita que inclui todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento do jogo desta dissertação e foi escolhido por ser um dos softwares que possui compatibilidade com a API do LMC e por ter uma vasta comunidade de desenvolvedores que disponibilizam diversos tipos de tutoriais e materiais fundamentais para quem inicia no desenvolvimento de jogos.

No ambiente de desenvolvimento do Unity3D[®] o desenvolvedor pode criar ou importar objetos que serão inseridos no jogo, denominados *Game Objects* (GO). A função de cada GO no jogo é programada através de *scripts*, que são códigos que descrevem o seu comportamento. Os *scripts* utilizam linguagem orientada a objeto e o Unity3D[®] possui suporte a diversas linguagens, dentre elas, a C# e o JavaScript. Como ambiente de programação dos *scripts*, será utilizado o Microsoft Visual Studio 2017[®] e a linguagem utilizada será a C#.

Uma vez estabelecido o SDJ, será necessário importar as bibliotecas necessárias para a comunicação do Unity3D[®] com a API do LMC. Essas bibliotecas estão disponíveis para download em Leap Motion (2013) e permitem ao usuário a interação com os GO manipuláveis no jogo utilizando as próprias mãos. Na Figura 4.4 é possível ver o Mecanismo de Interação (MI) da biblioteca do LMC em funcionamento e seus parâmetros configuráveis.

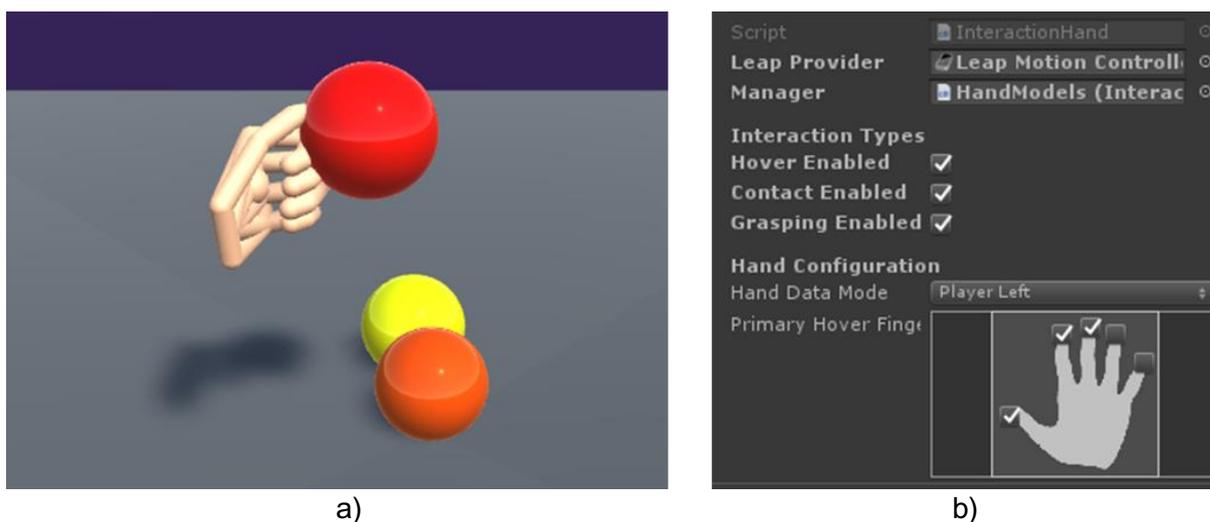


Figura 4.4 – Mecanismo de interação com objetos incluso na biblioteca do LMC: (a) Funcionamento e (b) Parâmetros configuráveis.

Na Figura 4.4b é possível ver algumas opções de configuração do MI fornecido pela Leap Motion. Esse mecanismo tem sido aprimorado para tornar a experiência do usuário cada vez mais intuitiva. Entretanto, em pessoas que possuem alguma disfunção nas mãos, essa experiência se torna frustrante, pois a ação de pegar e soltar um objeto depende da coordenação dos dedos do usuário, o que, no caso dessas pessoas é inviável. Sendo assim, para se proporcionar essa experiência a pacientes em reabilitação, será necessário o desenvolvimento de um mecanismo de interação próprio.

Neste mecanismo, o parâmetro que definirá se o objeto está sendo segurado ou não pelo usuário é o ângulo de preensão palmar, representado por α . Desta maneira, poderá ser ajustado para cada tipo de usuário qual será o ângulo de transição entre pegar e soltar um GO. Como o MI é responsável por outras funções também, como o posicionamento e orientação das mãos, o novo mecanismo precisará acessar todas as variáveis necessárias para a interação do usuário com o jogo.

4.3 Desenvolvimento do Jogo S3rio

O primeiro passo para o desenvolvimento do jogo 3e o projeto do MI. Seu desenvolvimento ser3a explanado a seguir.

4.3.1 Desenvolvimento do mecanismo de intera3o do usu3rio com o ambiente do jogo

Durante a visita que foi feita 3a cl3nica de reabilita3o, foi feito um teste com a paciente Marcinha com o objetivo verificar o desempenho do LMC ao rastrear suas m3os. Durante os testes, foi solicitado 3a paciente que movesse a m3o que estivesse sendo rastreada de forma que simulasse a atividade de cozinhar. Dois testes de 60 segundos cada, um para cada m3o, foram realizados depois de sua sess3o de fisioterapia. Os gr3ficos gerados para o deslocamento e orienta3o da palma de cada m3o pelo tempo s3o apresentados na Fig. 4.5.

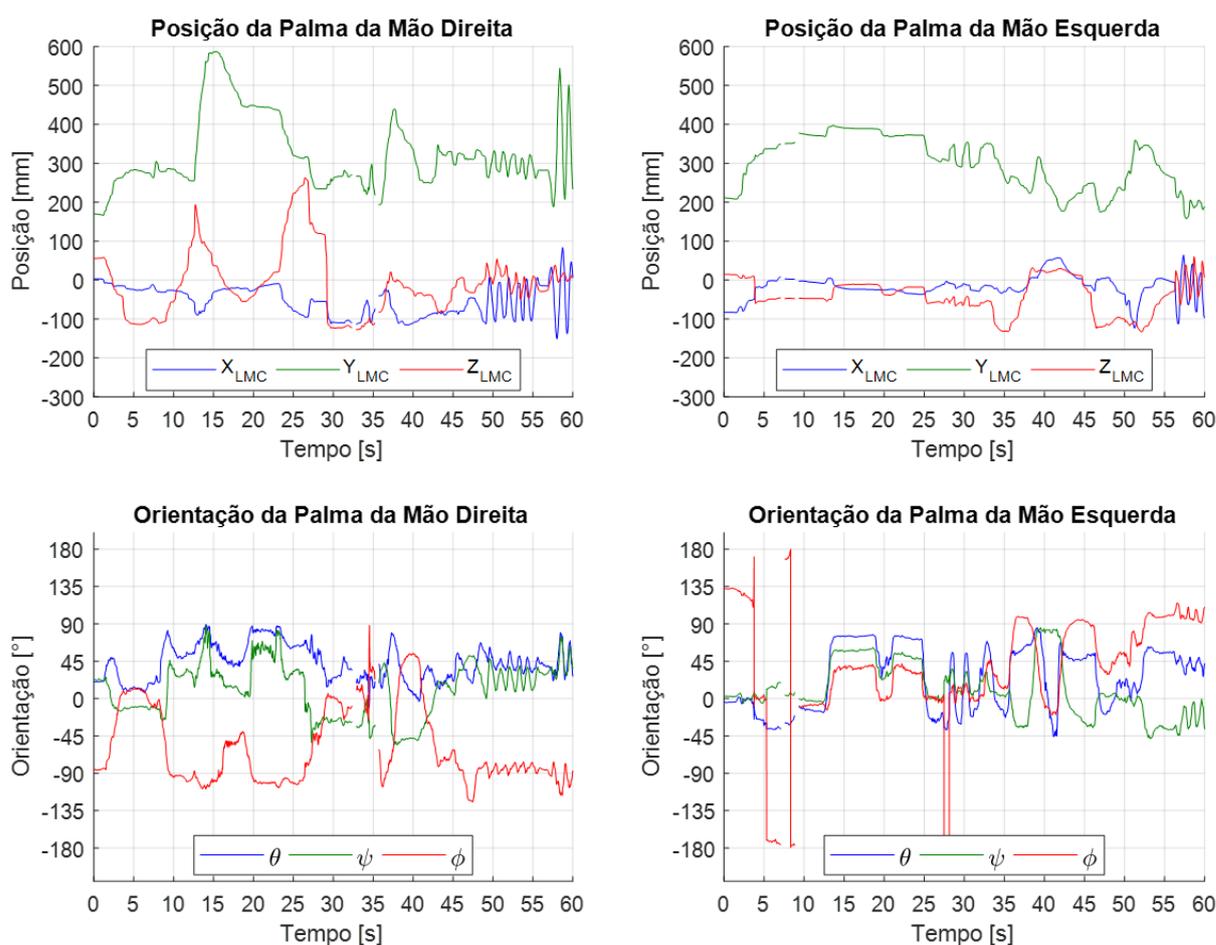


Figura 4.5 – Posi3o e orienta3o das palmas das m3os nos testes com a paciente.

Pela Figura 4.5 3e poss3vel afirmar que o LMC conseguiu rastrear com sucesso as m3os do paciente, detectando as varia3oes em sua posi3o e orienta3o. Observando o gr3fico de

orientação da mão direita, pode-se identificar que ela executou a ação de derramar (*POUR*) de 2 a 10 segundos, caracterizando uma variação no ângulo ϕ . No gráfico de posição, entre 48 e 55 segundos, ela executou a ação de “mexer o caldeirão” (deslocamento circular no plano horizontal *SPIN-Y*), caracterizada por formas de onda senoidais nos eixos X_{LMC} e Z_{LMC} . Entre 57 e 60 segundos, ela executou um deslocamento circular no plano frontal (*SPIN-Z*), caracterizado por formas de onda senoidais nos eixos X_{LMC} e Y_{LMC} . Para a mão esquerda, no gráfico de orientação, ela executou a ação de derramar entre os segundos 35 e 40 e, no gráfico de posição, ela executou a ação de “mexer o caldeirão” entre 56 e 60 segundos, definida por formas de onda senoidais nos eixos X_{LMC} e Z_{LMC} .

Também foram colhidos os ângulos de preensão palmar, cujo gráfico referente à mão direita é exibido na Fig. 4.6.

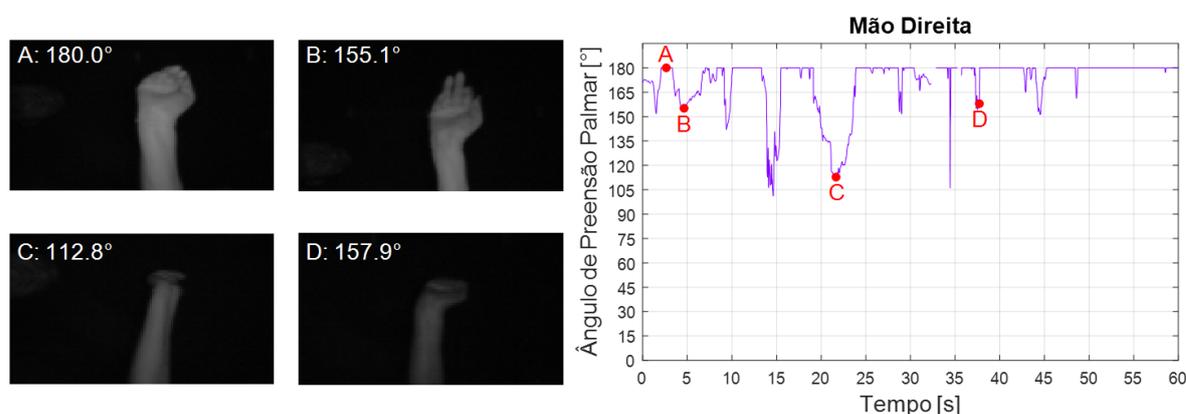


Figura 4.6 – Ângulo de preensão palmar medidos nos testes com a mão direita do paciente.

Como já dito anteriormente, o ângulo de preensão palmar α varia de 0° , com a mão totalmente aberta, a 180° , com a mão cerrada. No gráfico da Figura 4.6 foram escolhidos os *frames* marcados pelas letras de “A” a “D” para mostrar a foto tirada pelo LMC. A partir das imagens tiradas nos pontos selecionados, nota-se que não houve uma correlação bem definida entre as poses da mão direita observadas em “C” e “D” e o ângulo de preensão palmar lido pelo LMC. Desta forma, este parâmetro deve ser definido no início de cada intervenção utilizando-se do jogo sério desenvolvido nesta dissertação.

O gráfico referente ao ângulo de preensão palmar da mão esquerda é exibido na Fig. 4.7.

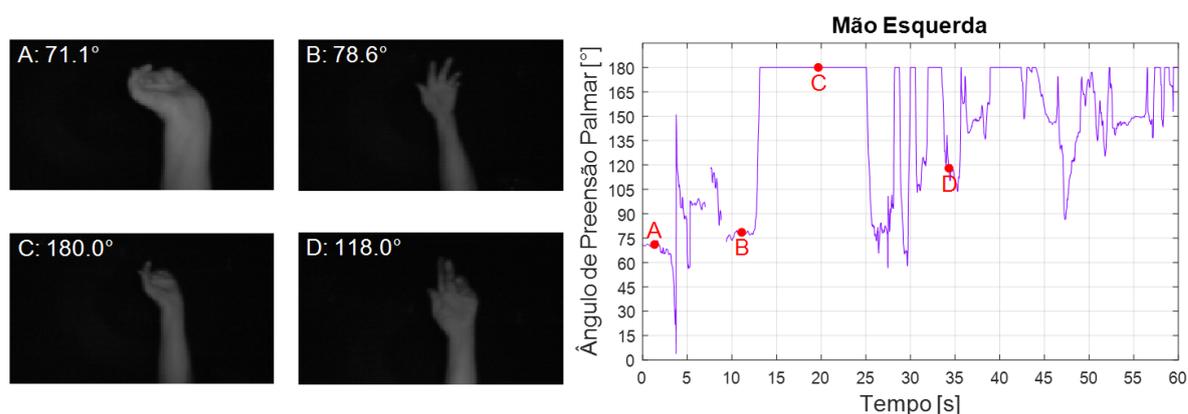


Figura 4.7 – Ângulo de preensão palmar medidos nos testes com a mão esquerda do paciente.

Na Figura 4.7 nota-se que não houve uma correlação bem definida entre a pose da mão esquerda observada em “A” e o ângulo de preensão palmar lido pelo LMC, fazendo-se necessária a definição deste parâmetro no início do jogo.

Há também a possibilidade de o usuário do jogo não possuir uma amplitude bem definida para a abertura e o fechamento da mão. A fim de se contornar este problema, o MI deverá possibilitar a execução das atividades controlando as funções *GRAB* e *DROP* automaticamente, de forma que o usuário precise apenas alcançar o GO para pegá-lo.

O MI é implementado através de dois *scripts*, o Gerenciador (MIG) e o Comportamental (MIC) que serão vinculados, respectivamente, aos GO que representam as mãos do usuário e aos GO interativos no jogo.

No *script* MIG, os parâmetros de entrada são:

- O GO responsável por representar graficamente a mão rastreada;
- O ângulo de transição entre mão aberta e mão fechada;
- O raio da esfera collider da mão. Um collider, ou colisor, é uma funcionalidade do Unity3D[®], delimitada por uma região no espaço, que consegue detectar qualquer GO que a penetra. Neste caso, a região delimitada é uma esfera centrada na palma da mão cujo raio é personalizável.

Variáveis públicas são as variáveis cujo valor pode ser acessado e editado por qualquer *script* no jogo. São disponibilizadas como variáveis públicas no MIG:

- O vetor *Pos*, contendo as coordenadas de posição da palma da mão;
- O vetor *Ang*, contendo os ângulos θ , ψ e ϕ ;
- Uma variável *booleana* *isGrabbing* indicando se a mão está apta a segurar um objeto ou não. A mão é considerada apta se o ângulo α for maior que o ângulo de transição entre mão aberta e mão fechada, variável conforme o usuário;

- Uma variável referenciando o GO que está sendo segurado pela mão em questão. Se a mão não estiver segurando nada, a variável assume valor nulo;
- Uma variável indicando qual mão está sendo rastreada.

Sendo assim, a função do MIG é ler as variáveis calculadas pela API e verificar se a mão está apta a segurar um objeto. Já o *script* MIC dita o comportamento do GO ao qual está vinculado, cuja rotina principal é ativada assim que as mãos os ativam.

A ativação do GO interativo é esquematizada na Fig. 4.8 e tem início quando um outro GO penetra em seu *collider*. Desta forma, a interrupção do *collider* se inicia, identificando o colisor. Se o colisor não for uma das mãos, a função se encerra. Se for uma das mãos, uma variável denominada *manipulator* assume a identidade da mão colidora e é feita a leitura da variável *isGrabbing* da mão colidora e verificado o seu valor. A interrupção do *collider* encerra a sua execução até uma nova colisão ser detectada. Ainda no *script* MIC, há a função de atualização que é iniciada na ativação do GO. Esta função inicializa as variáveis *manipulator* e *isGrabbing* e depois entra em um laço que as monitora. Se *manipulator* for *null* (vazia), significa que não houve colisão com uma mão, então a variável *isGrabbing* assume o valor *false*. Se *manipulator* assumir o valor de um GO, é verificado se *isGrabbing* é *true* e, se for, significa que a mão está fechada e a rotina principal do GO é executada. Se *isGrabbing* for *false*, significa que houve colisão com uma mão, porém ela está aberta.

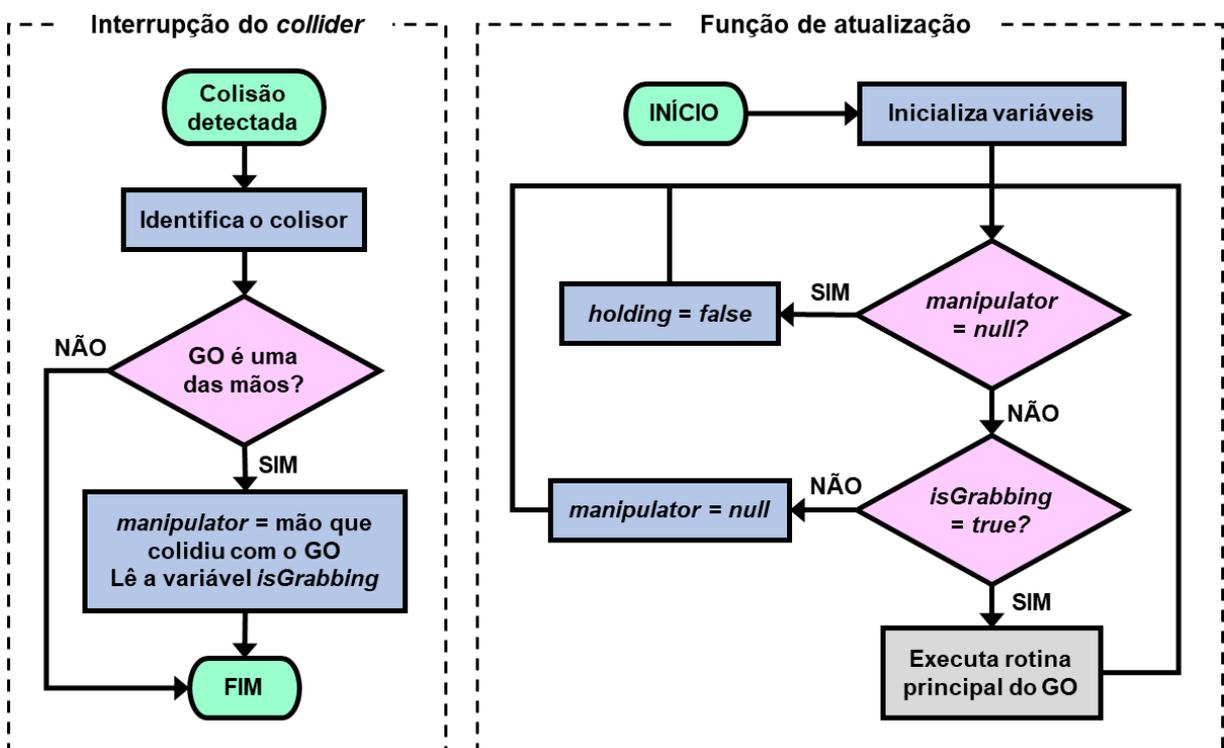


Figura 4.8 – Ativação do GO interativo: Interrupção do *collider* e Função de atualização.

Como mostrado na Figura 4.8 a ativação do GO interativo é feita quando esse objeto é alcançado (*REACH*) e pego (*GRAB*) e sua desativação acontece quando ele é solto (*DROP*).

Cada GO interativo possui uma rotina principal e são classificados conforme a sua função no jogo. Os tipos de GO interativos utilizados nesta dissertação são:

- Utensílios, cuja rotina principal é se mover e se orientar (*MOVE*) junto com a mão, dando a impressão de que a mão o está segurando;
- Ingredientes, cuja rotina principal é se mover e se orientar (*MOVE*) junto com a mão e criar o efeito de derramar seu conteúdo quando a mão inclinar o objeto (*POUR*);
- Portas, cuja rotina principal é mudar sua orientação (*MOVE*) quando a mão “puxa” o seu puxador, criando o efeito de porta se abrindo;
- Botões, cuja rotina principal é mudar sua orientação quando a mão executa deslocamentos circulares (*SPIN-X*, *SPIN-Y* ou *SPIN-Z*). Um botão não se move junto com a mão.

Na Figura 4.9 é apresentado o funcionamento do MI desenvolvido em um ambiente onde os GO interativos são esferas.

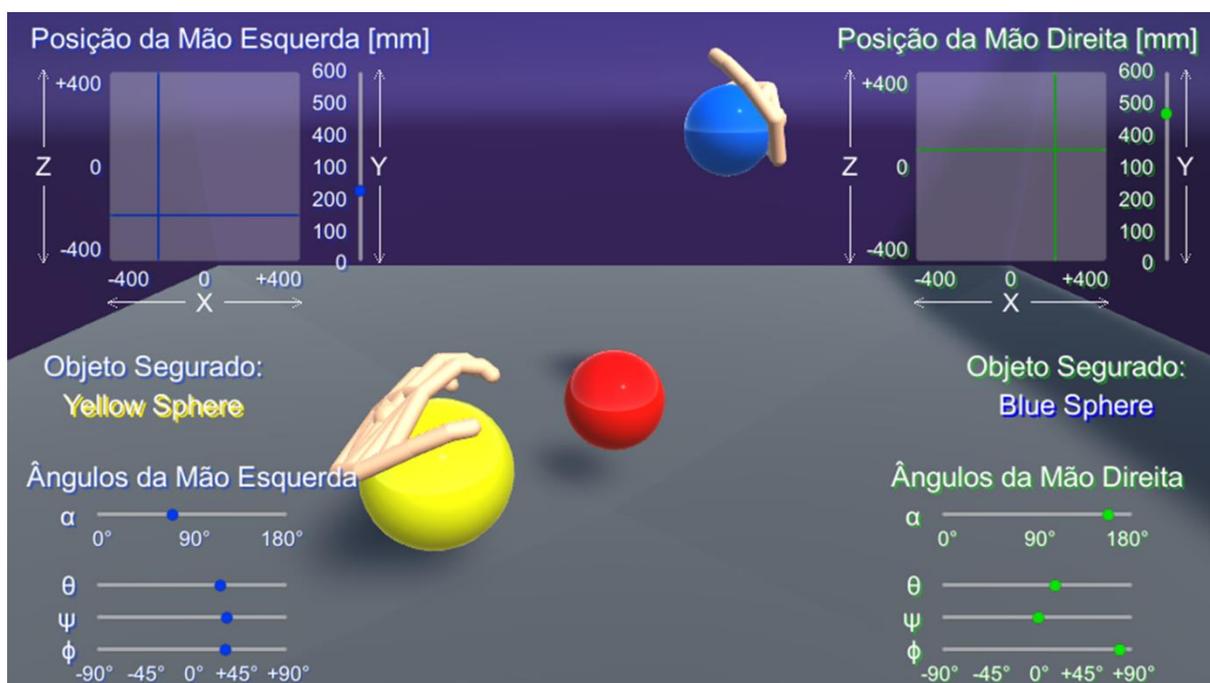


Figura 4.9 – Mecanismo de Interação desenvolvido em funcionamento.

Como é possível notar, na Figura 4.9, nesse ambiente de exemplo também foi criada uma interface gráfica que mostra na tela o objeto segurado por cada uma das mãos e os *sliders* (ou barras de progresso) referentes às variáveis x , y e z do vetor Pos , aos ângulos de orientação θ , ψ e ϕ e ao ângulo de preensão palmar α . Neste exemplo, o ângulo de transição

entre mão aberta e fechada para a mão esquerda foi de 30° e para a mão direita de 150°. Esta tela será utilizada para a definição dos limites de abertura e fechamento da mão.

4.3.2 Menus de navegação

A forma de navegação no jogo YCCA será feita através de diferentes telas, cada uma sendo responsável por uma função específica. Basicamente, pode-se classificar as telas do jogo em telas de Menus e telas de Jogo. As telas de Menu possuem botões que guiam o usuário até o início do jogo e a navegação é feita utilizando um cursor. Já nas telas de Jogo é onde se executa o ambiente virtual.

A versão inicial do jogo possui quatro telas de Menu, três delas são carregadas no início e a outra quando o usuário desejar pausar o jogo. Quando o jogo é iniciado, uma tela de apresentação exibindo os logotipos da UFU, da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e do Laboratório de Automação e Robótica aparece por alguns segundos (Fig. 4.10a). Em seguida é carregada a tela *Home* (Início), onde é exibido o nome do jogo e dois botões: “Usuário” e “Profissional” (Fig. 4.10b). O botão “Usuário” aciona a tela U0 (Tela de Usuário 0) e o botão “Profissional”, que inicialmente não tem ação, será implementado em um trabalho futuro. A função do botão “Profissional” será carregar uma tela em que o profissional poderá acessar os dados do usuário e visualizar seu progresso no jogo. Na tela U0 (Fig. 4.10c), o usuário tem as opções voltar para a *Home* ao clicar no botão “Início” ou avançar para a tela U1 ao clicar no botão correspondente ao seu próprio nome.

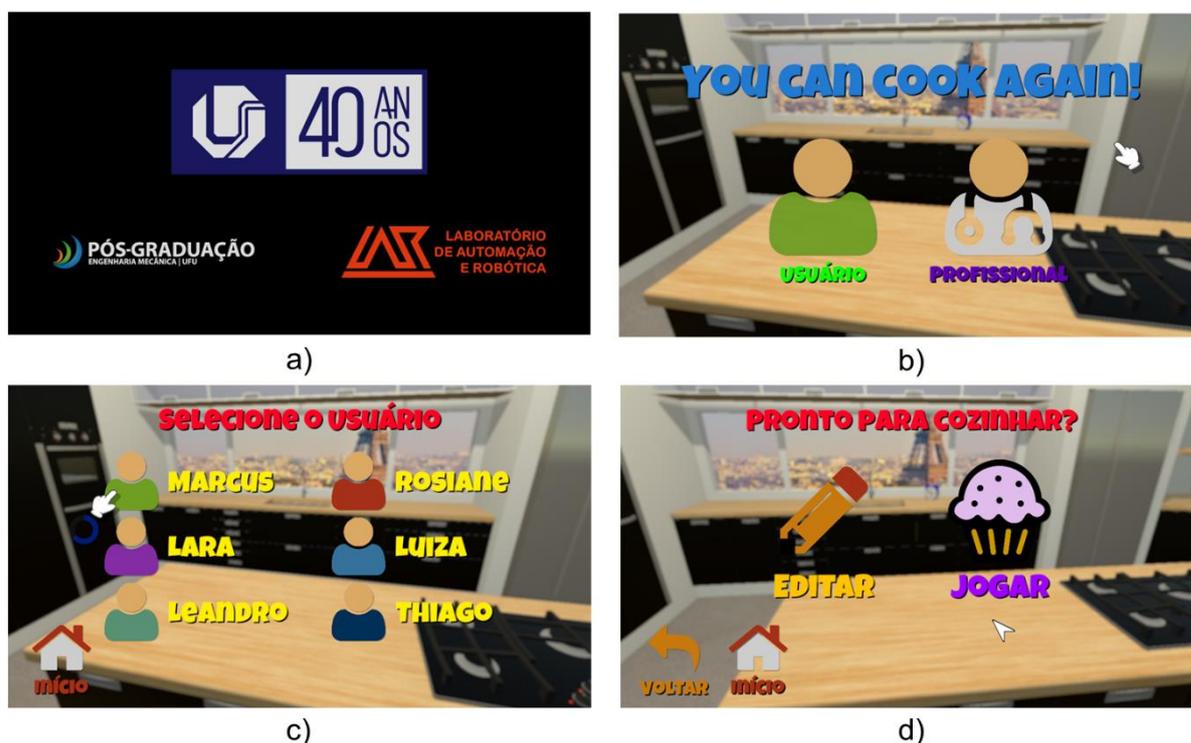


Figura 4.10 – Telas iniciais do jogo: (a) Tela de apresentação, (b) Home, (c) U0 e (d) U1.

Na tela U1 (Figura 4.10d), o usuário pode escolher entre voltar para a tela anterior ao clicar no botão “Voltar”, voltar para a *Home* ao clicar no botão início, ir para uma tela de edição do ambiente conforme as preferências do usuário (função que também será implementada em trabalhos futuros) ou iniciar o jogo, ao clicar no botão “Jogar”, acionando a primeira tela de jogo, chamada J0 (Tela de Jogo 0).

O controle do cursor foi implementado através de um *script* chamado *Cursor Manager* (Gerenciador do Cursor). Neste *script*, as coordenadas nos eixos X_{LMC} e Y_{LMC} são coletadas, redimensionadas e aplicadas nas coordenadas do cursor do mouse na tela, possibilitado o controle deste pelo usuário com deficiência motora nas mãos. Se ambas as mãos são rastreadas pelo LMC, a prioridade será da mão direita e, se nenhuma das mãos estiver sendo rastreada, o controle pelo mouse é liberado. Para que o usuário acione os botões utilizando as mãos, é preciso que o cursor seja posicionado sobre o botão desejado durante alguns segundos. É possível verificar os cursores controlados pela mão direita, esquerda e pelo mouse na Fig. 4.10b, Fig. 4.10c e Fig. 4.10d, respectivamente.

O desenvolvimento do ambiente virtual, bem como as telas de Jogo serão apresentadas no próximo tópico.

4.3.3 Design do jogo no ambiente virtual

Para a execução das atividades com temática culinária, foi projetada uma cozinha virtual, onde os exercícios de cada uma das telas de Jogo serão realizados.

Na cozinha virtual do YCCA, as atividades serão realizadas em uma ilha, localizada no centro. Quando o *player* (GO que representa a entidade do jogador) estiver na ilha, a origem do LMC no jogo estará no centro dela, permitindo o alcance de todos os GO ativos. Na bancada da ilha, do lado direito, tem o *cooktop* e, à frente da ilha, tem uma pia com armários em cima/embaixo e uma janela. Os ingredientes que não precisam ser armazenados em local refrigerado ficarão em um armário de duas portas, localizado à esquerda da ilha. Ao lado deste armário, tem um forno embutido com três botões. Do lado direito da pia fica a geladeira, de duas portas, onde se armazenam o restante dos ingredientes. A movimentação do *player* dentro do ambiente virtual será automática, conforme necessário.

A cozinha virtual é mostrada na Fig. 4.11.



Figura 4.11 – Cozinha virtual.

A partir da primeira tela de Jogo, a tela de Menu “*Pause*” (tela de pausa) já poderá ser acionada (Fig. 4.12a). Seu acionamento ocorre quando o usuário retira as mãos do campo de visão do LMC durante alguns segundos. A tela de pausa possui dois botões: “*Sair*” que aciona a U1, interrompendo o jogo, e o botão “*Continuar*” que retorna o usuário para onde ele parou no ambiente do jogo. A seleção dos botões é feita utilizando o cursor desenvolvido.

Na primeira tela de Jogo, tela J0, é solicitado ao usuário que posicione acima do LMC, por alguns segundos, as mãos que serão utilizadas durante o jogo (Fig. 4.12b). Isto foi pensado para garantir que o paciente utilize apenas a sua mão parética durante os exercícios.

Duas figuras de mãos direita e esquerda são mostradas na tela, sendo destacada a mão que o usuário mostrar para o LMC. Passados alguns segundos, o jogo avança para a próxima tela e, a partir daí, apenas a mão selecionada poderá ser utilizada no jogo.

A J1 é a tela de seleção da refeição que o usuário irá preparar (Fig. 4.12c). Cinco opções de refeição são exibidas para o usuário: Bolo de fubá, Bolo formigueiro, Bolo de mandioca, Pudim e Pão. Inicialmente, a única refeição possível de se escolher é o Bolo de fubá, sendo o seu preparo o objetivo deste jogo. A navegação entre as refeições exibidas é realizada utilizando o cursor projetado, o qual precisa se posicionar sobre os botões localizados nos cantos inferior direito e esquerdo, caracterizando a função *REACH*. Desta forma, o usuário precisará movimentar a sua mão ao longo do eixo lateral (eixo X_{LMC}), executando um deslocamento linear. Uma vez posicionado em destaque o bolo de fubá, o usuário precisará posicionar o cursor sobre o bolo para selecioná-lo, avançando para a tela seguinte.

A J2 é a tela de seleção da assadeira que será utilizada no preparo do bolo (Fig. 4.12d). São cinco opções de escolha: Assadeira redonda, retangular e em forma de coração e forma de pudim e pão. Inicialmente a única habilitada para escolha é a assadeira redonda. A navegação entre as formas também é realizada via cursor e os botões que movem as assadeiras estão localizados à direita da tela, em cima e embaixo, caracterizando a função *REACH*. Assim, o usuário as seleciona movimentando a mão segundo o eixo vertical (eixo Y_{LMC}), executando um deslocamento linear subindo ou descendo a mão. Ao posicionar o cursor sobre a assadeira redonda, quando esta estiver em destaque, o jogo avança para a próxima tela.

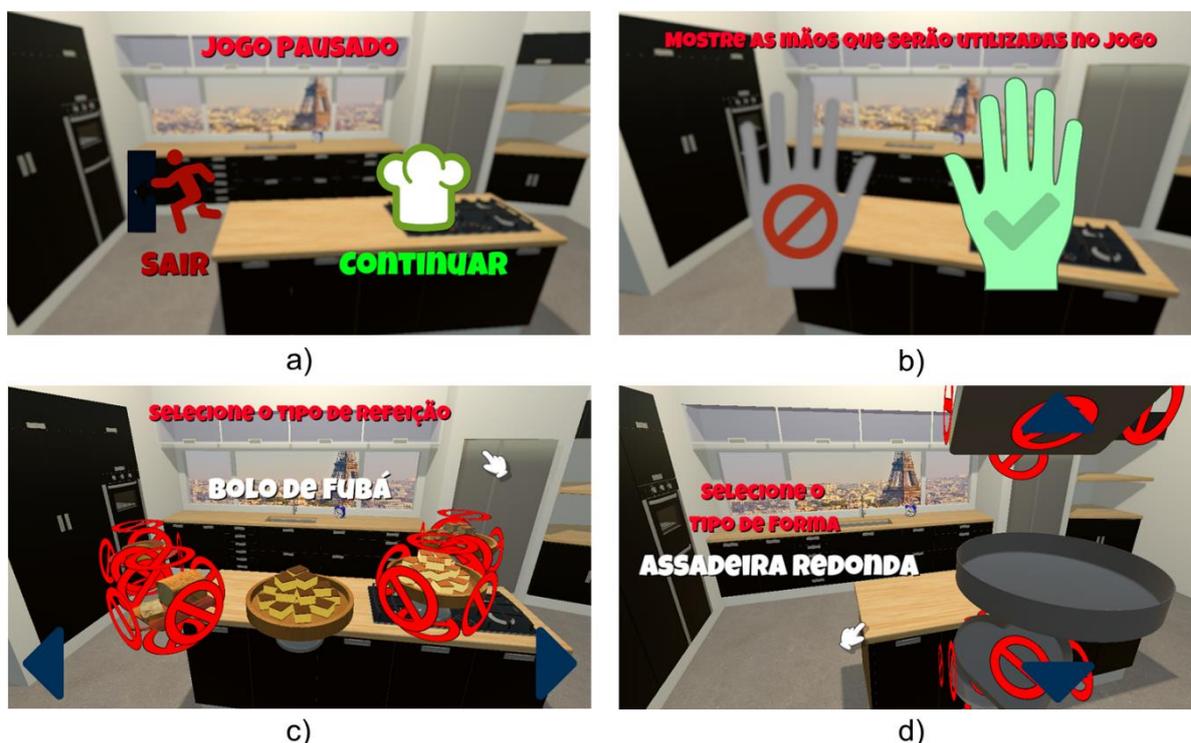


Figura 4.12 – (a) Tela de Menu “Pause”, e telas de Jogo (b) J0, (c) J1 e (d) J2.

Em trabalhos futuros, planeja-se coletar a movimentação das mãos do paciente durante a seleção da refeição e da assadeira e armazená-las durante o jogo. Desta maneira, será possível a geração de relatórios com gráficos e análise de desempenho do paciente durante estas atividades que poderão ser acessados pelo profissional que o acompanha.

Os ingredientes que serão utilizados na receita do bolo de fubá são: fubá, açúcar, canela em pó, óleo, leite, queijo, ovos e fermento em pó. Os quatro primeiro ficam armazenados no armário e os outros na geladeira. Nas próximas duas telas, o usuário precisará pegar os ingredientes necessários para o preparo. Assim, uma vez selecionado o bolo de fubá e a assadeira redonda, a câmera do jogo, que até então executava uma visão panorâmica da cozinha virtual, é posicionada na ilha, em seu local de origem. Após isso, o *player* desloca-se automaticamente, ficando em frente ao armário à esquerda da ilha, e inicia-se a tela J3.

A primeira ação solicitada ao usuário na tela J3 é que ele abra as portas do armário. Para isso, o usuário precisará alcançar (*REACH*) os puxadores das portas do armário, pegá-los (*GRAB*), puxá-los para si (*MOVE*) e soltá-los (*DROP*). A partir de um certo ângulo em sua abertura, as portas terminam de abrir automaticamente. Em seguida, é solicitado que o usuário selecione os ingredientes fubá, açúcar, canela em pó e óleo. Para isso, o usuário deve alcançar (*REACH*) o ingrediente, pegá-lo (*GRAB*), movê-lo (*MOVE*) até o canto inferior direito da tela e soltá-lo (*DROP*). No canto inferior são exibidas miniaturas dos ingredientes conforme vão sendo selecionados.

A Figura 4.13 apresenta algumas imagens das atividades da tela J3 sendo executadas.



Figura 4.13 – Atividades realizadas na tela J3.

A ação de abrir as portas do armário caracterizam um movimento de deslocamento frontal, no sentido do usuário, segundo o eixo Z_{LMC} do sensor. Para facilitar o entendimento de como as atividades são feitas ao longo do jogo, foram adicionadas setas que apontam para os objetos que o usuário deve pegar ou para onde os objetos devem ser movidos.

Uma vez selecionados todos os ingredientes do armário, as portas são fechadas automaticamente e o *player* é deslocado até a geladeira, onde tem início a tela J4. As atividades realizadas nesta tela são semelhantes às da tela J3, com exceção da geladeira possuir apenas uma porta e dos ingredientes selecionados serem movidos para o canto inferior esquerdo da tela.

Algumas imagens da tela J4 são exibidas na Fig. 4.14.



Figura 4.14 – Atividades realizadas na tela J4.

Selecionados todos os ingredientes necessários para o preparo do bolo de fubá, a porta da geladeira se fecha automaticamente, o *player* é deslocado de volta para a ilha e inicia-se a tela J5.

Na tela J5, inicia-se o preparo do bolo seguindo a receita apresentada a seguir:

1. Adicionar em uma panela o fubá, açúcar, canela em pó, leite e óleo;
2. Levar ao fogo e mexer a mistura até virar um mingau;
3. Tirar do fogo e deixar esfriar;
4. Adicionar ao mingau o fermento em pó, os 4 ovos e o queijo ralado;
5. Misturar em uma batedeira e depois despejar em uma forma;
6. Pré-aquecer o forno em 180°;
7. Levar a massa ao forno por 1 hora.

Assim que o *player* se dirige à ilha, o fubá, o açúcar, a canela em pó, o leite, o óleo e a panela já estão na superfície da ilha. É solicitado então ao *player* que pegue (*REACH, GRAB*)

cada um dos ingredientes e os despeje (*POUR*) na panela. Para cada ingrediente, há um *slider* indicando graficamente a porcentagem do ingrediente derramado que já está na panela. Ao atingir 100% do *slider*, uma imagem de *check* (ou conclusão) sobrepõe o *slider*, indicando ao usuário que já finalizou a atividade solicitada. Ao longo do jogo, diversos *sliders* serão exibidos a fim de indicar o progresso do usuário nas atividades executadas.

Para facilitar o entendimento do usuário nas atividades do jogo que utilizam a função *POUR*, uma seta curva animada sempre será exibida no sentido que o usuário deve girar o objeto segurado.

Com os ingredientes todos adicionados à panela, é solicitado ao usuário pegar (*REACH, GRAB*) a panela, pelo cabo, e colocá-la (*MOVE, DROP*) no *cooktop*. Assim que o usuário segura a panela, o player é deslocado automaticamente para a frente do *cooktop*, finalizando assim a tela J5.

Imagens das atividades executadas na tela J5 são apresentadas na Fig. 4.15



Figura 4.15 – Atividades realizadas na tela J5.

Na tela J6, é solicitado ao usuário que ligue o fogo do *cooktop*. Para isso ele terá de pegar (*REACH, GRAB*) o botão central do *cooktop* e, com a mão ainda fechada, realizar movimentos circulares segundo o eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido anti-horário. Com o deslocamento da mão, o botão do *cooktop* apenas gira em torno do seu eixo, não se movendo junto com a mão. Durante o deslocamento circular, o botão do *cooktop* é ampliado na tela e para auxiliar no entendimento do usuário de até onde ele deve girá-lo. Para ligar o fogo, o ponteiro do botão sairá da marca de fogo desligado e deverá chegar até a marca azul de fogo baixo. Durante o jogo e em todas as atividades que utilizam as funções do tipo *SPIN*, setas circulares animadas serão exibidas na tela para o bom entendimento do usuário quanto à execução da atividade.

Assim que o fogo estiver aceso, aparecerá na tela um *fouet* (utensílio de cozinha utilizado para bater claras) que o usuário deverá pegar (*REACH, GRAB*) para mexer a mistura na panela. Para isto, o usuário deverá, segurando o *fouet*, realizar movimentos circulares em cima da panela segundo o eixo vertical (*SPIN-Y*), no sentido horário. Esta atividade se encerra quando a mistura na panela se torna aparentemente homogênea (mudança de cor).

O próximo passo será desligar o fogo, cujo procedimento se assemelha à atividade de ligá-lo, com a diferença de que o deslocamento circular (*SPIN-Z*) agora deverá ser feito no sentido horário, partindo da marca de fogo baixo até a marca de fogo desligado. Segundo a receita, em seguida deve-se deixar o mingau esfriar, desta forma, o usuário deverá pegar (*REACH, GRAB*) a panela, movê-la para a ilha e despejar o mingau em uma tigela para descansar. Assim que o usuário pega a panela, o *player* se desloca automaticamente para a ilha e, chegando à ilha, é preciso posicionar (*MOVE*) a panela em cima da tigela para que a panela derrame, automaticamente, o mingau na tigela.

Como, na prática, o mingau demora algumas horas para esfriar em temperatura ambiente, no jogo será utilizado um relógio com alarme para transmitir a noção de espera. Desse modo, será solicitado ao usuário configurar o alarme do relógio, que já se encontra na ilha. Para isto, o usuário deverá pegar (*REACH, GRAB*) o relógio e executar movimentos circulares ao longo do eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido horário. O relógio é então destacado à frente da tela e os ponteiros referentes ao alarme são rotacionados conforme o usuário executa os movimentos.

Uma vez configurado o alarme, a tela escurece e aparecem na tela os dizeres “Algumas horas depois...”. Encerra-se desta forma a tela J6, cujas imagens de suas atividades podem ser vistas na Fig. 4.16.

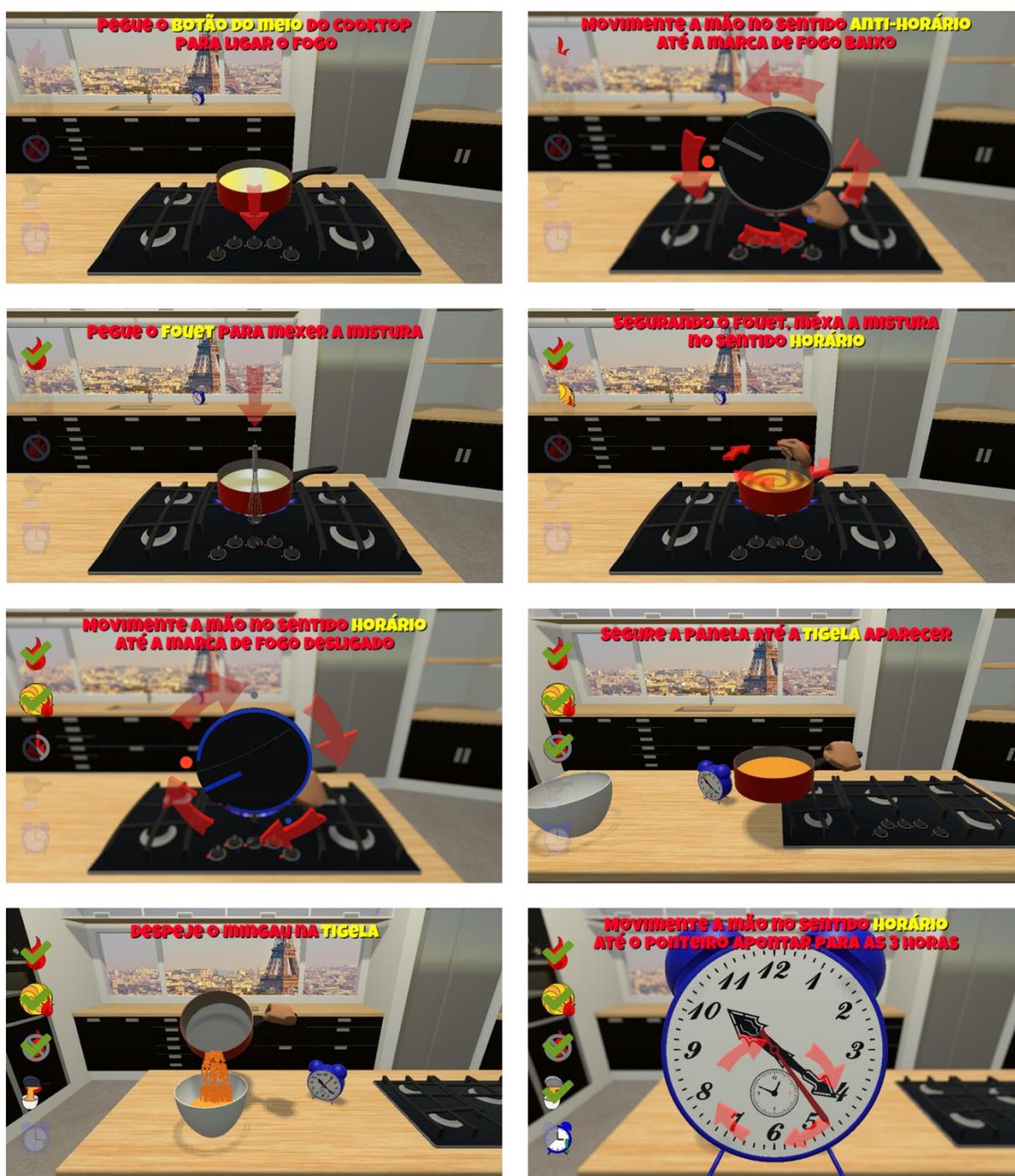


Figura 4.16 – Atividades realizadas na tela J6.

No início da tela J7, o ambiente é revelado novamente, agora com os ingredientes restantes na ilha, junto à tigela com o mingau e o relógio, com o alarme prestes a disparar. A primeira atividade requisitada ao player é de desligar o alarme do relógio. Para isto ele terá apenas que pegar e soltar o relógio (*REACH, GRAB, DROP*) fazendo com que o alarme do relógio cesse e este retorne à bancada da pia.

Em seguida, é solicitado ao usuário adicionar o fermento em pó e os ovos à tigela. A adição do fermento é feita similarmente aos anteriores. Os quatro ovos precisam ser pegos (*REACH, GRAB*) um de cada vez e o movimento de inclinar (*POUR*) faz com que o ovo quebre e a gema caia. Assim, o usuário precisa quebrar os quatro ovos em cima da tigela para adicioná-los à mistura.

O próximo ingrediente a ser adicionado é o queijo, que precisará ser ralado. Assim, após a adição dos ovos, o ralador de queijo aparece na tela e é solicitado ao *player* que pegue (*REACH, GRAB*) o queijo e o coloque no ralador (*MOVE, DROP*). Para ralar o queijo, o *player* precisa pegar (*REACH, GRAB*) a manivela do ralador e executar movimentos circulares em torno do eixo lateral (*SPIN-X*), no sentido horário. Ao final da atividade, o ralador sai da tela e aparece a batedeira que já se encaixa automaticamente na tigela, encerrando assim as atividades da tela J7.

As imagens referentes às atividades realizadas na tela J7 são exibidas na Fig. 4.17.

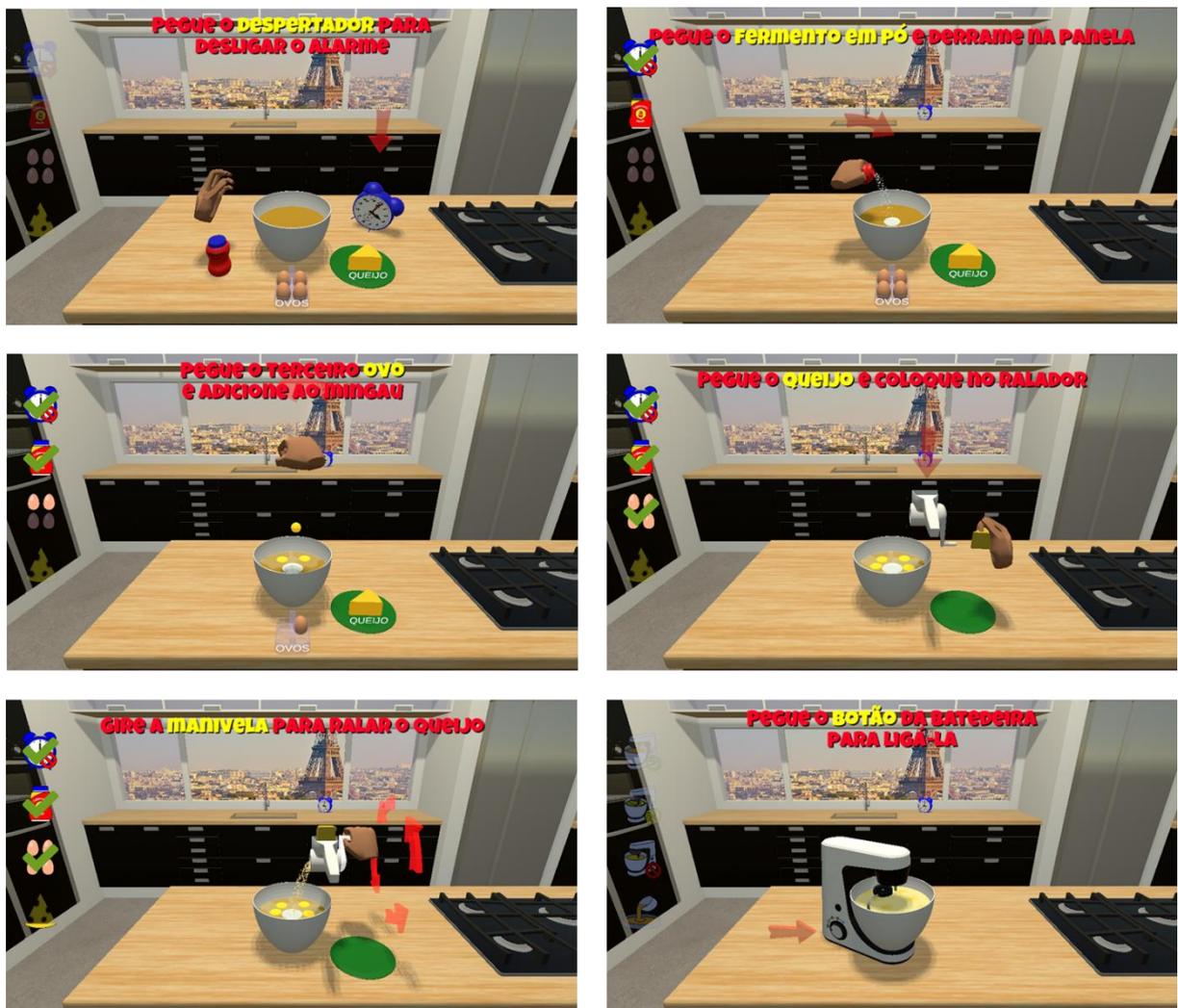


Figura 4.17 – Atividades realizadas na tela J7.

A tela J8 se inicia com a ativação da batedeira sendo solicitada ao usuário. Para isto, o *player* precisa pegar (*REACH, GRAB*) o botão da batedeira e realizar um deslocamento circular segundo o eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido horário. Durante o deslocamento, é destacado na tela o botão da batedeira, cujo ponteiro deve sair da posição “0” (desligada) e girar até a posição “4” (ligada na velocidade máxima). Uma vez ligada a batedeira, o *slider* relacionado à batedeira é gradualmente preenchido e a massa dentro da tigela se torna homogênea (mudança de cor).

Em seguida, é solicitado ao usuário o desligamento da batedeira, atividade semelhante à sua ativação, porém a movimentação deverá ser feita no sentido anti-horário. Ao desligar, a batedeira sai da tela e a assadeira aparece, e é solicitado ao usuário que derrame a massa da tigela na assadeira. O *player* precisará então pegar (*REACH, GRAB*) a tigela e posicioná-la (*MOVE*) em cima da assadeira, para que a tigela se incline automaticamente, despejando o seu conteúdo na assadeira. Encerra-se assim a tela J8, cujas imagens de suas atividades são apresentadas na Fig. 4.18.

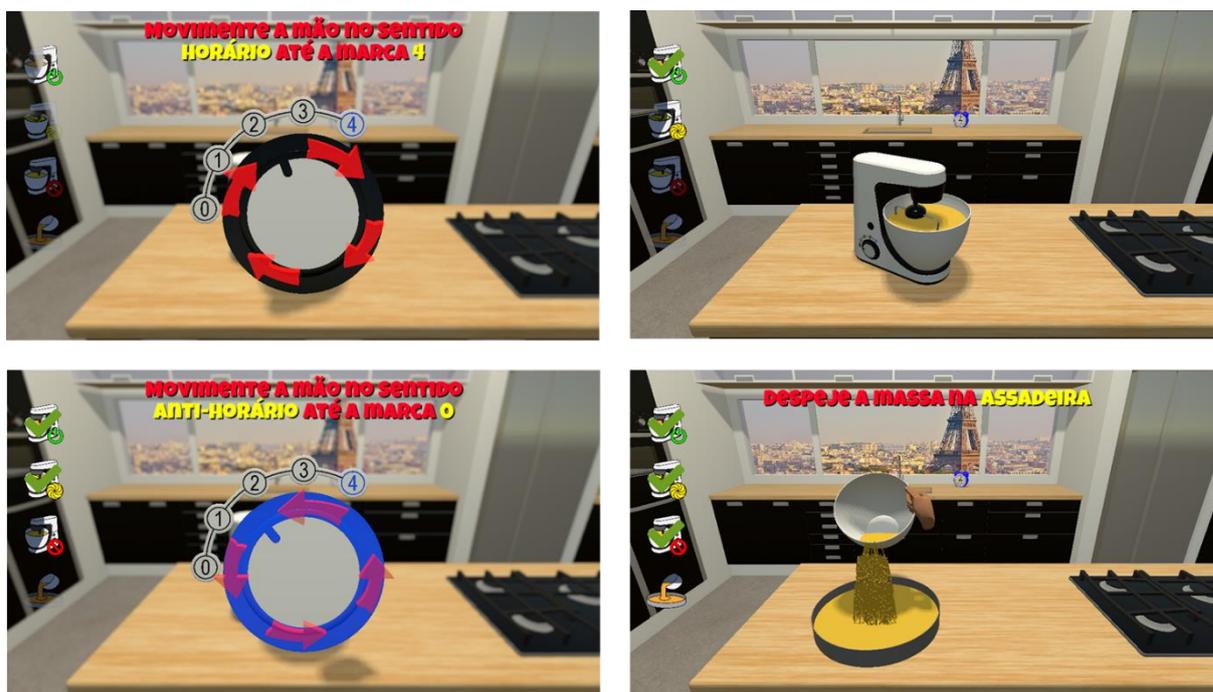


Figura 4.18 – Atividades realizadas na tela J8.

Com a massa do bolo pronta, o usuário deverá colocá-lo para assar no forno. Desta maneira, a tela J9 tem início com o deslocamento automático do usuário até a frente do forno. É solicitado que o *player* coloque o forno na função “assar”, pegando o respectivo botão (*REACH, GRAB*) e executando um deslocamento circular segundo o eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido anti-horário. Na tela, será destacado o botão de funções do forno e o usuário deverá

girar o ponteiro da marca de função “desligado” até a marca de função “assar”. O próximo passo será regular a temperatura do forno no pré-aquecimento. É solicitado então ao *player* que pegue (*REACH, GRAB*) o botão de temperatura e o coloque na posição de 180°C, a partir do deslocamento circular segundo o eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido horário. O botão de temperatura do forno é então destacado na tela, cujo ponteiro deve sair da posição “desligado” e atingir a posição de 180°C.

Um *slider* referente ao tempo de espera de pré-aquecimento do forno é gradualmente preenchido, simulando uma passagem rápida no tempo. Em seguida, é solicitado ao *player* que abra a porta do forno, pegando (*REACH, GRAB*) no puxador do forno e puxando-o (*MOVE*) de encontro ao *player*.

Com a porta do forno aberta, o *player* é automaticamente deslocado para a ilha e é solicitado que pegue (*REACH, GRAB*) a assadeira com a massa do bolo para colocá-la no forno. Quando o *player* pegar a assadeira, ele será deslocado automaticamente de volta para a frente do forno, onde deverá colocar (*MOVE, DROP*) a assadeira. Após isso, a porta do forno é fechada.

Ainda, é solicitado ao *player* que configure o alarme do forno para 60 minutos. Para isso, o *player* deve pegar (*REACH, GRAB*) o botão da função *timer* (similar a tempo) e colocar na posição 60, deslocando circularmente segundo o eixo frontal (*SPIN-Z*), no sentido horário. O botão da função *timer* é então destacado na tela, cujo ponteiro deve sair da posição “desligado” e chegar na posição “60”.

O *player* é deslocado automaticamente para a ilha, onde a tela escurece para a simulação da passagem do tempo, e são exibidos os dizeres “Uma hora depois...”, encerrando assim a tela J9. As imagens referentes às atividades descritas na tela J9 são apresentadas na Fig. 4.19.



Figura 4.19 – Atividades realizadas na tela J9.

A última tela, J10, se inicia revelando a cozinha com o bolo já assado no forno. O *player* é deslocado automaticamente para a frente do forno e é solicitado que abra a sua porta, igualmente à tela J9, retire a assadeira (*REACH, GRAB*) e coloque-a na ilha (*MOVE, DROP*). Após isso, o *player* retorna para a frente do forno, onde é pedido para que desligue o forno ao regular o botão de temperatura e de função para a posição “desligado”. O procedimento é realizado semelhantemente à tela anterior, porém com o sentido de rotação oposto.

As imagens referentes às atividades realizadas na tela J10 são exibidas na Fig. 4.20.

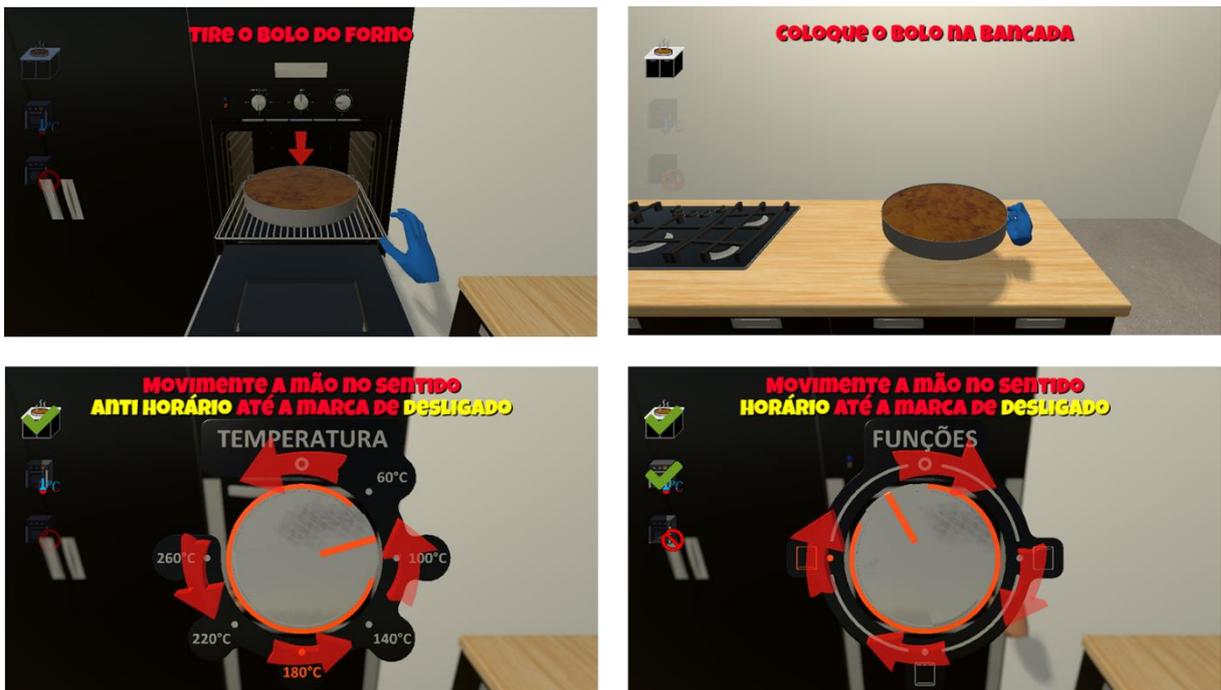


Figura 4.20 – Atividades realizadas na tela J10.

Uma vez que o forno está desligado, o *player* se desloca automaticamente para a ilha. A tela então se escurece e são exibidos os dizeres “Pouco tempo depois...”, para depois revelar novamente o ambiente, agora com o bolo cortado e servido em uma bandeja, como mostrado na Fig. 4.21.



Figura 4.21 – Tela de finalização com o bolo de fubá pronto.

O jogo então retorna à tela U1 onde, em trabalhos futuros, poderá ser exibido o progresso do paciente na sessão a partir de parâmetros quantificáveis como ângulos máximo e mínimo de preensão palmar e de supinação/pronação, tempo de execução de cada atividade e entre outros.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo das atividades realizadas em cada tela e as funções utilizadas em cada uma.

Tabela 4.2 – Resumo das atividades e funções utilizadas no jogo.

Tela	Atividade	Função*
<i>Home</i>	Posicionar o cursor sobre os botões de navegação	RC
U0	Posicionar o cursor sobre os botões de navegação	RC
U1	Posicionar o cursor sobre os botões de navegação	RC
<i>Pause</i>	Posicionar o cursor sobre os botões de navegação	RC
J0	Posicionar as mãos dentro do campo de visão do LMC	-
J1	Posicionar o cursor sobre os botões para a seleção da refeição	RC
J2	Posicionar o cursor sobre os botões para a seleção da assadeira	RC
J3	Abrir as portas do armário e selecionar os ingredientes	RC, GB, MV, DP
J4	Abrir a porta da geladeira e selecionar os ingredientes	RC, GB, MV, DP
J5	Despejar os ingredientes na panela	RC, GB, MV, PR, DP
	Levar a panela para o <i>cooktop</i>	RC, GB, MV, DP
J6	Ligar e desligar o fogo	RC, GB, SZ, DP
	Mexer a mistura com o <i>fouet</i>	RC, GB, SY, DP
	Despejar a mistura da panela na tigela	RC, GB, MV, DP
	Ativar o alarme	RC, GB, SZ, DP
J7	Desligar o alarme	RC, GB, DP
	Despejar o fermento e os ovos na tigela	RC, GB, MV, PR, DP
	Colocar o queijo no ralador de queijo	RC, GB, MV, DP
J8	Girar a manivela do ralador de queijo	RC, GB, SX, DP
	Ligar e desligar a batedeira de bolo	RC, GB, SZ, DP
J9	Despejar a massa na assadeira	RC, GB, MV, DP
	Ativar a função assar, pré-aquecer e <i>timer</i> do forno	RC, GB, SZ, DP
J10	Abrir a porta do forno e colocar a assadeira dentro do forno	RC, GB, MV, DP
	Abrir a porta do forno, pegar a assadeira e colocá-la na ilha	RC, GB, MV, DP
	Desligar o aquecimento e a função do forno	RC, GB, SZ, DP

*Funções REACH (RC), GRAB (GB), DROP (DP), MOVE (MV), POUR (PR), SPIN-X (SX), SPIN-Y (SY) e SPIN-Z (SZ).

4.4 Resultados e Discussões

Nos testes de execução realizados com o jogo, este apresentou desempenho satisfatório com duração de jogo de 8 a 16 minutos, dependendo da habilidade e experiência do usuário. Não foi apresentada nenhuma limitação com relação à utilização do LMC em ambientes iluminados artificialmente durante o jogo. O posicionamento do LMC com relação ao usuário permitiu que o *player* alcançasse todos os GO interativos no jogo.

Contudo, foram observados alguns erros de rastreamento do LMC durante a execução do jogo. Mãos aparecendo em locais vazios foram observadas em várias ocasiões. Durante a execução de atividades vinculadas à função *POUR*, também se observam erros no cálculo do ângulo ϕ de supinação/pronação, fazendo com que o objeto segurado inverta sua orientação em 180° . Em outras ocasiões, nota-se um mal rastreamento no ângulo α de preensão palmar, ocasionando no *player* soltar o objeto mesmo com o usuário mantendo a mão fechada. Outro problema observado é uma recorrente falha na comunicação entre o Unity3D[®] e a API do LMC, fazendo com que, por alguns segundos, nada seja rastreado pelo sensor.

Ainda assim, mesmo com todos esses problemas observados, o jogo apresenta desempenho contínuo, possibilitando que esses erros sejam corrigidos ao se retirar e colocar novamente as mãos no espaço de trabalho do LMC.

Uma estratégia que foi bastante utilizada durante a programação deste jogo foi a de prevenção de erros de lógica. Isto é, em todas as atividades programadas, foram consideradas todas as possibilidades que poderiam ocasionar em erros na execução do jogo. Como solução, foi criado um *script* no qual toda a execução das atividades do jogo era verificada passo a passo, ativando e desativando os GOs que poderiam vir a causar algum tipo de falha no jogo.

Para a execução do jogo em um computador, é necessária a instalação da API do LMC, e ter o dispositivo conectado. Com relação ao suporte do dispositivo, qualquer superfície que possa ser colocada próxima aos joelhos do usuário e que mantenha o LMC imóvel e nivelado servirá para uma boa experiência no jogo.

O projeto e desenvolvimento do jogo YCCA se mostrou bastante desafiante pelo fato deste ter sido o primeiro contato do autor deste trabalho com o conceito de programação orientada a objetos, com a linguagem de programação C#, com o software de modelagem 3D Blender[®] e com o software de desenvolvimento de jogos Unity3D[®]. Combinando todos os *scripts* escritos no jogo, foram mais de cinco mil linhas de código em um trabalho realizado ao longo de aproximadamente um ano.

O link a seguir mostra o funcionamento do jogo completo: <https://youtu.be/Cmb-2vpRP0A>.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Nesta dissertação, foi apresentado o estudo do sensor *Leap Motion Controller*, com respeito à validação de suas leituras e sua utilização em jogos sérios para reabilitação virtual.

5.1 Considerações Sobre o Leap Motion Controller

Na revisão bibliográfica desta dissertação foram apresentados diversos trabalhos sobre a análise da precisão e acuracidade do LMC. Muitos autores observaram uma série de problemas apresentados pelo sensor com relação à sua utilização como instrumento de medição. Mesmo assim, muitos concordaram que sua utilização em aplicações ausentes da necessidade de alta acuracidade nas leituras é promissora.

Também foi feita uma revisão sobre o uso do LMC em terapias de reabilitação, na qual foram apresentadas pesquisas publicadas nos últimos cinco anos. Verifica-se que há aplicações na reabilitação de diversos tipos de condições, entre elas acidente vascular encefálico, mal de Parkinson, paralisia cerebral, autismo, esclerose lateral amiotrófica, entre outros. Nota-se também que seu uso se estende de terapias de reabilitação motora à cognitiva. Em vários casos, a implementação do LMC nas terapias fez o uso de aplicações disponibilizadas em sua loja de aplicativos, cujo âmbito é apenas entretenimento, isto é, mesmo aplicações sem propósito vinculado à reabilitação exibem grande potencial nesta área.

No Capítulo III, foi realizado um estudo aprofundado sobre o LMC, expondo seu funcionamento, espaço de trabalho, eixos de referência, as variáveis disponibilizadas pela sua API, suas versões de software e a estrutura de seus dados. Ainda foi apresentada a sua validação experimental, utilizando um braço robótico industrial, para a posterior análise de seus erros e repetibilidade.

Um total de mais de 100 experimentos foram realizados nos quais foram avaliados seus erros com relação ao posicionamento espacial de vários pontos de uma mão de madeira antropomórfica e antropométrica em medidas estáticas, em deslocamento linear e circular, sua orientação em deslocamentos angulares e sua medida do ângulo de preensão palmar. Ainda foram verificadas a sua taxa de aquisição e consistência durante as leituras.

A taxa de aquisição observada nos experimentos foi de aproximadamente 113 *frames* por segundo, acima da faixa considerada satisfatória para a aplicação em um jogo (CLAYPOOL e CLAYPOOL, 2009).

Em geral, nos experimentos cujo parâmetro medido foi a posição da palma da mão, o erro apresentado foi maior conforme se afasta a mão do sensor. A repetibilidade média observada nestes experimentos se mostrou abaixo de 10 mm, sendo menor que 0,3 mm nos ensaios estáticos. Nos experimentos que avaliaram a orientação da mão, a repetibilidade média observada se manteve abaixo de 5° para a disposição transversal, escolhida para a utilização no jogo. Já os ângulos de preensão palmar observados nos experimentos transversais, apresentaram repetibilidade média abaixo de 8° para as configurações de mão aberta e cerrada.

Os valores apresentados nos experimentos foram suficientes para se concluir que o LMC pode ser utilizado em um jogo com foco em reabilitação virtual.

5.2 Considerações Sobre o Jogo Sério Desenvolvido

Na concepção do jogo sério, foi apresentada a paciente de reabilitação Marcinha (nome fictício) cujo um dos sonhos era poder voltar a cozinhar um bolo. A partir daí surgiu a ideia de desenvolver um jogo sério feito em uma cozinha virtual cujo objetivo seria a preparação de um bolo de fubá.

Com essa visão e o conhecimento sobre as capacidades do sensor LMC, foram projetadas oito funções que identificam, a partir das variáveis disponibilizadas pela API, movimentos básicos como alcançar, pegar ou soltar um objeto.

Após isso, foi idealizada a forma como o LMC seria posicionado próximo ao usuário, resultando na utilização de um pedestal de microfone acoplada à uma peça impressa em ABS com o LMC fixo a ela. Assim o LMC poderá ficar entre os joelhos do usuário, possibilitando o rastreamento de grande parte de seus movimentos.

Foi apresentado também o desenvolvimento do mecanismo de interação que possibilita ao usuário pegar objetos variando-se apenas o ângulo de preensão palmar e utilizá-los no jogo.

Em seguida, foi mostrada a forma de navegação no jogo, exibindo as telas de menu e suas funções. Para a utilização das telas de menu, um *script* foi desenvolvido para a movimentação do cursor do mouse utilizando o rastreamento das mãos pelo LMC.

Depois foram apresentadas as telas de jogo, onde é usado o ambiente virtual da cozinha. Por fim, todas as atividades necessárias para o preparo do bolo de fubá são descritas, fazendo uso das oito funções básicas criadas.

5.3 Trabalhos Futuros

Com relação ao jogo YCCA, diversas implementações em trabalhos futuros são sugeridas. De início, a adição de áudio no jogo, simulando os ruídos realizados durante as atividades, contribuirá muito com a experiência do usuário. A continuação do jogo com a criação de novas refeições com novas receitas deixaria o jogo mais atrativo. Como já dito anteriormente, a implementação da customização do ambiente pelo usuário também poderia melhorar a experiência em jogo.

Olhando para o lado mais profissional, a implementação da tela do profissional seria de extrema importância na disseminação do jogo em clínicas de reabilitação no futuro. Desta forma, o profissional poderia ter um usuário e senha particulares com acesso aos seus pacientes. O profissional também poderia cadastrar um novo paciente e utilizar um ambiente separado do jogo para a calibração de parâmetros, como o ângulo α , específicos para cada paciente.

Outra sugestão que contribuiria muito com a evolução do YCCA é a criação de um repositório de exercícios funcionais realizados em terapias, relacionando os parâmetros medidos em sua avaliação, para uma posterior implementação dessas atividades no jogo. Assim, poderão ser projetadas novas atividades com funções que exercitam o paciente semelhantemente às realizadas em terapias.

Já é conhecida a possibilidade de se criar e exportar em formato de texto arquivos contendo gráficos através de *scripts*. Sendo assim, uma vez estabelecidos os parâmetros para a avaliação do desempenho do paciente no jogo, relatórios contendo toda essa análise poderão ser gerados e exportados para o profissional de saúde.

Outra possível funcionalidade é o armazenamento destes dados gerados na sessão em um servidor na internet. Desta forma, o jogo poderia tanto receber instruções como exercícios programados pelo terapeuta, quanto enviar os dados da sessão do paciente. Isto possibilitaria a implementação da tele reabilitação, visto que o usuário só precisaria ter em casa um computador, com acesso à internet e com a API e o jogo instalados, além do LMC.

Por fim, também existe a possibilidade de se adequar o jogo YCCA a ser utilizado com óculos de realidade virtual. Basicamente, as mudanças que precisariam ser feitas no jogo para que isso seja possível são a mudança da localização do GO do LMC no jogo para próximo à câmera, como é sugerido pelos fabricantes nas aplicações em realidade virtual, e o controle da orientação da câmera pelo sensor inercial presente nos óculos. Desta forma, com a imersão do usuário no ambiente virtual, a experiência proporcionada no jogo seria ainda mais valorizada.

Com relação ao uso do jogo YCCA, sugere-se o seu teste com voluntários saudáveis utilizando, como avaliação, relatórios sobre as dificuldades encontradas, disposição do usuário durante a sua utilização e sugestões a respeito do jogo.

Após isso, recomenda-se a otimização do jogo com base nas dificuldades encontradas pelos voluntários saudáveis com o propósito da realização de testes com pacientes em reabilitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API Overview. **Developer Leap Motion**, 2017. Disponível em: <https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/csharp/devguide/Leap_Overview.html>. Acesso em: 25 Março 2019.

AZIZ, A. A.; RESHMA, K. Leap Motion Controller: A view on interaction modality. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 5, n. 19, Outubro 2016. p. 35-38. Disponível em <<https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0531007>>.

BACHMANN, D.; WEICHERT, F.; RINKENAUER, G. Evaluation of the Leap Motion Controller as a new contact-free pointing device. **Sensors**, v. 15, n. 1, 2015. p. 214-233. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s150100214>>.

BASSILY, D.; GEORGOULAS, C.; GÜTTLER, J.; LINNER, T.; BOCK, T. **Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation using the Leap Motion Controller**. 41st International Symposium on Robotics (ISR/Robotik 2014). Munich, 2014. p. 1-7.

BROWN, D.; RENNEY, N.; STARK, A.; NASH, C.; MITCHELL, T. **Leimu**: Gloveless music interaction using a wrist mounted Leap Motion. International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME'16). Brisbane, Austrália, 2016. p. 300-304.

BUCKWALD, M. Leap Motion V2 Tracking Now in Public Developer Beta, 2014. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/leap-motion-v2-tracking-now-in-public-developer-beta/>>. Acesso em: 25 Março 2019.

BURDEA, G. Key Note Address: Virtual Rehabilitation - Benefits and Challenges. **Methods of Information in Medicine**, v. 42, n. 5, 2003. p. 519-523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1055/s-0038-1634378>>.

BURKE, J. W.; MCNEILL, M. D. J.; CHARLES, D. K.; MORROW, P. J.; CROSBIE, J. H.; MCDONOUGH, S. M. Optimising engagement for stroke rehabilitation using serious games. **The Visual Computer**, v. 25, n. 12, 2009. p. 1085-2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00371-009-0387-4>>.

BUTT, A. H.; ROVINI, E.; DOLCIOTTI, C.; BONGIOANNI, P.; DE PETRIS, G.; CAVALLO, F. **Leap motion evaluation for assessment of upper limb motor skills in Parkinson's disease**. International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Londres, RU, 2017. p. 116-121. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009232>>.

CLAYPOOL, M.; CLAYPOOL, K. **Perspectives, Frame Rates and Resolutions: It's all in the Game**. Proceedings of the 4th International Conference on Foundations of Digital Games. Port Canaveral, FL, EUA, 2009. p. 42-49. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1536513.1536530>>.

COLGAN, A. How Does the Leap Motion Controller Work?, 2014. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work/>>. Acesso em: 25 Março 2019.

CURIEL-RAZO, Y. I.; ICASIO-HERNANDEZ, O.; SEPULVEDA-CERVANTES, G.; HURTADO-RAMOS, J. B.; GONZALEZ-BARBOSA, J. J. Leap motion controller three dimensional verification and polynomial correction. **Measurement**, v. 93, p. 258-264, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.017>>.

DAVIS, A. Getting Started with the Leap Motion SDK, 2014. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/getting-started-leap-motion-sdk/>>. Acesso em: 1 Abril 2019.

DJAOUTI, D.; ALVAREZ, J.; JESSEL, J. P. Classifying Serious Games: the G/P/S model. In: FELICIA, P. **Handbook of Research on Improving Learning and Motivation through Educational Games: Multidisciplinary Approaches**. Hershey, PA: IGI Global, v. 2, 2011. Cap. 6, p. 118-136. Disponível em: <<https://doi.org/10.4018/978-1-60960-495-0.ch006>>.

ERRA, U.; MALANDRINO, D.; PEPE, L. Virtual Reality Interfaces for Interacting with Three-Dimensional Graphs. **International Journal of Human-Computer Interaction**, v. 35, n. 1, p. 75-88, Jan 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1429061>>.

FAGUNDES, W. I. P.; ALONSO, E. E. M. **Protótipo de Ambiente de Simulação Imersivo e Interativo para Letramento de Crianças Surdas Usando Leap Motion com Realidade Virtual**. Proceedings of SBGames 2018, Education Track. Foz do Iguaçu, PR, 2018. p. 1416-1419.

FALCÃO, C.; LEMOS, A. C.; SOARES, M. **Evaluation of natural user interface: A usability study based on the Leap Motion device**. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Recife PE: Elsevier B. V. 2015. p. p. 5490-5495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.697>>.

FILHO, J. E. V.; CARVALHO, L. M.; SOUSA, A. G.; MIRANDA, T. C.; MACAMBIRA, N. A. **Captura de Movimentos para Interação de Crianças Especiais em uma Ferramenta Lúdica e Asséptica no Tratamento Odontológico.** Proceedings of XIII SBGames. Porto Alegre, RS, 2014. p. 950-953.

GONÇALVES, R. S. **Apostila de práticas de laboratório de Robótica.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 41. 2013.

GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. **Desenvolvimento de uma estrutura robótica paralela atuada por cabos para reabilitação dos movimentos do ombro.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, PB, 2010.

GOODMAN, R. N.; RIETSCHER, J. C.; ROY, A.; JUNG, B. C.; DIAZ, J.; MACKO, R. F.; FORRESTER, L. W. Increased reward in ankle robotics training enhances motor control and cortical efficiency in stroke. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 51, n. 2, 2014. p. 213-228. Disponível em: <<https://doi.org/10.1682/JRRD.2013.02.0050>>.

GUNA, J.; JAKUS, G.; POGAČNIK, M.; TOMAŽIČ, S.; SODNIK, J. An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and its Suitability for Static and Dynamic Tracking. **Sensors**, v. 14, n. 2, p. 3702-3720, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s140203702>>.

GÜTTLER, J.; SHAH, R.; GEORGOULAS, C.; BOCK, T. Unobtrusive tremor detection and measurement via human-machine interaction. **Procedia Computer Science**, v. 63, p. 467-474, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.369>>.

HERNOUX, F.; BÉARÉE, R.; GIBARU, O. **Investigation of dynamic 3D hand motion reproduction by a robot using a Leap Motion.** Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference. Laval, France, 2015. p. 24. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2806173.2806196>>.

HOLZ, D. Leap Motion Goes Mobile, 2016. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/mobile-platform/>>. Acesso em: 25 Março 2019.

HORNSEY, R. L.; HIBBARD, P. B. **Evaluation of the accuracy of the Leap Motion controller for measurements of grip aperture.** Proceedings of the 12th European Conference on Visual Media Production. Londres, 2015. p. 13. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2824840.2824855>>.

HOSSEINPOUR, N. **Implementation of the Kinect sensor and Leap motion for distance study of motor skills in Parkinson's disease.** Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology. Gothenburg, Suécia. 2016.

HP6 Manipulator Manual. YASKAWA Electric Manufacturing. West Carrollton, OH, p. 82. 2007.

INTRODUCING Orion. **Next-Generation Hand Tracking for VR**, 2016. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/orion/>>. Acesso em: 25 Março 2019.

IPAD. **Apple**. Disponível em: <<https://www.apple.com/br/ipad>>. Acesso em: 23 Março 2019.

ISO 9283 (1998). **Manipulating Industrial Robots - Performance Criteria and Related Test Methods**, Geneva.

JÁNOŠ, R.; SUKOP, M.; HAJDECKER, A. Application for Rehabilitation "Virtual Rehab". **Transfer Inovácií**, 2015.

KHADEMI, M.; HONDORI, H. M.; MCKENZIE, A.; DODAKIAN, L.; LOPES, C. V.; CRAMER, S. C. **Free-hand interaction with leap motion controller for stroke rehabilitation**. CHI'14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. Toronto, Canadá, 2014. p. 1663-1668. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2559206.2581203>>.

KHELIL, B.; AMIRI, H. **Hand gesture recognition using leap motion controller for recognition of arabic sign language**. 3rd International Conference on Automation, Control, Engineering and Computer Science (ACECS'16). Hammamet, Tunisia, 2016. p. 233-238.

KINCAID, C. J. **The Feasibility of Using a Markerless Motion Capture Sensor (Leap Motion™ Controller) for Quantitative Motor Assessment Intended for a Clinical Setting**. Brigham Young University. Provo, Utah, EUA. 2016.

KUMIČÁKOVÁ, D.; TLACH, V.; CÍŠAR, M. Testing the performance characteristics of manipulating industrial robots. **Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series**, v. LXII, n. 1, p. 39-50, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.22223/tr.2016-1/2009>>.

LAM, M. Y.; TATLA, S. K.; LOHSE, K. R.; SHIRZAD, N.; HOENS, A. M.; MILLER, K. J.; HOLSTI, L.; VIRJI-BABUL, N.; LOOS, H. F. M. V. Perceptions of technology and its use for therapeutic application for individuals with hemiparesis: findings from adult and pediatric focus groups. **JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies**, v. 2, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.2196/rehab.3484>>.

LANGHORNE, P.; COUPAR, F.; POLLOCK, A. Motor recovery after stroke: a systematic review. **The Lancet Neurology**, v. 8, n. 8, 2009. p. 741-754. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(09\)70150-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(09)70150-4)>.

LEAP Motion, 2013. Disponível em: <<https://www.leapmotion.com>>. Acesso em: 23 Março 2019.

LEAP Motion Documentation, 2018. Disponível em: <<https://developer.leapmotion.com/documentation/>>. Acesso em: 2 Abril 2019.

LEAP Vector. **Developer Archive**. Disponível em: <<https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/python/api/Leap.Vector.html>>. Acesso em: 22 Abril 2019.

LEE, W. L.; SINCLAIR, N. C.; JONES, M.; TAN, J. L.; PROUD, E. L.; PEPPARD, R.; MCDERMOTT, H. J.; PERERA, T. Objective evaluation of bradykinesia in Parkinson's disease using an inexpensive marker-less motion tracking system. **Physiological measurement**, v. 40, p. 9, Feb 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6579/aafef2>>.

LEVY, C. E.; SILVERMAN, E.; JIA, H. G. M.; OMURA, D. Effects of physical therapy delivery via home video telerehabilitation on functional and health-related quality of life outcomes. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 52, n. 3, 2015. p. 361-370. Disponível em: <<https://doi.org/10.1682/JRRD.2014.10.0239>>.

LI, W. J.; HSIEH, C. Y.; LIN, L. F.; CHU, W. C. **Hand gesture recognition for post-stroke rehabilitation using leap motion**. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation. Sapporo, Japão, 2017. p. 386-388. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988433>>.

LIN, P. J.; CHEN, H. Y.; HUNG, S.; LIN, C. C.; WANG, Y. C. **An Upper Extremity Rehabilitation System Using Virtual Reality Technology**. 15th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks (I-SPAN). 2018. p. 253-256. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/I-SPAN.2018.00048>>.

LIU, L.; CHEN, X.; LU, Z.; CAO, S.; WU, D. Z. X. Development of an EMG-ACC-based upper limb rehabilitation training system. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, v. 25, n. 3, Março 2017. p. 244-253. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2560906>>.

LUGO, G.; MANZANO, M. I.; BA, F.; CHENG, I. **Virtual reality and hand tracking system as a medical tool to evaluate patients with Parkinson's**. Health-i-Coach. Barcelona, Espanha, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3154862.3154924>>.

MARIN, G.; DOMINIO, F.; ZANUTTIGH, P. **Hand gesture recognition with Leap Motion and Kinect devices**. Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Paris, France, 2014. p. 1565-1569. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025313>>.

MICHAEL, D. R.; CHEN, S. **Serious Games: Games That Educate, Train, and Inform**. Boston, MA: Thomson Course Technology, 2006.

MICROSOFT Kinect. **Xbox**. Disponível em: <<https://support.xbox.com/pt-BR/browse/xbox-360/accessories/Kinect>>. Acesso em: 23 Março 2019.

NAGLOT, D.; KULKARNI, M. **ANN based Indian Sign Language numerals recognition using the Leap Motion Controller**. Proceedings of the 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). Coimbatore, India, 2016. p. 1-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/INVENTIVE.2016.7824830>>.

NAGLOT, D.; KULKARNI, M. **Real Time Sign Language Recognition using the Leap Motion Controller**. Proceedings of the 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). Coimbatore, India, 2016. p. 1-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/INVENTIVE.2016.7830097>>.

NINTENDO Wii. **Nintendo**. Disponível em: <<https://www.nintendo.co.uk/Wii/Wii-94559.html>>. Acesso em: 23 Março 2019.

NIZAMIS, K.; RIJKEN, N. H. M.; MENDES, A.; JANSSEN, M. M. H. P.; BERGSMA, A.; KOOPMAN, B. F. J. M. A Novel Setup and Protocol to Measure the Range of Motion of the Wrist and the Hand. **Sensors**, v. 18, n. 10, p. 3230, Set 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s18103230>>.

OHNISHI, T.; IWASAKI, T.; TANAKA, M. Evaluation of hemiplegia caused by stroke by using joint detection of depth sensor - case of SIAS. **Electrical Engineering in Japan**, v. 206, n. 2, p. 33-43, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/eej.23152>>.

OLIVEIRA, J. M.; JORGE, J. C. M.; DUARTE, J. B. F.; ALBUQUERQUE, V. H. C. Complementary Treatment for Children with Cerebral Palsy based on Virtual Reality. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 8, p. 3820-3825, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7786369>>.

ORION V4. **Introducing the Latest Generation of Orion Tracking**, 2018. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/v4/>>. Acesso em: 2 Abril 2019.

PERRY, J. MatLeap: MATLAB interface to the Leap Motion Controller. **Github**, 2014. Disponível em: <<https://github.com/jeffsp/matleap/tree/afb3f57f94095f82841671f50dd7f3344ec6590d>>. Acesso em: 2 Abril 2019.

PHYSIOPEDIA. The effectiveness of gaming technology in neurological rehabilitation, 2019. Disponível em: <https://www.physio-pedia.com/index.php?title=The_effectiveness_of_gaming_technology_in_neurological_rehabilitation&oldid=204961>. Acesso em: 22 Março 2019.

PLACIDI, G.; CINQUE, L.; POLSINELLI, M.; SPEZIALETTI, M. Measurements by A LEAP-Based Virtual Glove for the Hand Rehabilitation. **Sensors**, v. 18, n. 3, p. 834, Mar 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s18030834>>.

POTTER, L. E.; ARAULLO, J.; CARTER, L. **The Leap Motion controller**: A view on sign language. Proceedings of the 25th Australian computer-human interaction conference: augmentation, application, innovation, collaboration. Adelaide, Australia, 2013. p. 175-178. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2541016.2541072>>.

PROJECT North Star, 2018. Disponível em: <<http://blog.leapmotion.com/north-star-open-source/>>. Acesso em: 1 Abril 2019.

REMBOSK, T. B.; DE SOUZA, W. D.; DE AGUIAR, M. S. Reconhecimento de sinais de LIBRAS utilizando o sensor Leap Motion. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 5, 2017. ISSN 1.

SANTOS, A. L. M. **Um estudo sobre o mapeamento de gestos do Leap Motion para a língua brasileira de sinais (Libras)**. Recife, 2015.

SDK Leap Motion. Disponível em: <<https://developer.leapmotion.com/get-started/>>. Acesso em: 8 Abril 2019.

SEIXAS, M. C. B.; CARDOSO, J. C. S.; DIAS, M. T. G. **The Leap Motion movement for 2D pointing tasks - Characterisation and comparison to other devices**. 5th International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems (PECCS 2015). Angers, France: IEEE. 2015. p. 15-24.

SHAO, L. **Hand movement and gesture recognition using Leap Motion Controller**. Stanford University. 2016.

SMARTTOOL - Technical Specs, 2019. Disponível em: <<http://smarttoollevels.com/technical-specs/>>. Acesso em: 25 Abril 2019.

SMERAGLIUOLO, A. H.; HILL, N. J.; DISLA, L.; PUTRINO, D. Validation of the Leap Motion Controller using markered motion capture technology. **Journal of biomechanics**, v. 49, n. 9, p. 1742-1750, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.04.006>>.

SOARES, N. M.; PEREIRA, G. M.; FIGUEIREDO, R. I. N.; MORAIS, G. S.; MELO, S. G. Terapia baseada em realidade virtual usando o Leap Motion Controller para reabilitação do membro superior após acidente vascular cerebral. **Scientia Medica**, v. 27, n. 2, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.15448/1980-6108.2017.2.25935>>.

SYAHPUTRA, M. F.; ARISANDI, D.; LUMBANBATU, A. F.; KEMIT, L. F.; NABABAN, E. B.; SHETA, O. **Augmented reality social story for autism spectrum disorder**. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/978/1/012040>>.

TARAKCI, E.; ARMAN, N.; TARAKCI, D.; KASAPCOPUR, O. Leap Motion Controller - based training for upper extremity rehabilitation in children and adolescents with physical disabilities: A randomized controlled trial. **Journal of Hand Therapy**, p. 1-8, Mar 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jht.2019.03.012>>.

TATLA, S. K.; SAUVE, K.; VIRJI-BABUL, N.; HOLSTI, L. B. C.; LOOS, H. F. M. V. Evidence for outcomes of motivational rehabilitation interventions for children and adolescents with cerebral palsy: an American Academy for Cerebral Palsy and Developmental Medicine systematic review. **Developmental Medicine & Child Neurology**, v. 55, n. 7, 2013. p. 593-601. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/dmnc.12147>>.

TREJO, R. L.; VÁZQUEZ, J. P. G.; RAMIREZ, M. L. G.; CORRAL, L. E. V.; MARQUEZ, I. R. **Hand Goniometric Measurements using Leap Motion**. 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, EUA, 2017. p. 137-141. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/CCNC.2017.7983095>>.

TREVIZAN, I. L. **Eficácia de diferentes dispositivos de interação em tarefa virtual na esclerose lateral amiotrófica**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Medicina. Universidade de São Paulo, 2016.

TUNG, J.; LULIC, T.; GONZALEZ, D. A.; TRAN, J.; DICKERSON, C. R.; ROY, E. A. Evaluation of a portable markerless finger position capture device: accuracy of the Leap Motion controller in healthy adults. **Physiological Measurement**, v. 36, n. 5, p. 1025-1035, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/5/1025>>.

VALENTINI, P. P.; PEZZUTI, E. Accuracy in fingertip tracking using Leap Motion Controller for interactive virtual applications. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 11, n. 3, p. 641-650, Junho 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12008-016-0339-y>>.

VANBELLINGEN, T.; FILIUS, S. J.; NYFFELER, T.; WEGEN, E. E. H. V. Usability of Videogame-Based Dexterity Training in the early rehabilitation Phase of stroke Patients: a Pilot study. **Frontiers in Neurology**, v. 8, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00654>>.

VIEIRA, A. S. **Desenvolvimento de Aplicativo para Monitoramento e Comando de Braço Robótico**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 52. 2016.

WEICHERT, F.; BACHMANN, D.; RUDAK, B.; FISSELER, D. Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller. **Sensors**, v. 13, n. 5, p. 6380-6393, Maio 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s130506380>>.

WEISS, P. L. T.; KESHNER, E. A.; LEVIN, M. F. **Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation**. New York: Springer, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0968-1>>.

WU, Y. T.; CHEN, K. H.; BAN, S. L.; TUNG, K. Y.; CHEN, L. R. Evaluation of leap motion control for hand rehabilitation in burn patients: An experience in the dust explosion disaster in Formosa Fun Coast. **Burns**, v. 45, n. 1, p. 157-164, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.burns.2018.08.001>>.

ZHU, G.; CAI, S.; MA, Y.; LIU, E. **A series of Leap Motion-based Matching Games for Enhancing the Fine Motor Skills of Children with Autism**. 2015 IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies. Hualien, Taiwan: IEEE. 2015. p. 430-431. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICALT.2015.86>>.

APÊNDICE A

RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA OS DEDOS DA MÃO

Este apêndice tem como objetivo a apresentação dos gráficos e tabelas geradas a partir dos resultados obtidos para as pontas dos dedos nos experimentos.

A.1. Experimentos Estáticos para os Dedos da Mão

Neste tópico, são apresentados os resultados dos experimentos estáticos. Os gráficos e tabelas geradas são organizados para cada dedo e, ao final do tópico, uma análise é realizada.

A.1.1. Resultados das medições do polegar

Os resultados para as medições dos EEST transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.1 e Fig. A.2, respectivamente.

Exp. Estáticos – Polegar – Disposição Transversal

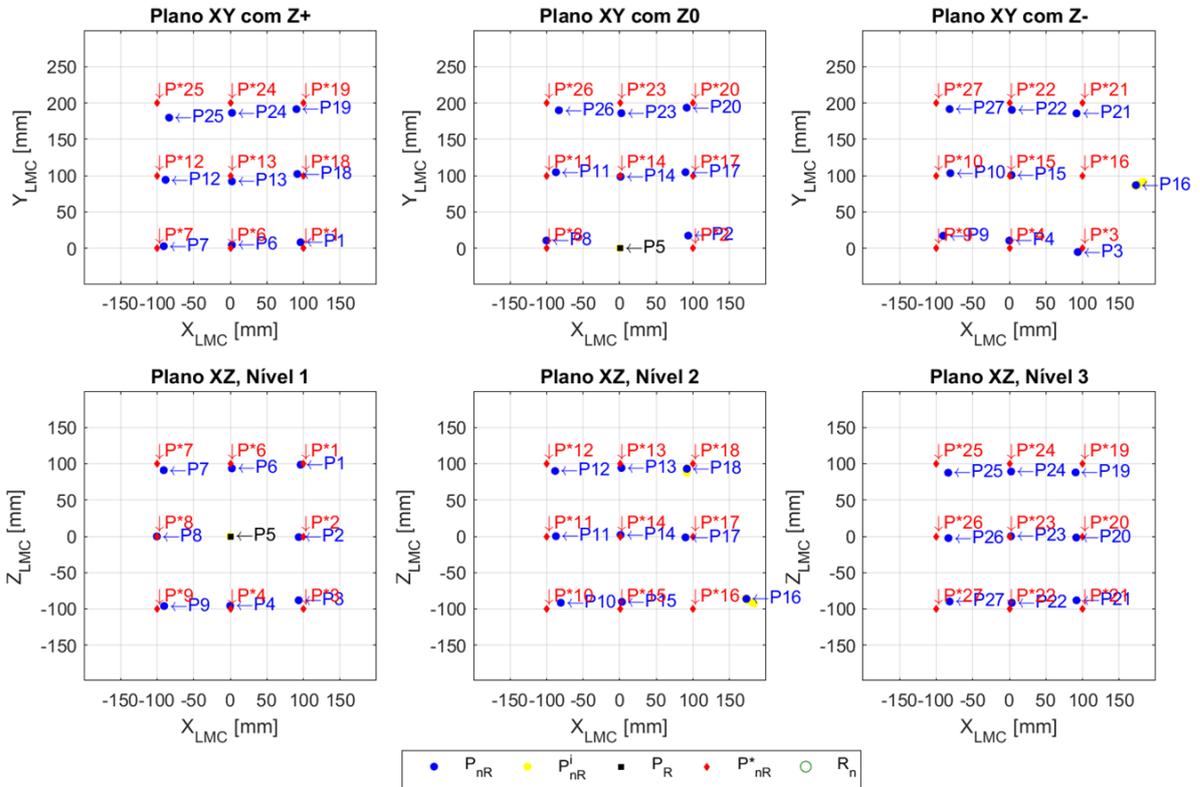


Figura A.1 – EEST - Posições relativas ao polegar na disposição transversal.

Exp. Estáticos – Polegar – Disposição Longitudinal

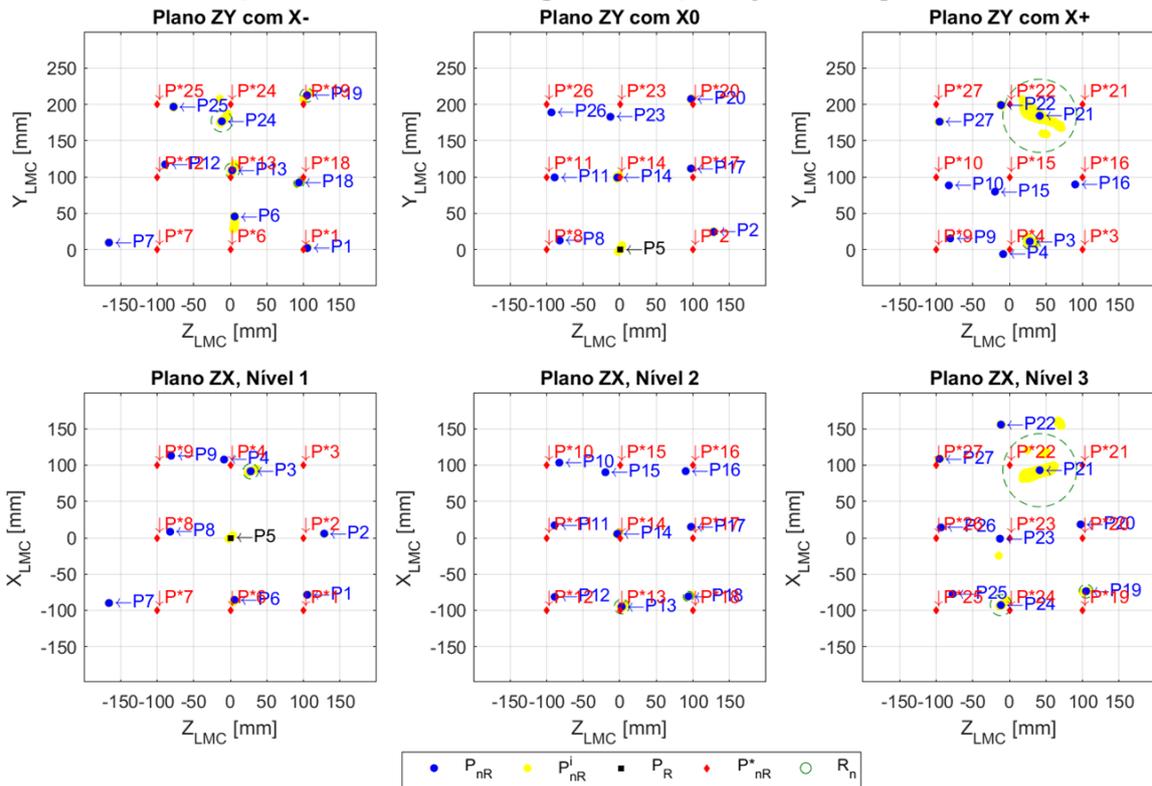


Figura A.2 – EEST - Posições relativas ao polegar na disposição longitudinal.

Na Tabela A.1 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EEST para o polegar.

Tabela A.1 - Resultados dos EEST para o polegar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	9,11	0,10	100,00	1	P_1	22,20	1,96	100,00
	P_2	18,50	0,21	100,00		P_2	37,94	0,92	100,00
	P_3	14,55	0,13	100,00		P_3	73,41	10,50	100,00
	P_4	11,38	0,11	100,00		P_4	13,01	0,59	100,00
	P_5	-	0,04	100,00		P_5	-	4,87	100,00
	P_6	8,06	0,11	100,00		P_6	48,22	4,50	100,00
	P_7	13,03	0,18	100,00		P_7	67,32	0,72	100,00
	P_8	10,62	0,19	100,00		P_8	23,32	0,09	100,00
	P_9	20,12	0,23	100,00		P_9	27,79	0,82	100,00
Média	13,17	0,14	100,00	Média	39,15	2,78	100,00		
2	P_{10}	21,34	0,41	100,00	2	P_{10}	21,05	0,24	100,00
	P_{11}	13,51	0,19	100,00		P_{11}	20,41	0,15	100,00
	P_{12}	16,41	0,07	100,00		P_{12}	27,70	0,75	100,00
	P_{13}	10,06	0,13	100,00		P_{13}	10,88	10,13	100,00
	P_{14}	2,71	0,20	100,00		P_{14}	6,39	2,96	100,00
	P_{15}	10,16	0,36	100,00		P_{15}	29,78	0,48	100,00
	P_{16}	75,57	3,90	100,00		P_{16}	16,48	0,37	100,00
	P_{17}	11,32	0,15	100,00		P_{17}	19,30	0,65	100,00
	P_{18}	11,04	4,19	100,00		P_{18}	21,66	6,93	100,00
Média	19,13	1,07	100,00	Média	19,29	2,52	100,00		
3	P_{19}	17,47	0,15	100,00	3	P_{19}	29,67	9,38	98,50
	P_{20}	10,86	0,26	100,00		P_{20}	20,08	1,27	100,00
	P_{21}	20,30	0,26	100,00		P_{21}	60,96	50,38	100,00
	P_{22}	13,10	0,34	100,00		P_{22}	56,97	1,99	100,00
	P_{23}	14,13	0,28	100,00		P_{23}	21,36	0,43	100,00
	P_{24}	17,47	0,12	100,00		P_{24}	26,99	14,50	100,00
	P_{25}	28,80	0,14	100,00		P_{25}	32,04	1,73	100,00
	P_{26}	19,62	0,26	100,00		P_{26}	19,13	0,25	100,00
	P_{27}	22,56	0,29	100,00		P_{27}	25,67	1,91	100,00
Média	18,26	0,23	100,00	Média	32,54	9,09	99,83		
Média*	16,99	0,48	100,00	Média*	29,99	4,80	99,94		
Máximo**	75,57	4,19	100,00	Máximo**	73,41	50,38	100,00		

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

A.1.2. Resultados das medições do dedo indicador

Os resultados para as medições dos EEST transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.3 e Fig. A.4, respectivamente.

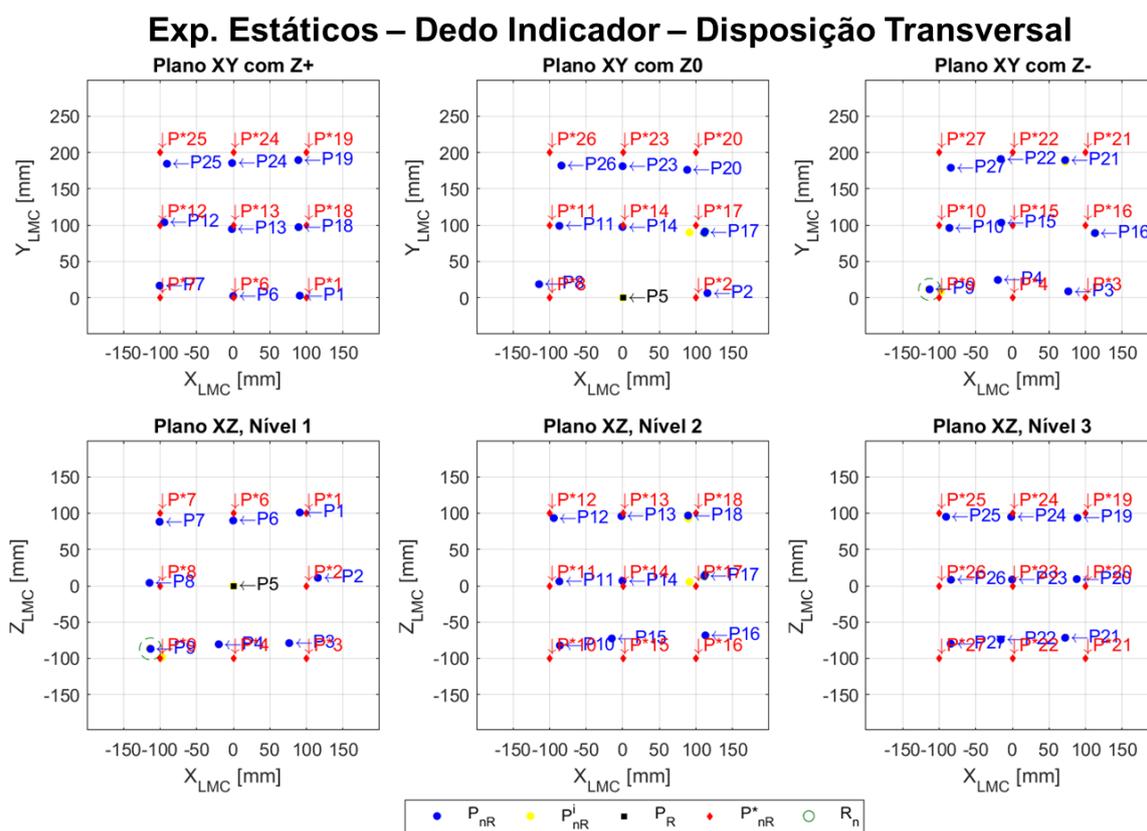


Figura A.3 – EEST – Posições relativas do dedo indicador na disposição transversal.

Exp. Estáticos – Dedo Indicador – Disposição Longitudinal

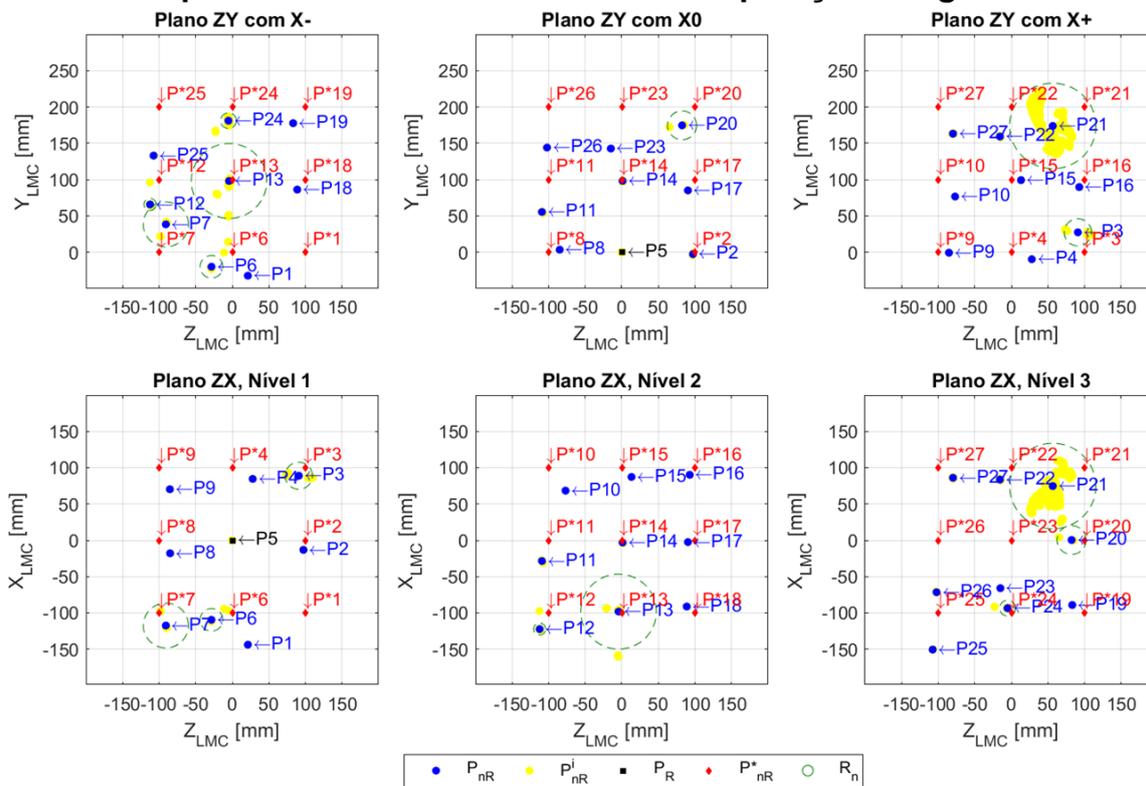


Figura A.4 – EEST – Posições relativas do dedo indicador na disposição longitudinal.

Na Tabela A.2 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EEST para o dedo indicador.

Tabela A.2 - Resultados dos EEST para o dedo indicador.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	9,52	0,06	100,00	1	P_1	95,70	0,62	100,00
	P_2	20,13	0,16	100,00		P_2	13,70	0,94	100,00
	P_3	32,74	0,36	100,00		P_3	30,85	18,67	100,00
	P_4	36,93	0,31	100,00		P_4	33,35	0,50	100,00
	P_5	-	0,06	100,00		P_5	-	0,55	100,00
	P_6	10,37	0,10	100,00		P_6	36,07	15,49	100,00
	P_7	20,34	0,29	100,00		P_7	43,12	30,85	100,00
	P_8	23,87	0,18	100,00		P_8	23,64	0,12	100,00
	P_9	21,78	15,00	100,00		P_9	33,11	0,50	100,00
Média	21,96	1,83	100,00	Média	38,69	7,58	100,00		
2	P_{10}	22,86	0,40	100,00	2	P_{10}	45,55	0,32	100,00
	P_{11}	14,63	0,23	100,00		P_{11}	53,71	2,08	100,00
	P_{12}	9,60	0,13	100,00		P_{12}	42,70	8,29	100,00
	P_{13}	7,11	0,08	100,00		P_{13}	5,08	51,64	100,00
	P_{14}	7,31	0,13	100,00		P_{14}	3,69	1,91	100,00
	P_{15}	31,51	0,30	100,00		P_{15}	18,39	0,33	100,00
	P_{16}	35,94	0,50	100,00		P_{16}	15,90	0,28	100,00
	P_{17}	20,82	5,84	100,00		P_{17}	17,87	0,43	100,00
	P_{18}	11,52	2,96	100,00		P_{18}	19,77	0,16	100,00
Média	17,92	1,17	100,00	Média	24,74	7,27	100,00		
3	P_{19}	16,44	0,22	100,00	3	P_{19}	29,94	0,47	98,50
	P_{20}	28,22	0,31	100,00		P_{20}	30,77	19,84	100,00
	P_{21}	41,08	1,47	100,00		P_{21}	56,57	58,95	100,00
	P_{22}	31,63	0,23	100,00		P_{22}	46,50	1,95	100,00
	P_{23}	20,71	0,29	100,00		P_{23}	88,61	0,30	100,00
	P_{24}	15,43	0,12	100,00		P_{24}	20,63	10,82	100,00
	P_{25}	18,78	0,11	100,00		P_{25}	84,22	0,70	100,00
	P_{26}	25,46	0,47	100,00		P_{26}	90,77	1,19	100,00
	P_{27}	33,15	0,24	100,00		P_{27}	44,18	1,32	100,00
Média	25,66	0,38	100,00	Média	54,69	10,62	99,83		
Média*	21,84	1,13	100,00	Média*	39,40	8,49	99,94		
Máximo**	41,08	15,00	100,00	Máximo**	95,70	58,95	100,00		

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

A.1.3. Resultados das medições do dedo médio

Os resultados para as medições dos EEST transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.5 e Fig. A.6, respectivamente.

Exp. Estáticos – Dedo Médio – Disposição Transversal

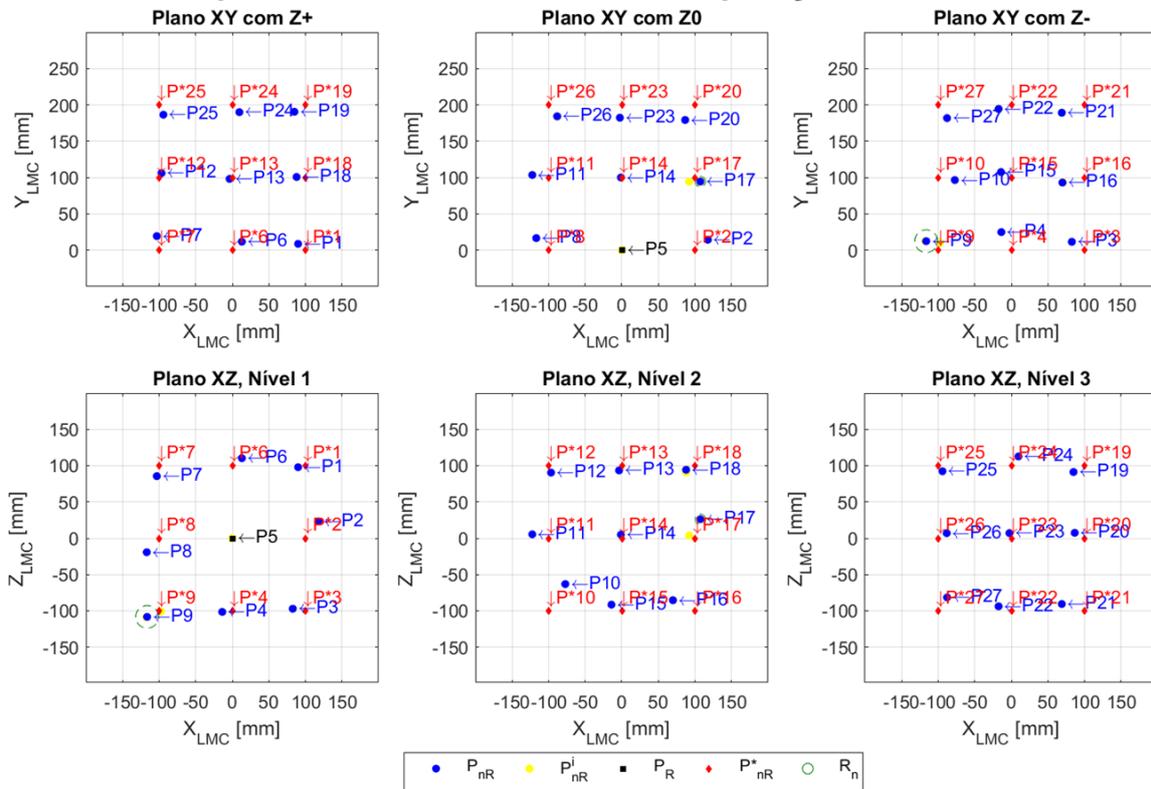


Figura A.5 – EEST – Posições relativas do dedo médio na disposição transversal.

Exp. Estáticos – Dedo Médio – Disposição Longitudinal

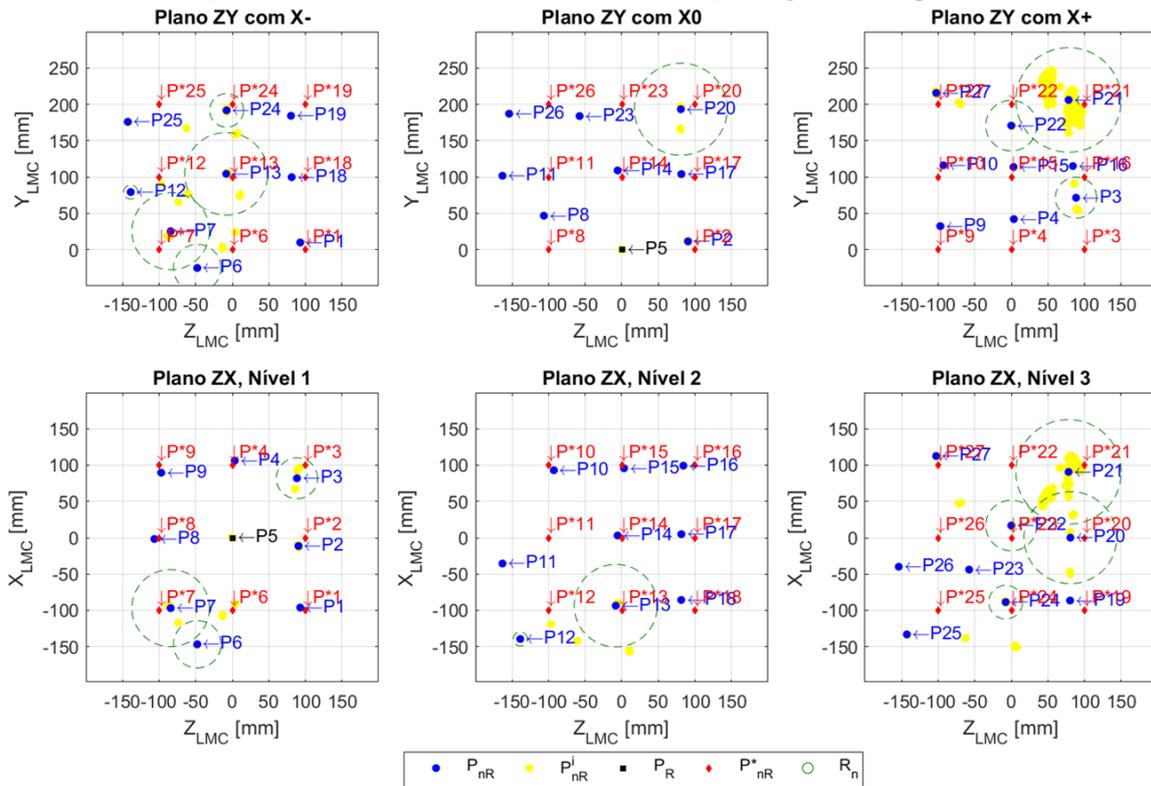


Figura A.6 – EEST – Posições relativas do dedo médio na disposição longitudinal.

Na Tabela A.3 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EEST para o dedo médio.

Tabela A.3 - Resultados dos EEST para o dedo médio.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	13,37	0,05	100,00	1	P_1	12,73	0,25	100,00
	P_2	32,53	0,18	100,00		P_2	18,68	3,13	100,00
	P_3	20,96	0,20	100,00		P_3	74,62	28,18	100,00
	P_4	28,40	0,26	100,00		P_4	42,65	0,39	100,00
	P_5	-	0,09	100,00		P_5	-	0,64	100,00
	P_6	20,39	0,09	100,00		P_6	71,47	32,56	100,00
	P_7	24,32	0,38	100,00		P_7	30,01	53,05	100,00
	P_8	30,51	0,13	100,00		P_8	47,18	0,18	100,00
	P_9	22,12	15,61	100,00		P_9	34,08	0,94	100,00
Média	24,07	1,89	100,00	Média	41,43	13,26	100,00		
2	P_{10}	43,47	0,26	100,00	2	P_{10}	18,99	0,24	100,00
	P_{11}	23,33	0,22	100,00		P_{11}	72,46	0,36	100,00
	P_{12}	11,74	0,15	100,00		P_{12}	59,06	9,62	100,00
	P_{13}	7,70	0,11	100,00		P_{13}	11,37	56,84	100,00
	P_{14}	5,22	0,16	100,00		P_{14}	11,19	0,36	100,00
	P_{15}	18,19	0,43	100,00		P_{15}	14,77	0,40	100,00
	P_{16}	34,20	0,51	100,00		P_{16}	21,93	0,28	100,00
	P_{17}	27,83	7,07	100,00		P_{17}	19,64	0,58	100,00
	P_{18}	13,37	2,53	100,00		P_{18}	23,61	0,18	100,00
Média	20,56	1,27	100,00	Média	28,11	7,65	100,00		
3	P_{19}	19,77	0,23	100,00	3	P_{19}	28,56	0,38	98,50
	P_{20}	25,75	0,30	100,00		P_{20}	20,42	63,40	100,00
	P_{21}	34,17	0,36	100,00		P_{21}	24,41	72,04	100,00
	P_{22}	19,31	0,28	100,00		P_{22}	88,09	34,84	100,00
	P_{23}	19,11	0,27	100,00		P_{23}	74,22	0,46	100,00
	P_{24}	18,86	0,14	100,00		P_{24}	15,94	23,13	100,00
	P_{25}	16,57	0,10	100,00		P_{25}	59,22	1,41	100,00
	P_{26}	20,75	0,56	100,00		P_{26}	68,28	0,70	100,00
	P_{27}	28,60	0,22	100,00		P_{27}	20,37	2,22	100,00
Média	22,54	0,27	100,00	Média	44,39	22,06	99,83		
Média*	22,33	1,14	100,00	Média*	37,84	14,32	99,94		
Máximo**	43,47	15,61	100,00	Máximo**	88,09	72,04	100,00		

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

A.1.4. Resultados das medições do dedo anelar

Os resultados para as medições dos EEST transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.7 e Fig. A.8, respectivamente.

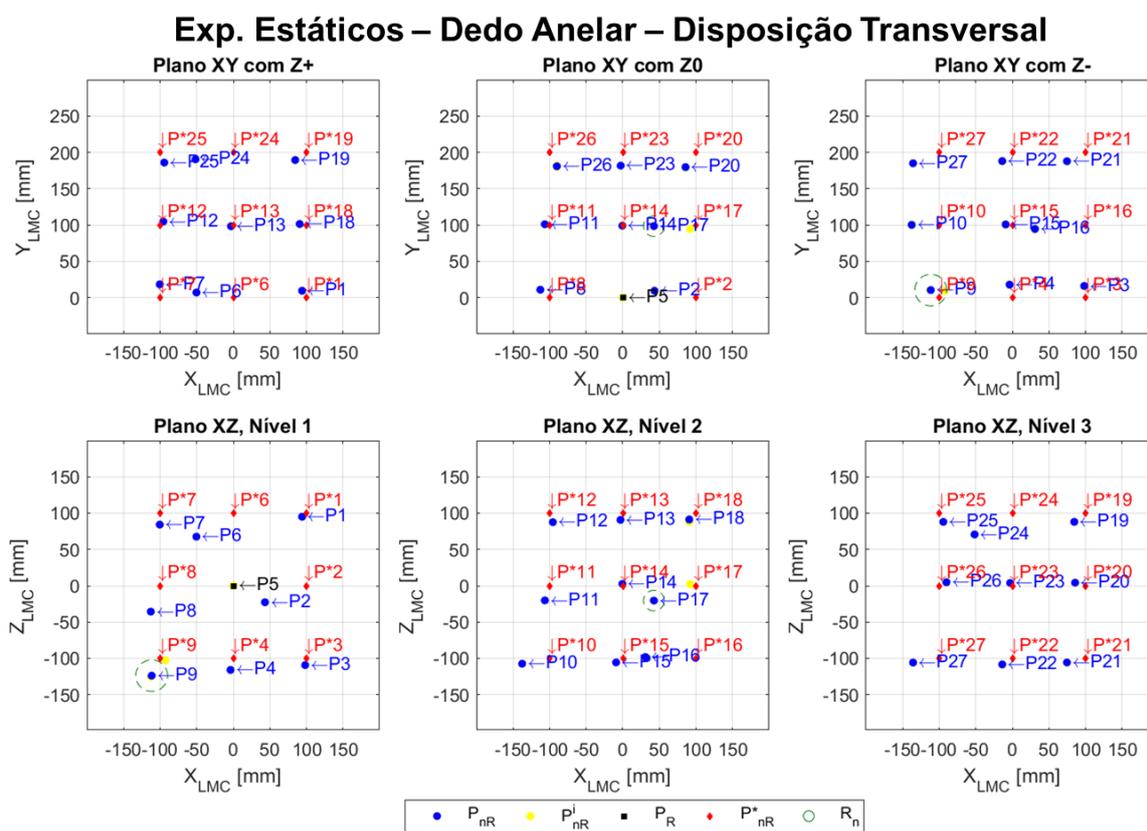


Figura A.7 – EEST – Posições relativas do dedo anelar na disposição transversal.

Exp. Estáticos – Dedo Anelar – Disposição Longitudinal

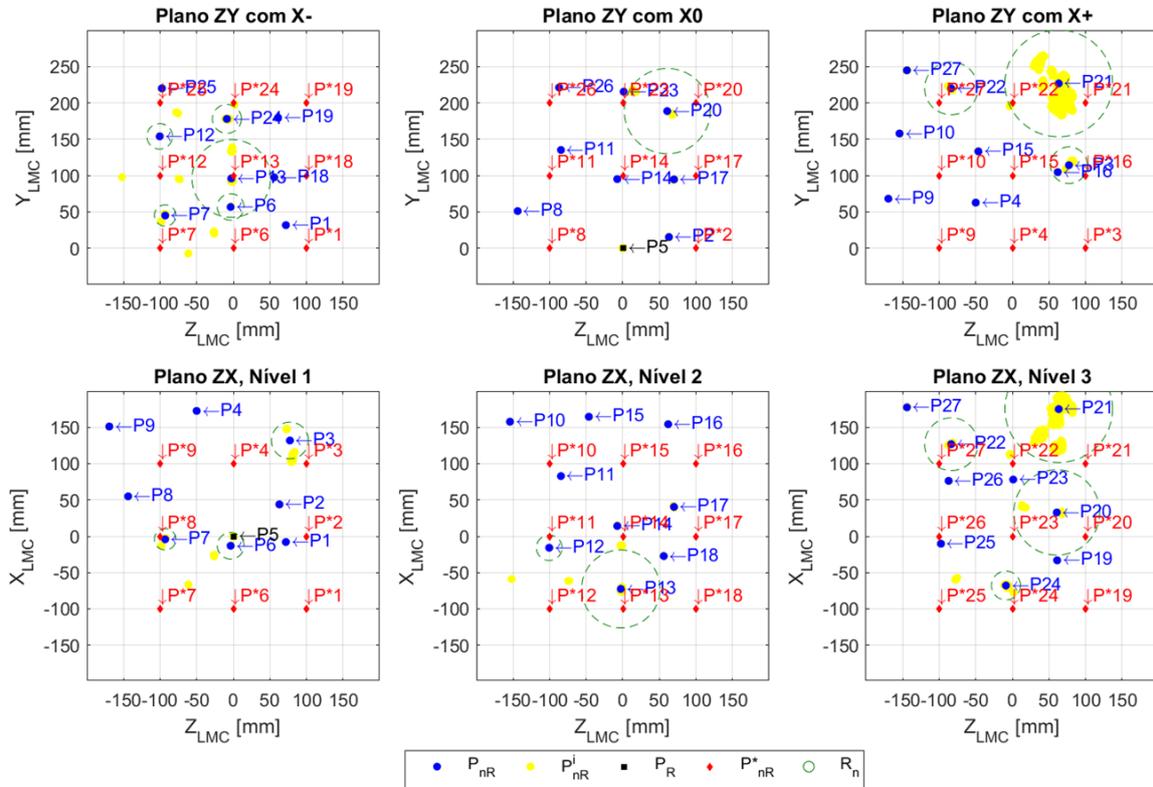


Figura A.8 – EEST – Posições relativas do dedo anelar na disposição longitudinal.

Na Tabela A.4 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EEST para o dedo anelar.

Tabela A.4 - Resultados dos EEST para o dedo anelar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	12,21	0,05	100,00	1	P_1	101,34	0,13	100,00
	P_2	61,79	0,09	100,00		P_2	59,42	0,94	100,00
	P_3	18,64	0,16	100,00		P_3	120,76	25,23	100,00
	P_4	24,19	0,25	100,00		P_4	108,28	0,33	100,00
	P_5	-	0,12	100,00		P_5	-	0,60	100,00
	P_6	60,32	0,10	100,00		P_6	103,82	18,23	100,00
	P_7	24,17	0,52	100,00		P_7	106,09	14,73	100,00
	P_8	39,39	0,10	100,00		P_8	86,90	0,16	100,00
	P_9	28,45	21,77	100,00		P_9	109,99	0,48	100,00
Média	33,64	2,57	100,00	Média	99,57	6,76	100,00		
2	P_{10}	38,32	0,45	100,00	2	P_{10}	98,14	0,63	100,00
	P_{11}	21,23	0,18	100,00		P_{11}	91,42	0,31	100,00
	P_{12}	14,01	0,18	100,00		P_{12}	100,02	17,53	100,00
	P_{13}	9,93	0,16	100,00		P_{13}	27,96	53,64	100,00
	P_{14}	2,79	0,21	100,00		P_{14}	16,82	0,61	100,00
	P_{15}	10,76	0,42	100,00		P_{15}	86,24	1,14	100,00
	P_{16}	69,34	0,54	100,00		P_{16}	66,43	0,80	100,00
	P_{17}	60,99	14,16	100,00		P_{17}	50,69	1,64	100,00
	P_{18}	12,75	2,18	100,00		P_{18}	85,04	1,24	100,00
Média	26,68	2,05	100,00	Média	69,19	8,61	100,00		
3	P_{19}	22,14	0,21	100,00	3	P_{19}	79,93	0,37	98,50
	P_{20}	25,14	0,56	100,00		P_{20}	52,40	58,76	100,00
	P_{21}	28,67	0,39	100,00		P_{21}	87,83	73,57	100,00
	P_{22}	20,11	0,46	100,00		P_{22}	90,06	36,32	100,00
	P_{23}	18,83	0,23	100,00		P_{23}	79,72	0,31	100,00
	P_{24}	60,12	0,13	100,00		P_{24}	39,93	19,83	100,00
	P_{25}	19,31	0,12	100,00		P_{25}	92,04	0,77	100,00
	P_{26}	22,01	1,31	100,00		P_{26}	80,31	0,79	100,00
	P_{27}	39,18	0,24	100,00		P_{27}	99,98	0,95	100,00
Média	28,39	0,41	100,00	Média	78,02	21,30	99,83		
Média*	29,42	1,68	100,00	Média*	81,60	12,22	99,94		
Máximo**	69,34	21,77	100,00	Máximo**	120,76	73,57	100,00		

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

A.1.5. Resultados das medições do dedo mínimo

Os resultados para as medições dos EEST transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.9 e Fig. A.10, respectivamente.

Exp. Estáticos – Dedo Mínimo – Disposição Transversal

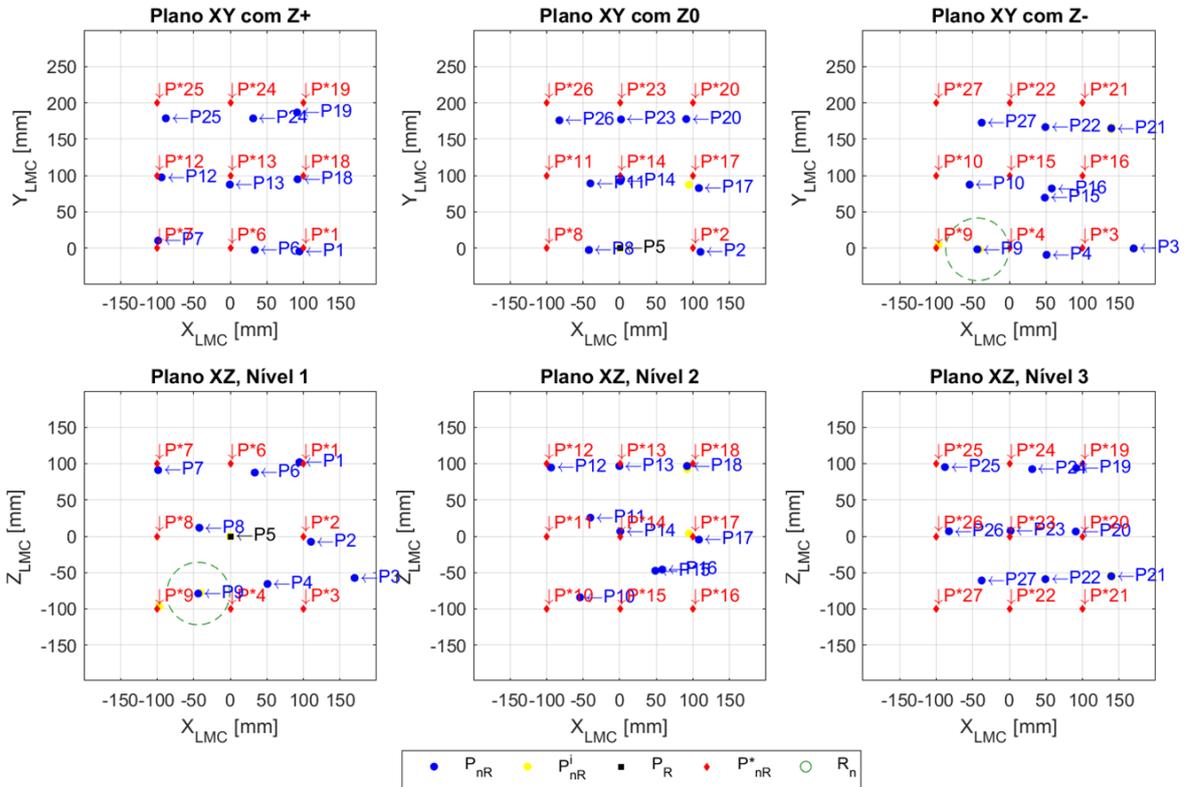


Figura A.9 – EEST – Posições relativas do dedo mínimo na disposição transversal.

Exp. Estáticos – Dedo Mínimo – Disposição Longitudinal

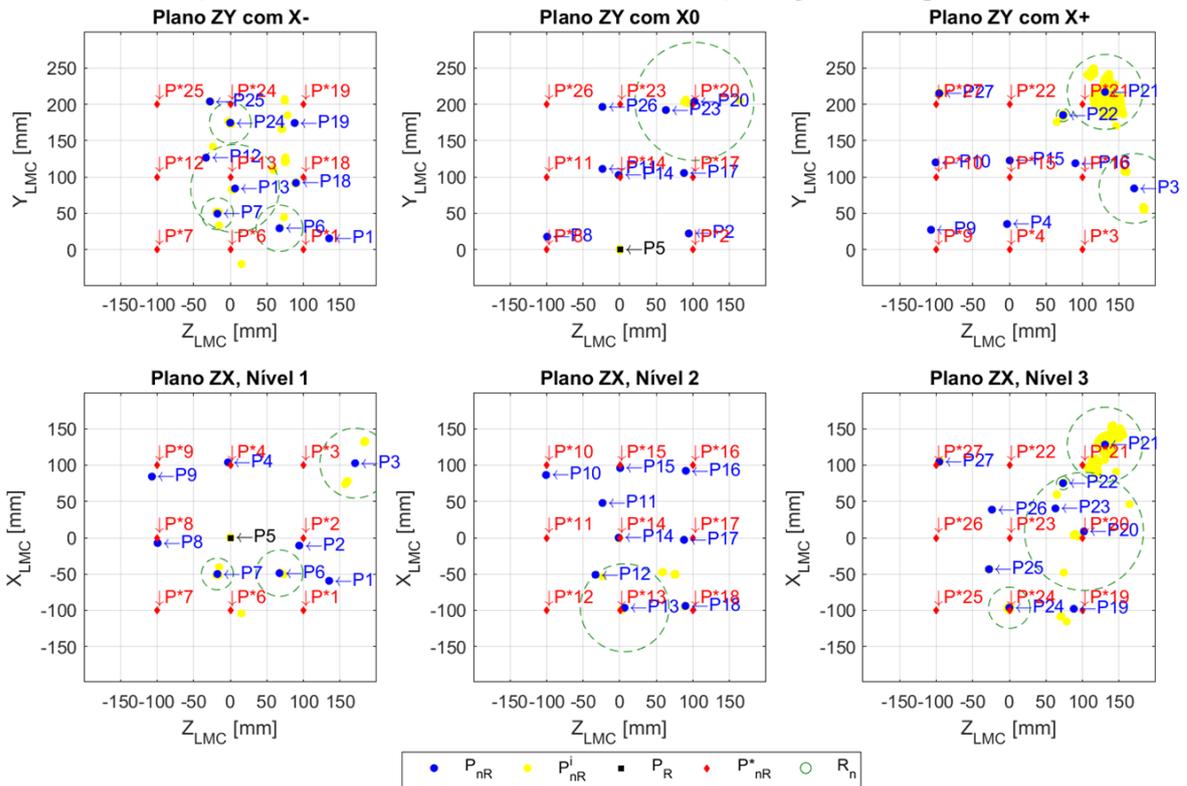


Figura A.10 – EEST – Posições relativas do dedo mínimo na disposição longitudinal.

Na Tabela A.5 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EEST para o dedo mínimo.

Tabela A.5 - Resultados dos EEST para o dedo mínimo.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	Nível	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
1	P_1	7,44	0,07	100,00	1	P_1	55,96	0,17	100,00
	P_2	13,81	0,11	100,00		P_2	25,30	0,43	100,00
	P_3	81,92	0,69	100,00		P_3	109,97	48,09	100,00
	P_4	62,08	0,49	100,00		P_4	35,49	0,13	100,00
	P_5	-	0,08	100,00		P_5	-	0,87	100,00
	P_6	35,81	0,10	100,00		P_6	89,52	31,93	100,00
	P_7	13,65	0,26	100,00		P_7	108,33	21,79	100,00
	P_8	58,99	0,16	100,00		P_8	19,17	0,30	100,00
	P_9	60,05	43,04	100,00		P_9	32,31	0,23	100,00
	Média	41,72	5,00	100,00		Média	59,51	11,55	100,00
2	P_{10}	50,02	0,31	100,00	2	P_{10}	24,24	0,28	100,00
	P_{11}	65,96	0,20	100,00		P_{11}	90,79	0,25	100,00
	P_{12}	8,46	0,12	100,00		P_{12}	87,02	3,68	100,00
	P_{13}	12,95	0,09	100,00		P_{13}	17,55	60,59	100,00
	P_{14}	10,35	0,08	100,00		P_{14}	3,06	0,74	100,00
	P_{15}	77,77	0,48	100,00		P_{15}	23,04	0,38	100,00
	P_{16}	70,77	0,44	100,00		P_{16}	22,64	0,24	100,00
	P_{17}	19,71	4,34	100,00		P_{17}	13,68	0,55	100,00
	P_{18}	10,09	3,29	100,00		P_{18}	14,48	1,56	100,00
	Média	36,23	1,04	100,00		Média	32,94	7,59	100,00
3	P_{19}	16,82	0,15	100,00	3	P_{19}	28,35	0,42	98,50
	P_{20}	24,97	0,28	100,00		P_{20}	9,81	81,32	100,00
	P_{21}	69,20	1,92	100,00		P_{21}	45,08	51,60	100,00
	P_{22}	72,20	0,51	100,00		P_{22}	78,95	9,01	100,00
	P_{23}	24,10	0,31	100,00		P_{23}	75,21	0,54	100,00
	P_{24}	38,70	0,10	100,00		P_{24}	25,60	28,34	100,00
	P_{25}	24,85	0,15	100,00		P_{25}	91,89	1,26	100,00
	P_{26}	30,44	0,43	100,00		P_{26}	85,59	0,43	100,00
	P_{27}	78,38	0,23	100,00		P_{27}	16,36	1,58	100,00
	Média	42,18	0,45	100,00		Média	50,76	19,39	99,83
	Média*	39,98	2,16	100,00		Média*	47,28	12,84	99,94
	Máximo**	81,92	43,04	100,00		Máximo**	109,97	81,32	100,00

* Valores médios globais; ** Valores máximos globais.

A.1.6. Conclusões sobre os experimentos estáticos para os dedos da mão

No geral, pode-se observar que os EEST na disposição transversal obtiveram valores de erro e repetibilidade menores que os experimentos longitudinais.

Também é possível verificar que os maiores erros foram observados nas posições medidas no nível 3.

O dedo polegar obteve um menor erro e repetibilidade média quando comparado aos outros dedos.

A.2. Experimentos de Deslocamento Linear para os Dedos da Mão

Neste tópico, são apresentados os resultados dos experimentos de deslocamento linear.

A.2.1. Resultados das medições do polegar

Os resultados para as medições dos EDL Laterais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.11.

Exp. Deslocamento Linear – Lateral – Polegar

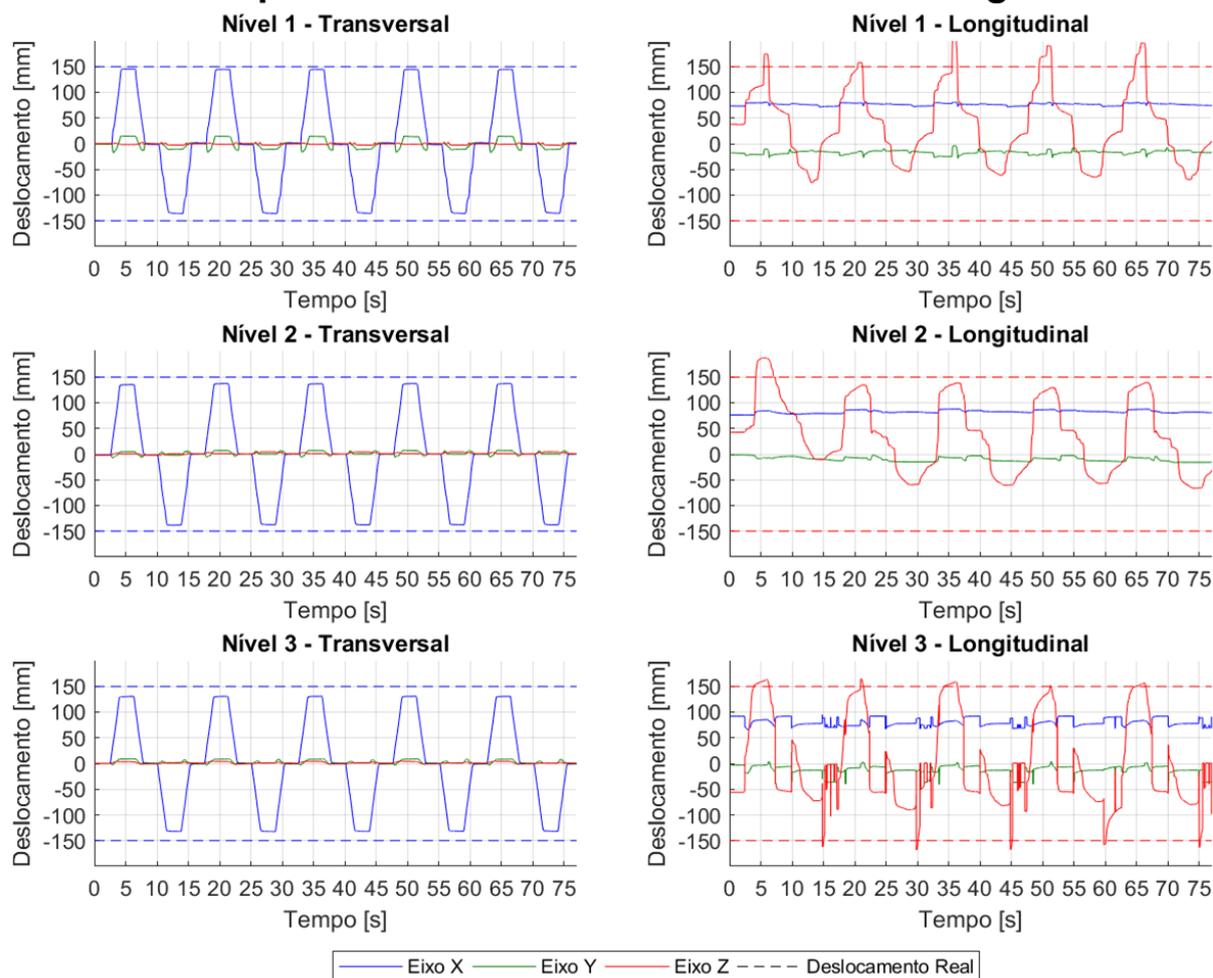


Figura A.11 – EDL Lateral – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.6 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Laterais para o polegar.

Tabela A.6 - Resultados dos EDL Laterais para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{L1R}	-	2,42		P_{L1R}	-	83,51	
P_{L1A}	15,34	1,34	100,00	P_{L1A}	49,17	93,53	100,00
P_{L1B}	18,83	1,34		P_{L1B}	63,52	45,01	
P_{L2R}	-	3,66		P_{L2R}	-	98,63	
P_{L2A}	15,07	3,44	100,00	P_{L2A}	62,02	73,14	100,00
P_{L2B}	13,10	4,67		P_{L2B}	57,62	53,60	
P_{L3R}	-	2,50		P_{L3R}	-	136,21	
P_{L3A}	21,52	0,89	100,00	P_{L3A}	40,89	153,82	100,00
P_{L3B}	18,32	1,07		P_{L3B}	67,80	80,85	
Média	17,03	2,37	100,00	Média	56,84	90,92	100,00
Máximo	21,52	4,67	100,00	Máximo	67,80	153,82	100,00

Os resultados para as medições dos EDL Verticais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.12.

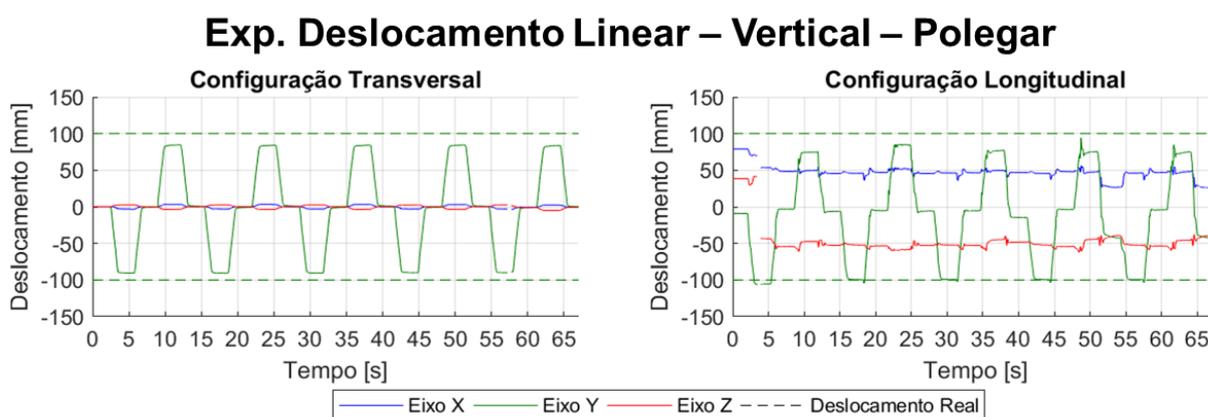


Figura A.12 – EDL Vertical – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.7 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Verticais para o polegar.

Tabela A.7 - Resultados dos EDL Verticais para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	2,30		P_{VR}	-	88,84	
P_{VA}	10,63	1,07	99,21	P_{VA}	13,92	55,47	99,25
P_{VB}	16,91	1,94		P_{VB}	12,88	17,35	
Média	13,77	1,77	99,21	Média	13,40	53,89	99,25
Máximo	16,91	2,30	99,21	Máximo	13,92	88,84	99,25

Os resultados para as medições dos EDL Frontais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.13.

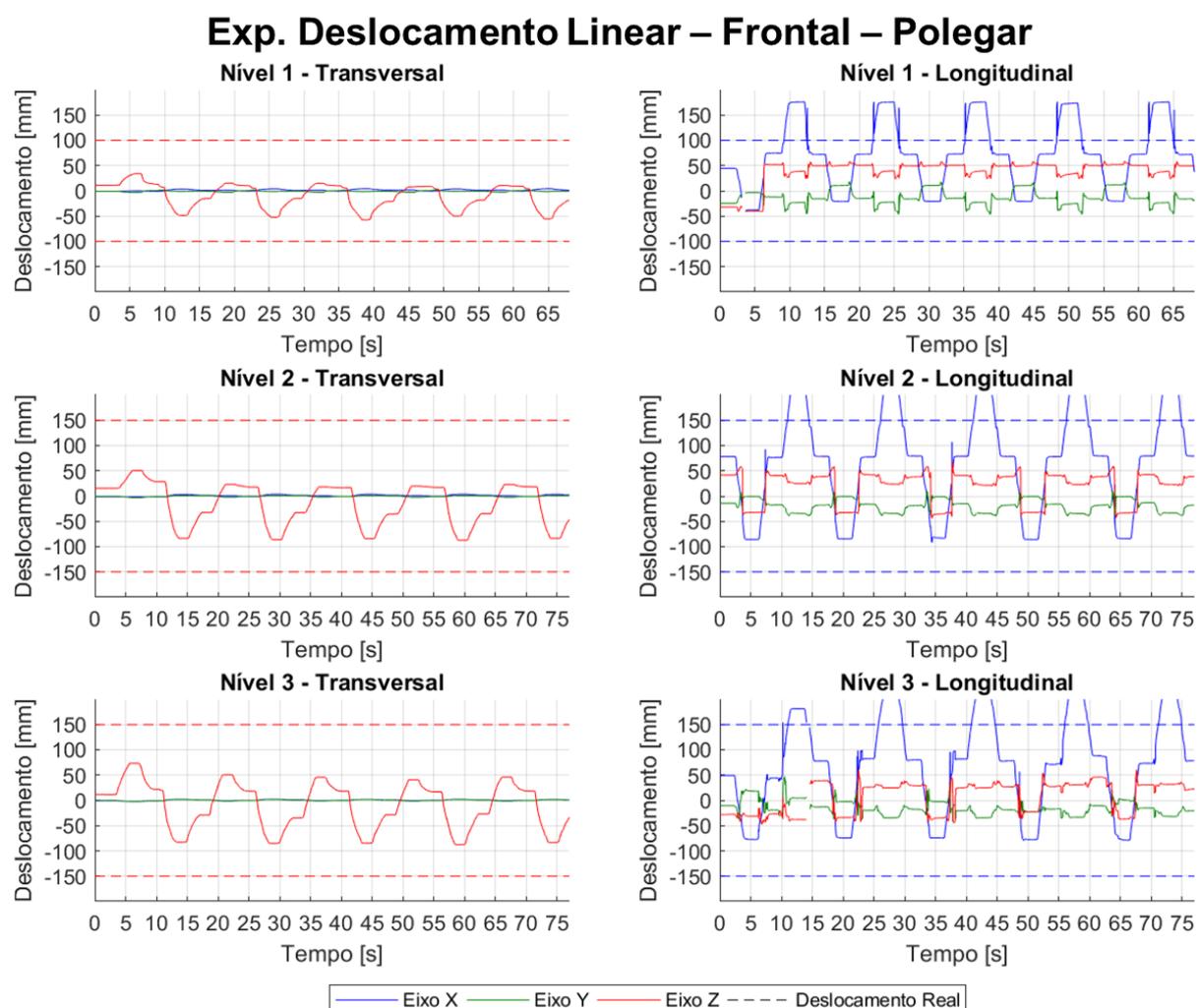


Figura A.13 – EDL Frontal – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.8 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Frontais para o polegar.

Tabela A.8 - Resultados dos EDL Frontais para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	26,25		P_{F1R}	-	78,66	
P_{F1A}	83,79	24,68	100,00	P_{F1A}	26,34	96,29	99,27
P_{F1B}	47,75	7,35		P_{F1B}	10,78	7,62	
P_{F2R}	-	48,38		P_{F2R}	-	5,18	
P_{F2A}	123,19	31,36	100,00	P_{F2A}	76,31	6,51	100,00
P_{F2B}	65,34	3,06		P_{F2B}	30,29	2,98	
P_{F3R}	-	42,71		P_{F3R}	-	74,93	
P_{F3A}	98,80	30,53	100,00	P_{F3A}	51,33	36,86	99,36
P_{F3B}	65,34	4,22		P_{F3B}	20,75	84,12	
Média	80,70	24,28	100,00	Média	35,97	43,68	99,54
Máximo	123,19	48,38	100,00	Máximo	76,31	96,29	100,00

A.2.2. Resultados das medições do dedo indicador

Os resultados para as medições dos EDL Laterais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.14.

Exp. Deslocamento Linear – Lateral – Dedo Indicador

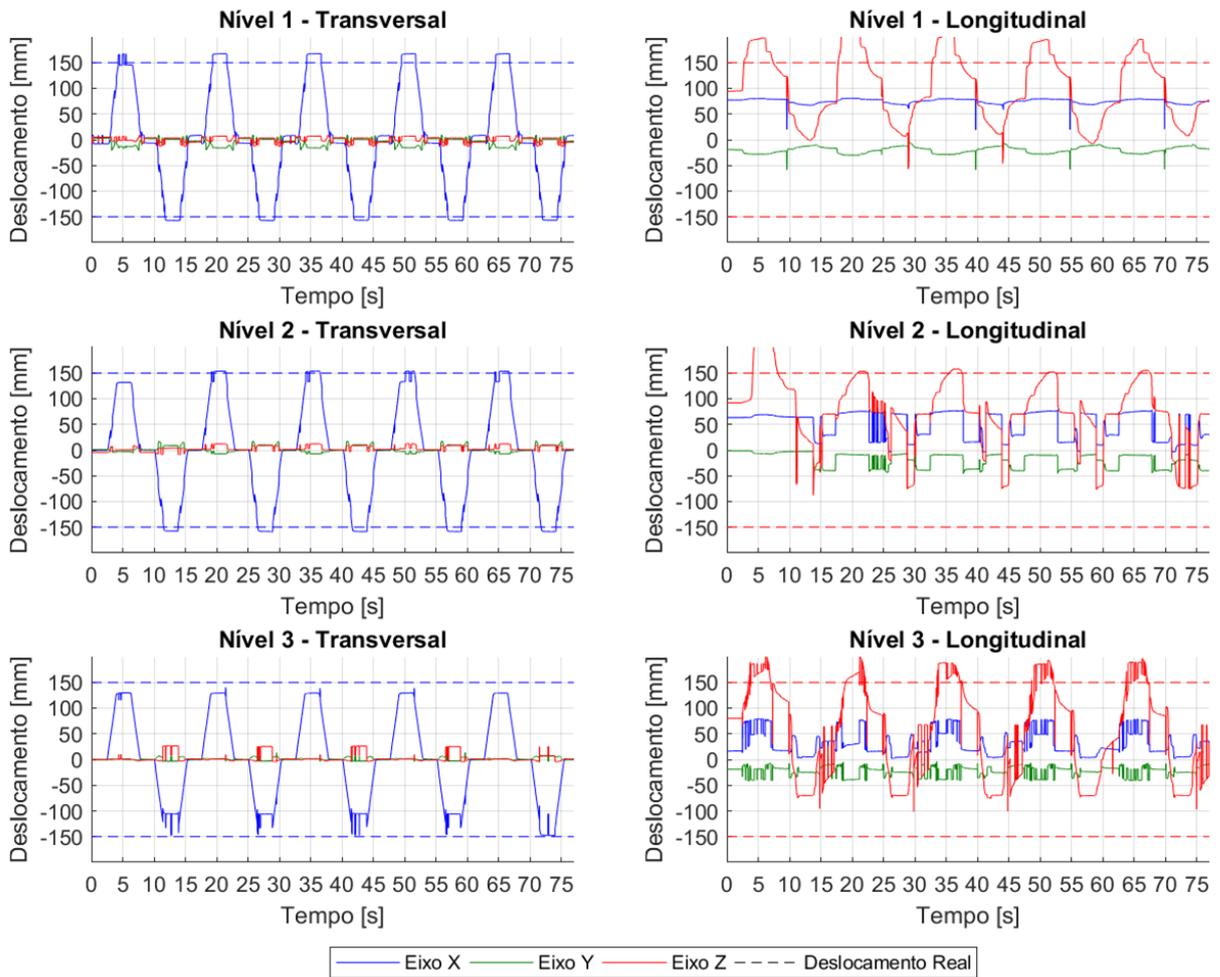


Figura A.14 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.9 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Laterais para o dedo indicador.

Tabela A.9 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{L1R}	-	12,99		P_{L1R}	-	82,63	
P_{L1A}	21,20	23,81	100,00	P_{L1A}	59,76	46,26	100,00
P_{L1B}	7,56	0,55		P_{L1B}	67,43	49,28	
P_{L2R}	0,00	5,77		P_{L2R}	-	125,19	
P_{L2A}	10,76	18,77	100,00	P_{L2A}	63,10	72,72	100,00
P_{L2B}	14,97	6,84		P_{L2B}	52,40	120,46	
P_{L3R}	0,00	1,91		P_{L3R}	-	127,72	
P_{L3A}	20,97	6,01	100,00	P_{L3A}	48,40	83,29	100,00
P_{L3B}	40,11	47,88		P_{L3B}	59,62	85,78	
Média	19,26	13,84	100,00	Média	58,45	88,15	100,00
Máximo	40,11	47,88	100,00	Máximo	67,43	127,72	100,00

Os resultados para as medições dos EDL Verticais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.15.

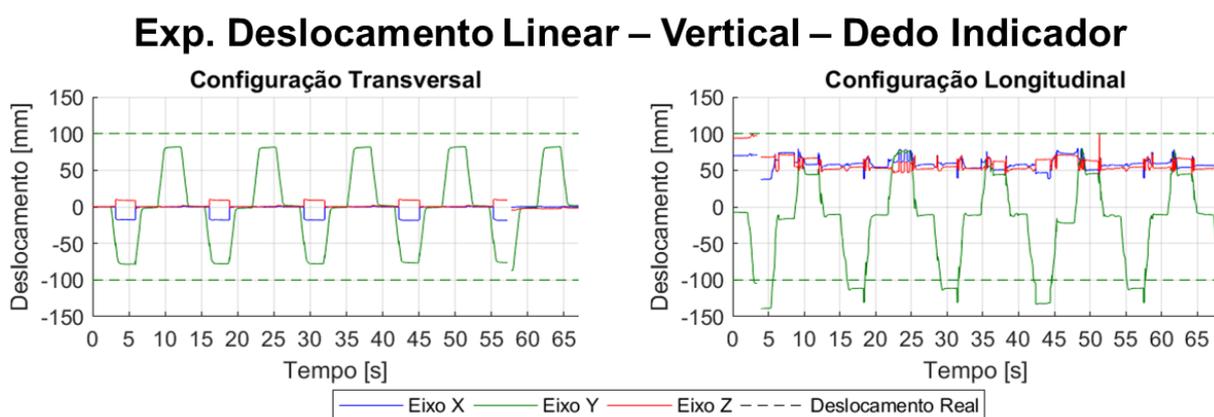


Figura A.15 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.10 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Verticais para o dedo indicador.

Tabela A.10 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	3,52		P_{VR}	-	37,82	
P_{VA}	29,98	11,31	99,21	P_{VA}	9,61	38,54	99,25
P_{VB}	18,73	3,14		P_{VB}	34,39	35,24	
Média	24,36	5,99	99,21	Média	22,00	37,20	99,25
Máximo	29,98	11,31	99,21	Máximo	34,39	38,54	99,25

Os resultados para as medições dos EDL Frontais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.16.

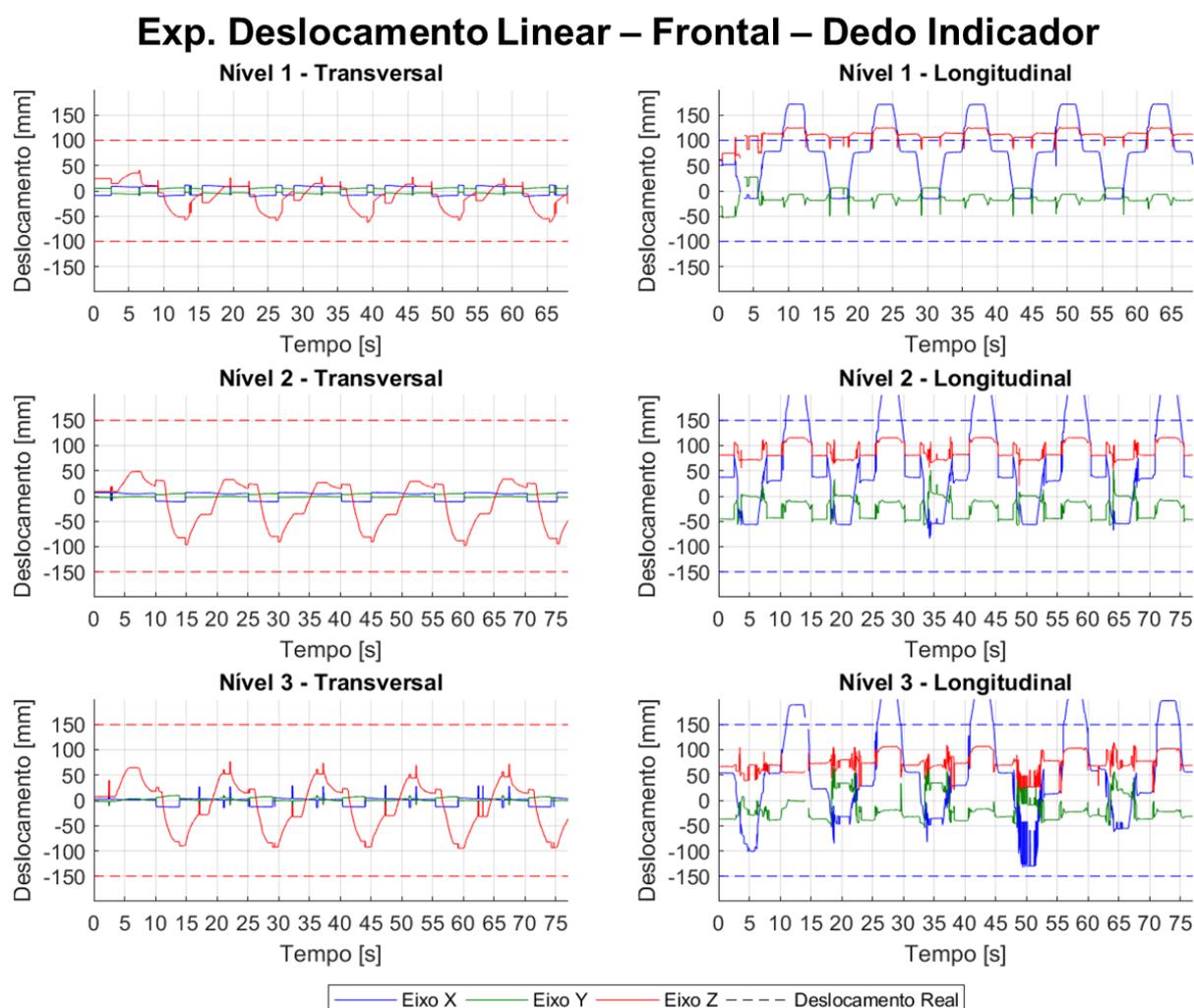


Figura A.16 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.11 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Frontais para o dedo indicador.

Tabela A.11 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	37,18		P_{F1R}	-	51,01	
P_{F1A}	83,25	28,03	100,00	P_{F1A}	32,73	25,31	99,27
P_{F1B}	46,21	24,13		P_{F1B}	21,77	2,95	
P_{F2R}	-	54,94		P_{F2R}	-	6,93	
P_{F2A}	116,05	20,44	100,00	P_{F2A}	76,86	19,49	100,00
P_{F2B}	65,05	23,26		P_{F2B}	57,53	3,70	
P_{F3R}	-	50,28		P_{F3R}	-	37,58	
P_{F3A}	95,91	31,60	100,00	P_{F3A}	67,50	101,46	99,36
P_{F3B}	61,55	16,55		P_{F3B}	32,70	57,65	
Média	78,00	31,82	100,00	Média	48,18	34,01	99,54
Máximo	116,05	54,94	100,00	Máximo	76,86	101,46	100,00

A.2.3. Resultados das medições do dedo médio

Os resultados para as medições dos EDL Laterais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.17.

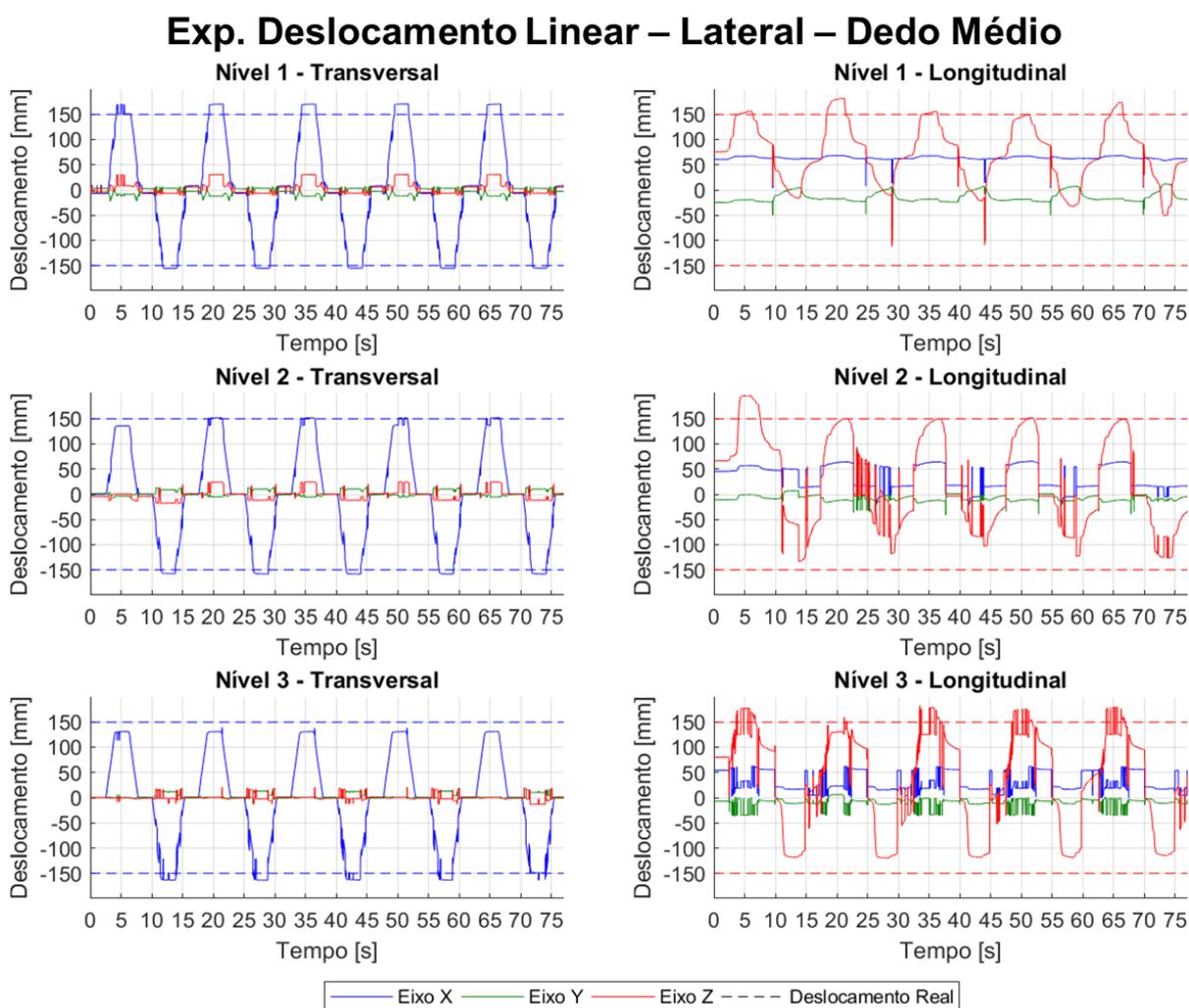


Figura A.17 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.12 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Laterais para o dedo médio.

Tabela A.12 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{L1R}	-	12,60		P_{L1R}	-	54,44	
P_{L1A}	33,80	30,52	100,00	P_{L1A}	70,34	41,92	100,00
P_{L1B}	8,80	0,44		P_{L1B}	68,40	85,46	
P_{L2R}	-	5,92		P_{L2R}	-	139,96	
P_{L2A}	16,21	21,35	100,00	P_{L2A}	48,13	68,63	100,00
P_{L2B}	18,04	7,00		P_{L2B}	27,31	89,50	
P_{L3R}	-	2,38		P_{L3R}	-	112,19	
P_{L3A}	19,23	6,52	100,00	P_{L3A}	73,41	129,65	100,00
P_{L3B}	14,98	30,62		P_{L3B}	14,38	123,44	
Média	18,51	13,04	100,00	Média	50,33	93,91	100,00
Máximo	33,80	30,62	100,00	Máximo	73,41	139,96	100,00

Os resultados para as medições dos EDL Verticais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.18.

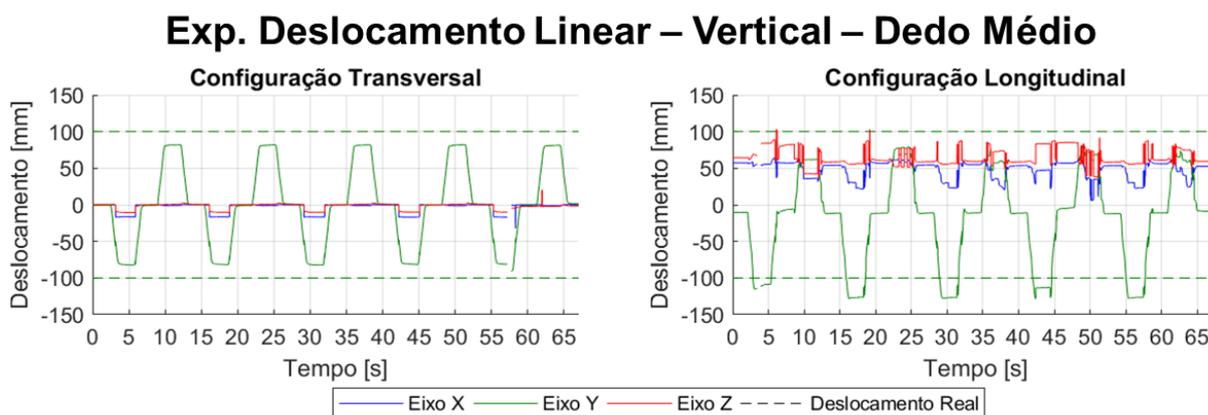


Figura A.18 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.13 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Verticais para o dedo médio.

Tabela A.13 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	2,88		P_{VR}	-	25,25	
P_{VA}	26,57	8,89	99,21	P_{VA}	23,10	36,02	99,25
P_{VB}	18,61	2,97		P_{VB}	27,57	35,74	
Média	22,59	4,91	99,21	Média	25,33	32,34	99,25
Máximo	26,57	8,89	99,21	Máximo	27,57	36,02	99,25

Os resultados para as medições dos EDL Frontais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.19.

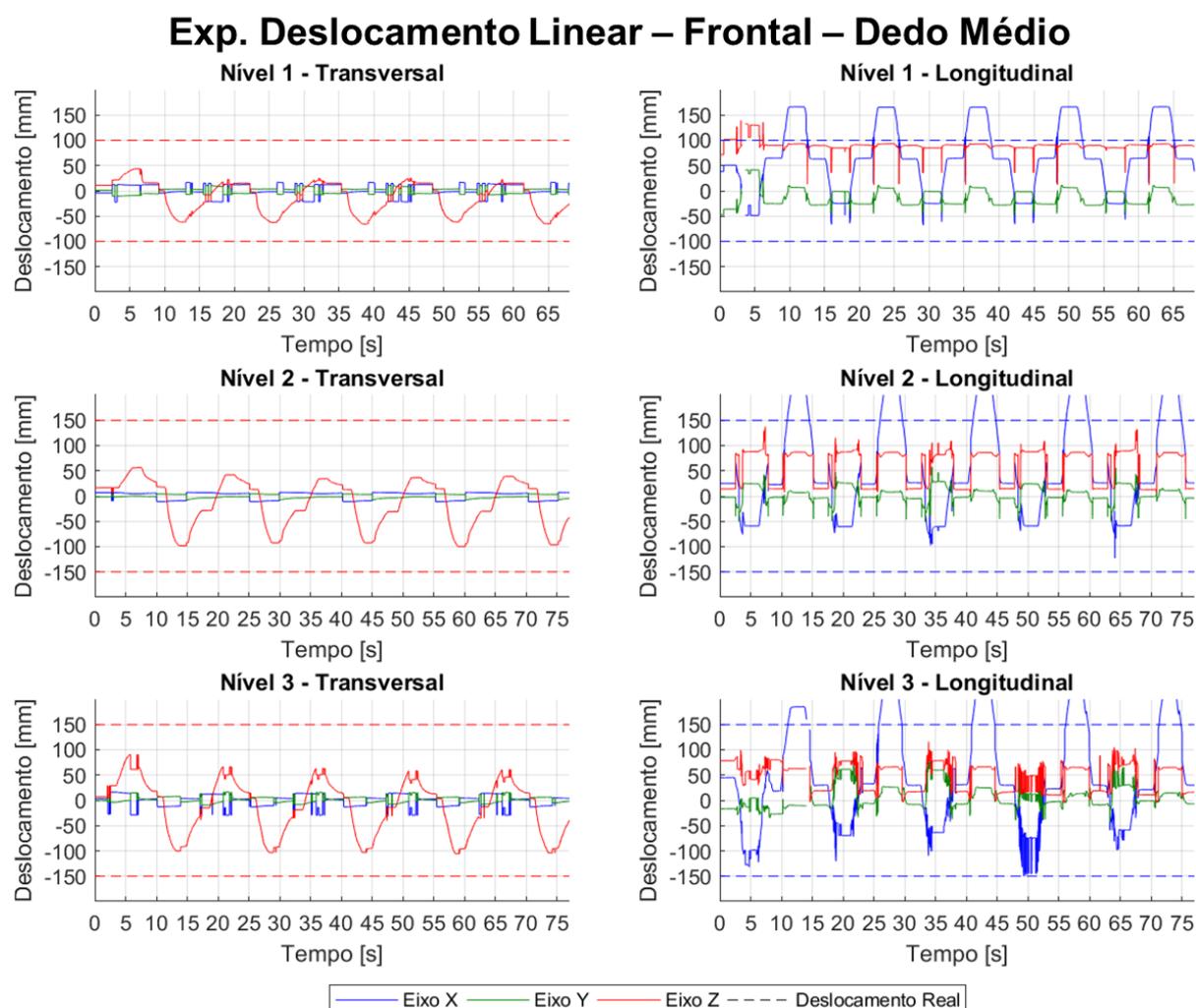


Figura A.19 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.14 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Frontais para o dedo médio.

Tabela A.14 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	44,27		P_{F1R}	-	23,87	
P_{F1A}	78,45	40,06	100,00	P_{F1A}	35,42	67,03	99,27
P_{F1B}	38,46	22,79		P_{F1B}	34,78	2,71	
P_{F2R}	-	40,76		P_{F2R}	-	3,41	
P_{F2A}	108,68	20,59	100,00	P_{F2A}	101,50	18,45	100,00
P_{F2B}	55,74	21,20		P_{F2B}	81,92	4,94	
P_{F3R}	-	48,66		P_{F3R}	-	72,92	
P_{F3A}	100,42	44,71	100,00	P_{F3A}	65,72	90,52	99,36
P_{F3B}	52,09	15,38		P_{F3B}	48,83	47,20	
Média	72,31	33,16	100,00	Média	61,36	36,78	99,54
Máximo	108,68	48,66	100,00	Máximo	101,50	90,52	100,00

A.2.4. Resultados das medições do dedo anelar

Os resultados para as medições dos EDL Laterais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.20.

Exp. Deslocamento Linear – Lateral – Dedo Anelar

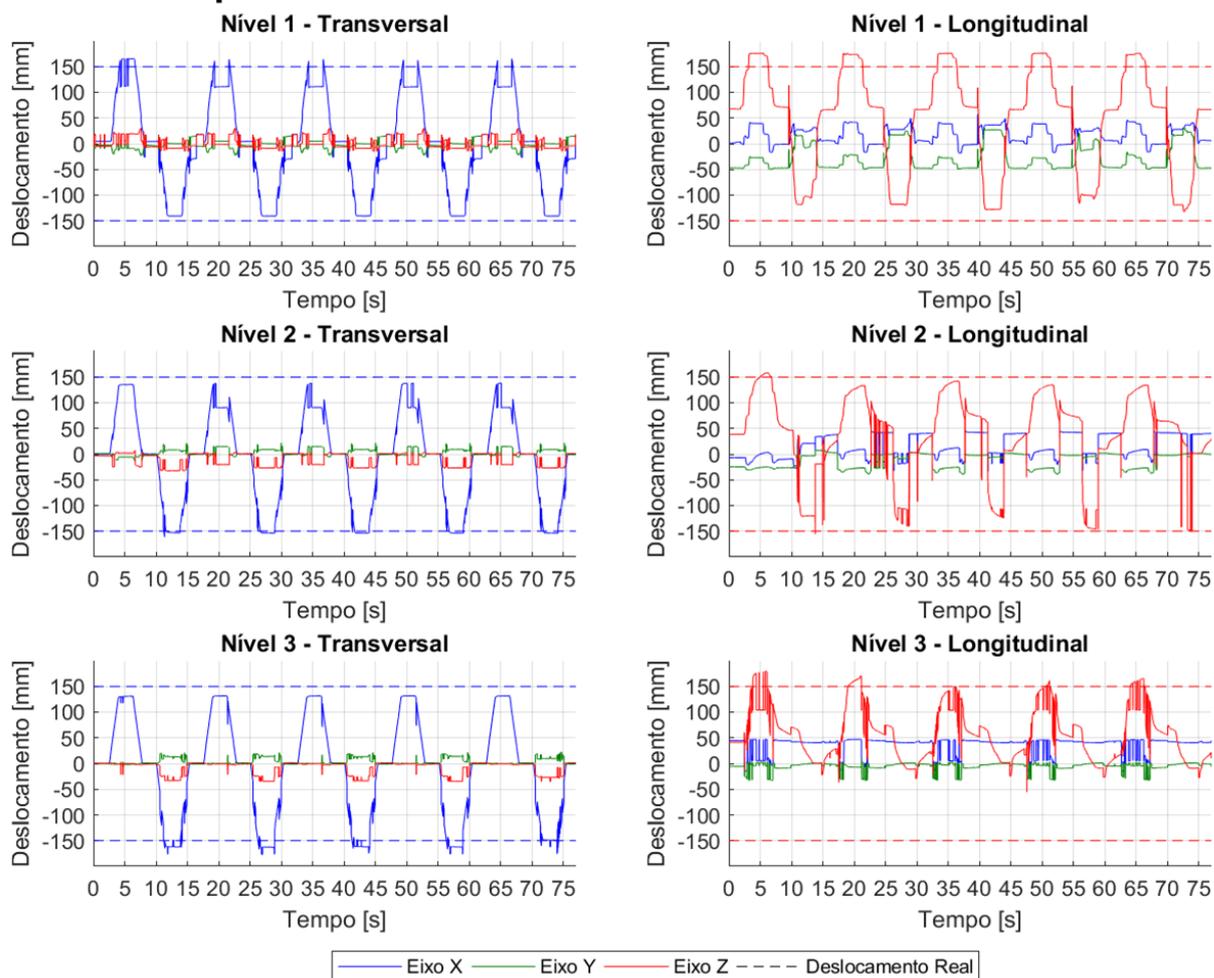


Figura A.20 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.15 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Laterais para o dedo anelar.

Tabela A.15 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{L1R}	-	50,41		P_{L1R}	-	180,47	
P_{L1A}	30,41	60,76	100,00	P_{L1A}	66,04	58,89	100,00
P_{L1B}	12,99	0,42		P_{L1B}	61,73	142,89	
P_{L2R}	-	4,24		P_{L2R}	-	121,82	
P_{L2A}	42,92	41,27	100,00	P_{L2A}	94,70	75,03	100,00
P_{L2B}	29,48	7,18		P_{L2B}	88,20	120,75	
P_{L3R}	-	2,85		P_{L3R}	-	77,71	
P_{L3A}	18,87	8,47	100,00	P_{L3A}	91,32	87,59	100,00
P_{L3B}	35,90	19,49		P_{L3B}	85,52	21,75	
Média	28,43	21,68	100,00	Média	81,25	98,54	100,00
Máximo	42,92	60,76	100,00	Máximo	94,70	180,47	100,00

Os resultados para as medições dos EDL Verticais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.21.

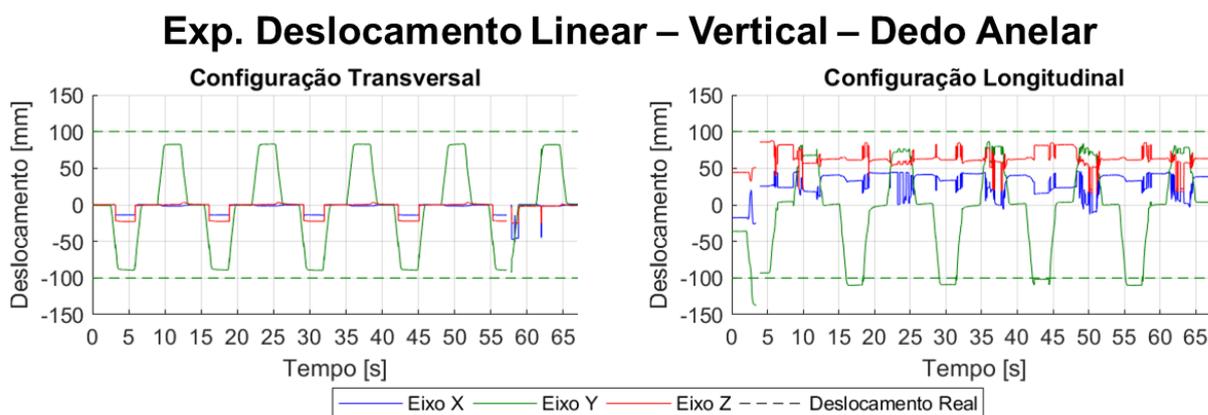


Figura A.21 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.16 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Verticais para o dedo anelar.

Tabela A.16 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	2,35		P_{VR}	-	63,22	
P_{VA}	28,38	12,38	99,21	P_{VA}	8,67	45,10	99,25
P_{VB}	17,52	2,34		P_{VB}	31,41	48,43	
Média	22,95	5,69	99,21	Média	20,04	52,25	99,25
Máximo	28,38	12,38	99,21	Máximo	31,41	63,22	99,25

Os resultados para as medições dos EDL Frontais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.22.

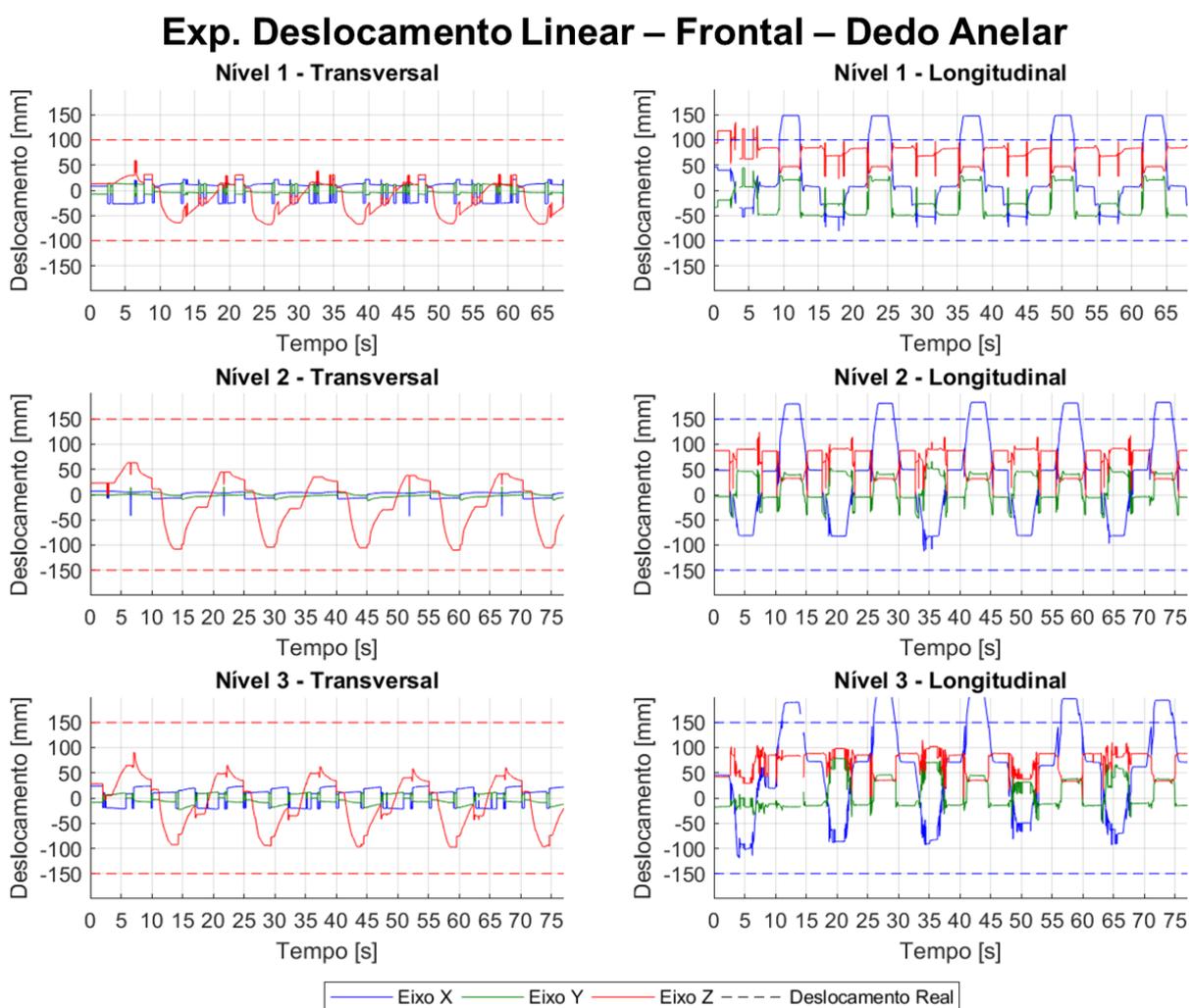


Figura A.22 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.17 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Frontais para o dedo anelar.

Tabela A.17 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	54,20		P_{F1R}	-	47,68	
P_{F1A}	81,33	48,95	100,00	P_{F1A}	51,36	56,44	99,27
P_{F1B}	35,29	45,55		P_{F1B}	86,18	1,90	
P_{F2R}	-	42,95		P_{F2R}	-	2,50	
P_{F2A}	106,07	34,88	100,00	P_{F2A}	55,70	22,33	100,00
P_{F2B}	45,81	15,50		P_{F2B}	73,53	3,45	
P_{F3R}	-	63,35		P_{F3R}	-	55,34	
P_{F3A}	99,24	42,92	100,00	P_{F3A}	58,21	87,70	99,36
P_{F3B}	62,75	46,97		P_{F3B}	59,74	80,75	
Média	71,75	43,92	100,00	Média	64,12	39,79	99,54
Máximo	106,07	63,35	100,00	Máximo	86,18	87,70	100,00

A.2.5. Resultados das medições do dedo mínimo

Os resultados para as medições dos EDL Laterais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.23.

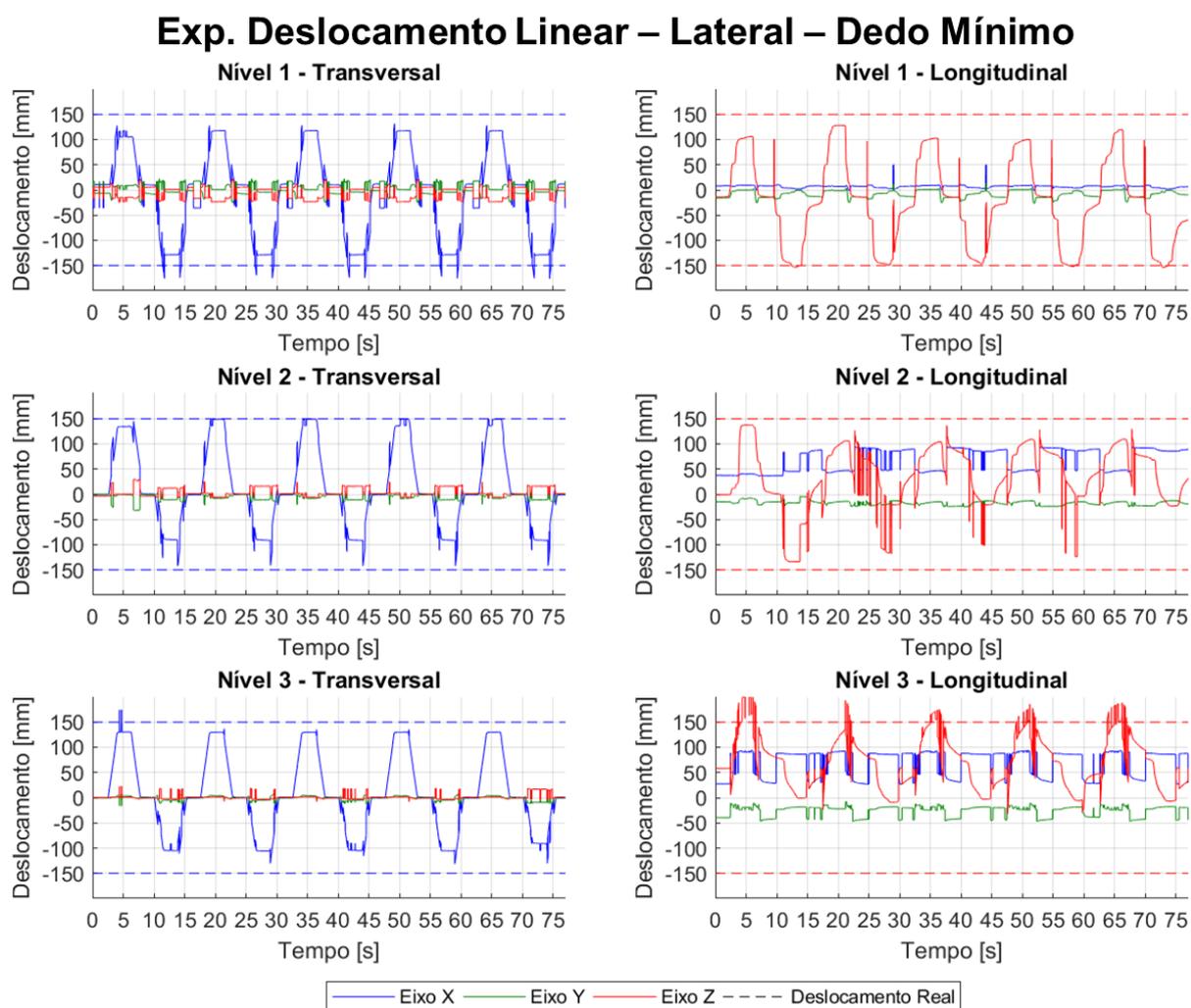


Figura A.23 – EDL Lateral – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.18 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Laterais para o dedo mínimo.

Tabela A.18 - Resultados dos EDL Laterais para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	E_{nR} [mm]	R_n [mm]	V [%]	P_n	E_{nR} [mm]	R_n [mm]	V [%]
P_{L1R}	-	57,97		P_{L1R}	-	106,63	
P_{L1A}	41,03	17,34	100,00	P_{L1A}	73,50	93,45	100,00
P_{L1B}	21,91	0,58		P_{L1B}	35,32	80,21	
P_{L2R}	-	4,55		P_{L2R}	-	95,05	
P_{L2A}	8,83	13,19	100,00	P_{L2A}	108,35	72,92	100,00
P_{L2B}	62,03	10,25		P_{L2B}	83,35	97,88	
P_{L3R}	-	2,14		P_{L3R}	-	71,95	
P_{L3A}	19,92	16,82	100,00	P_{L3A}	108,25	101,20	100,00
P_{L3B}	48,31	26,12		P_{L3B}	81,25	63,21	
Média	33,67	16,55	100,00	Média	81,67	86,94	100,00
Máximo	62,03	57,97	100,00	Máximo	108,35	106,63	100,00

Os resultados para as medições dos EDL Verticais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.24.

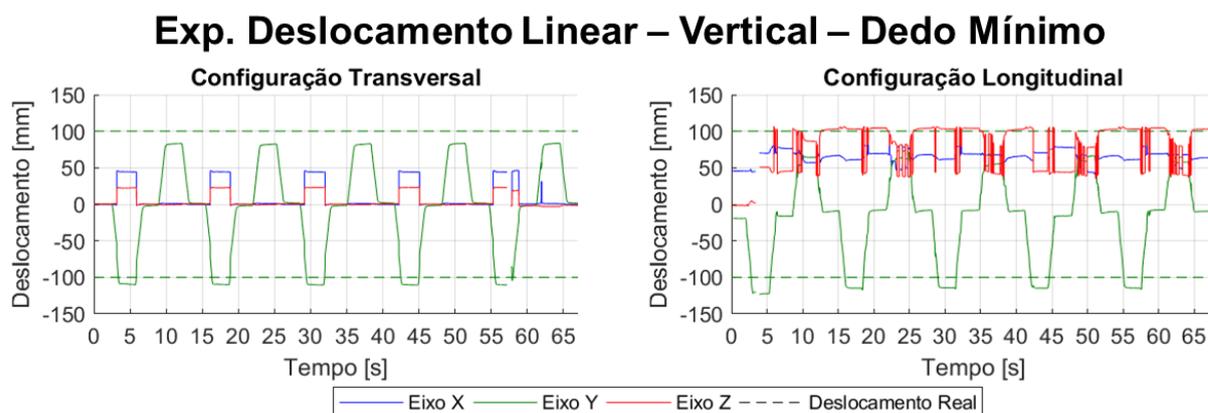


Figura A.24 – EDL Vertical – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.19 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Verticais para o dedo mínimo.

Tabela A.19 - Resultados dos EDL Verticais para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{VR}	-	3,67		P_{VR}	-	89,53	
P_{VA}	49,93	23,30	99,21	P_{VA}	5,81	63,71	99,25
P_{VB}	17,46	2,83		P_{VB}	31,70	40,45	
Média	33,69	9,94	99,21	Média	18,75	64,57	99,25
Máximo	49,93	23,30	99,21	Máximo	31,70	89,53	99,25

Os resultados para as medições dos EDL Frontais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.25.

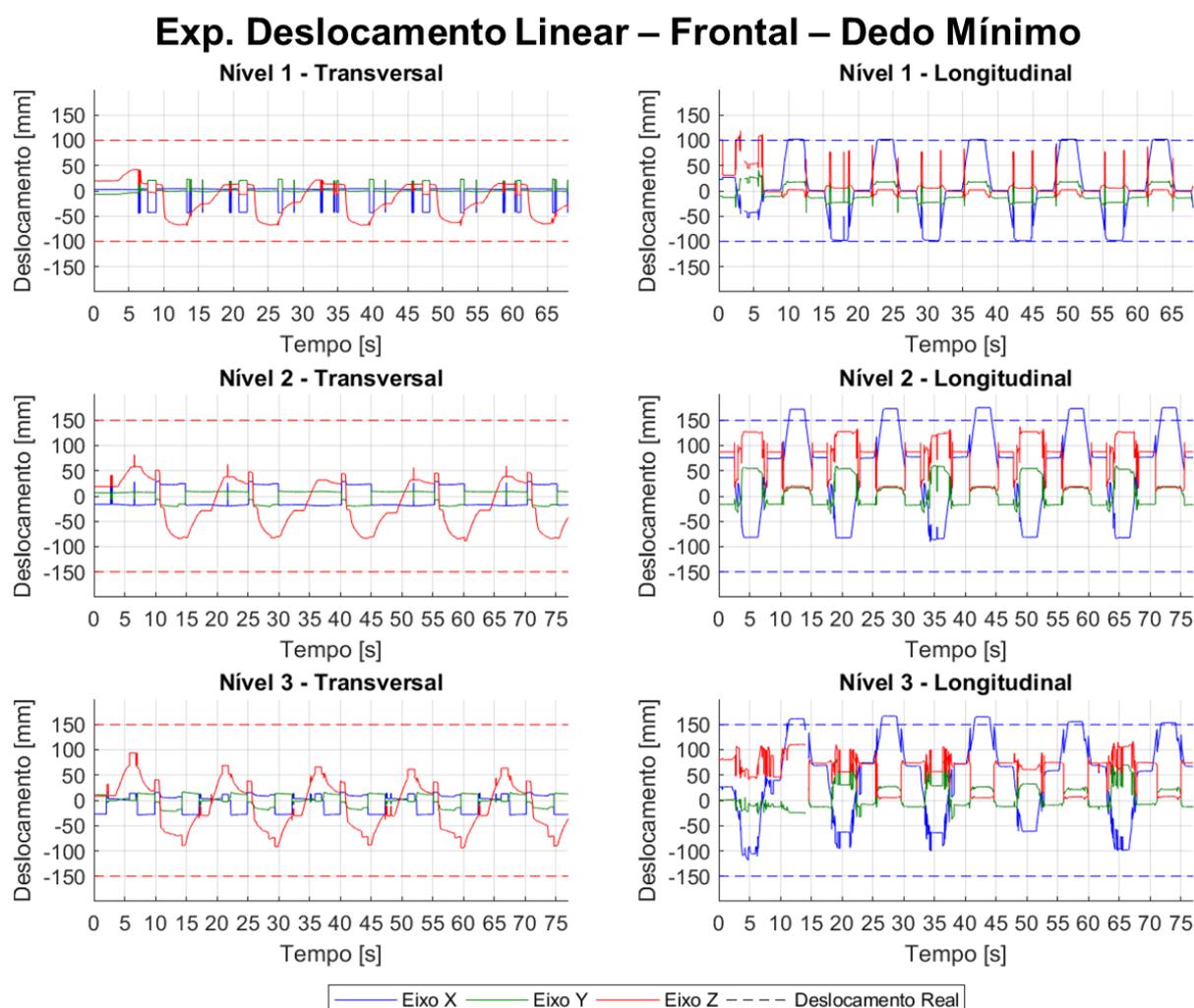


Figura A.25 – EDL Frontal – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.20 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDL Frontais para o dedo mínimo.

Tabela A.20 - Resultados dos EDL Frontais para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$	P_n	$E_{nR}[mm]$	$R_n[mm]$	$V[\%]$
P_{F1R}	-	51,32		P_{F1R}	-	58,24	
P_{F1A}	83,24	59,25	100,00	P_{F1A}	13,50	89,87	99,27
P_{F1B}	34,66	8,49		P_{F1B}	30,91	0,90	
P_{F2R}	-	66,84		P_{F2R}	-	2,70	
P_{F2A}	111,85	35,37	100,00	P_{F2A}	81,09	29,53	100,00
P_{F2B}	69,91	51,81		P_{F2B}	92,63	2,66	
P_{F3R}	-	58,18		P_{F3R}	-	52,32	
P_{F3A}	85,69	51,34	100,00	P_{F3A}	42,93	91,52	99,36
P_{F3B}	72,42	47,31		P_{F3B}	71,27	119,05	
Média	76,29	47,77	100,00	Média	55,39	49,64	99,54
Máximo	111,85	66,84	100,00	Máximo	92,63	119,05	100,00

A.2.6. Conclusões sobre os experimentos de deslocamento linear para os dedos da mão

A partir da análise dos resultados obtidos nos EDL para os dedos da mão, é possível verificar que os eixos X_{LMC} e Y_{LMC} possuem melhor qualidade de medida do que o eixo Z_{LMC} .

A.3. Experimentos de Deslocamento Angular para os Dedos da Mão

Neste tópico, são apresentados os resultados dos experimentos de deslocamento angular.

A.3.1. Resultados das medições do polegar

Os resultados para as medições dos EDA Laterais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.26.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Lateral – Polegar

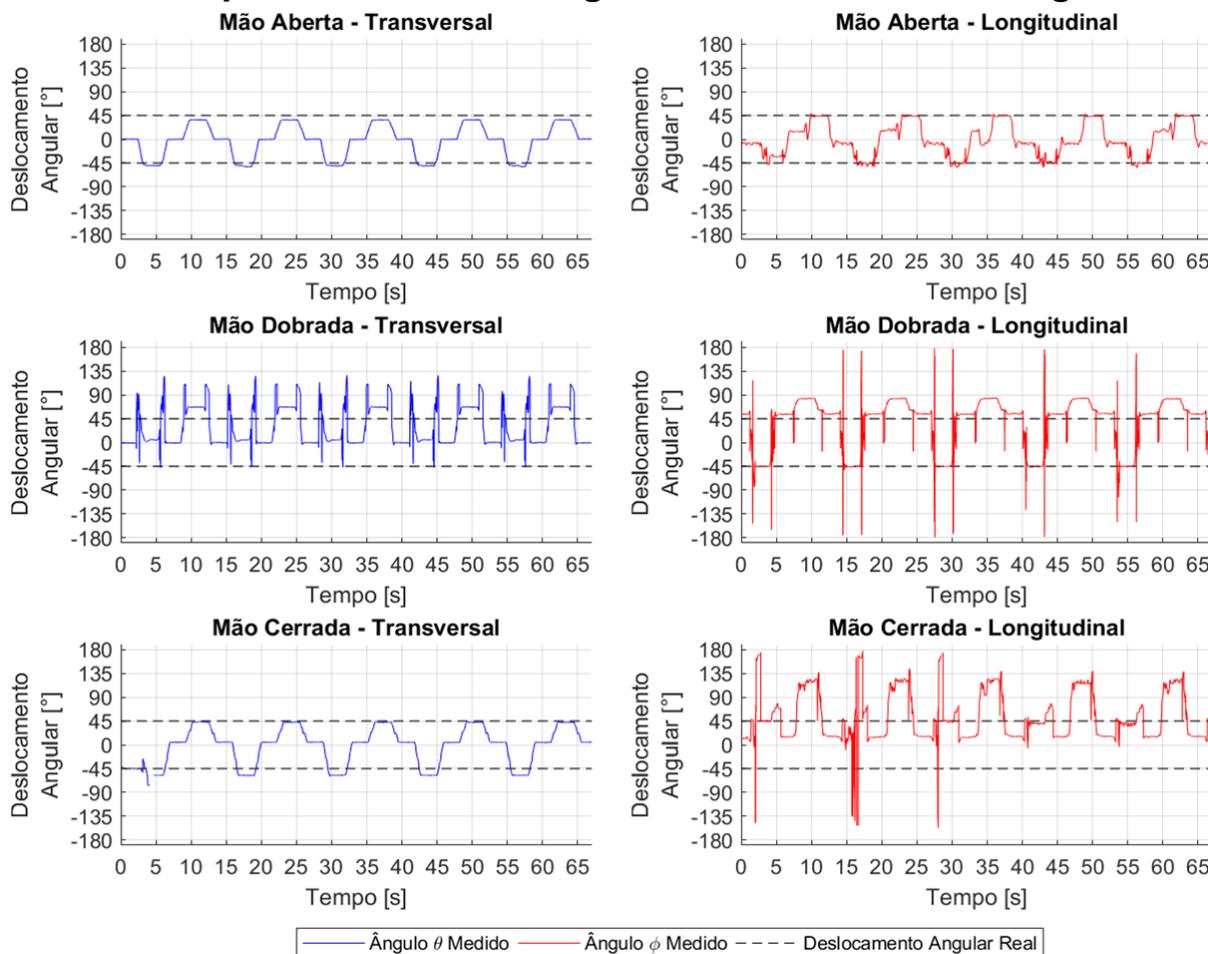


Figura A.26 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do polegar.

Na Tabela A.21 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Laterais para o polegar.

Tabela A.21 - Resultados dos EDA Lateral para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR}[^{\circ}]$	$R\theta_n[^{\circ}]$	$V[\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR}[^{\circ}]$	$R\phi_n[^{\circ}]$	$V[\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	0,66		ϕ_{LR}^{aberta}	-	22,87	
θ_{LA}^{aberta}	-5,25	2,19	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	2,29	18,86	100,00
θ_{LB}^{aberta}	-8,38	0,52		ϕ_{LB}^{aberta}	-1,28	1,89	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	19,51		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	3,84	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	49,22	3,03	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	-55,22	15,26	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	22,18	0,67		$\phi_{LB}^{dobrada}$	-16,35	0,96	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	44,55		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	3,58	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	-13,28	10,13	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	92,54	144,14	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	-2,12	1,07		$\phi_{LB}^{cerrada}$	56,63	20,52	
Média	-8,13	1,74	99,75	Média	13,10	25,77	100,00
Máximo*	22,65	6,76	100,00	Máximo	92,54	144,14	100,00

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Verticais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.27.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Vertical – Polegar

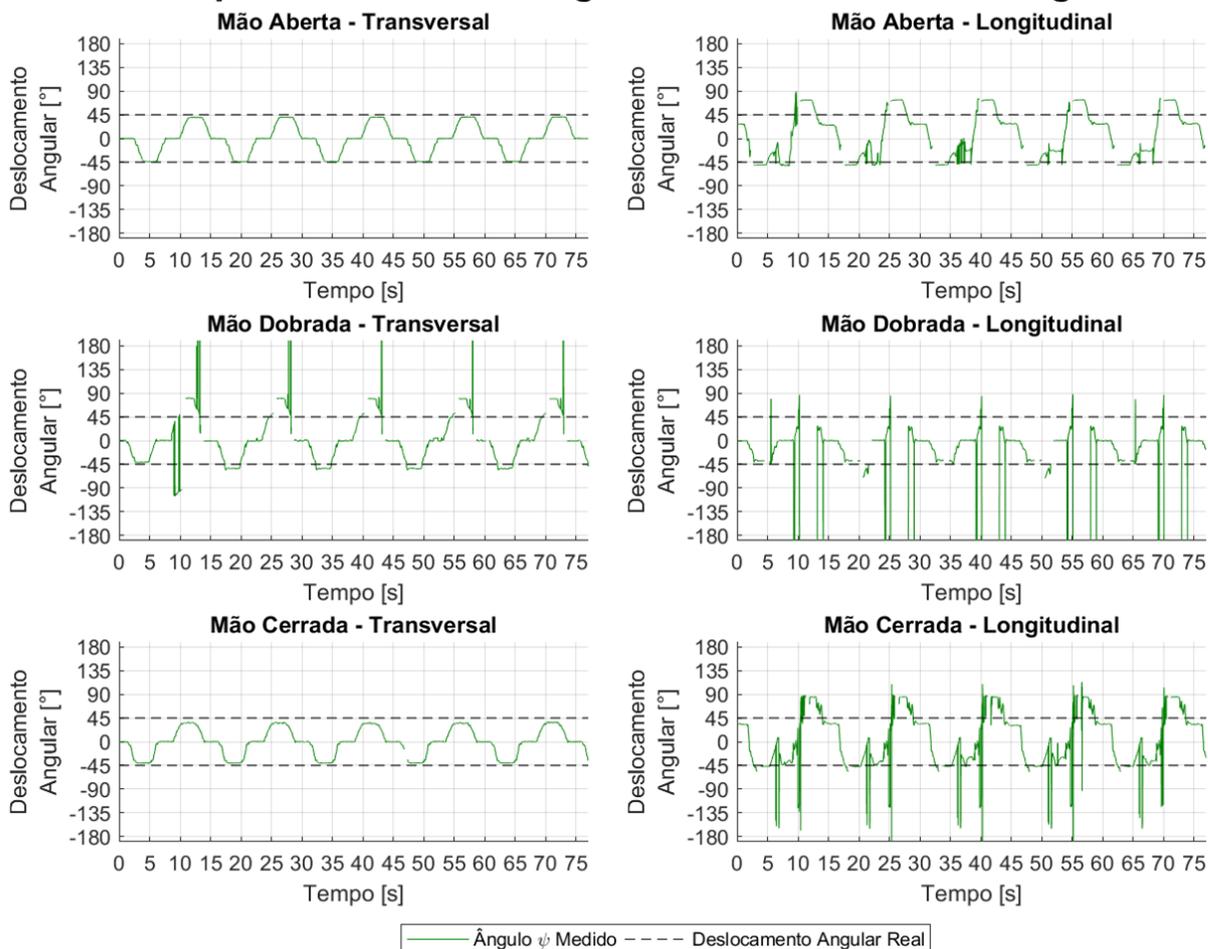


Figura A.27 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do polegar.

Na Tabela A.22 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Verticais para o polegar.

Tabela A.22 - Resultados dos EDA Vertical para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]	ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,42		ψ_{VR}^{aberta}	-	58,35	
ψ_{VA}^{aberta}	1,35	0,81	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	-5,23	0,52	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	-4,59	0,94		ψ_{VB}^{aberta}	27,73	1,51	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	3,74		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	1,50	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	-5,87	12,61	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	7,16	2,31	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	21,56	104,15		$\psi_{VB}^{dobrada}$	59,03	5,21	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,55		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	81,46	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	4,51	0,39	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	-3,08	9,05	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	-9,66	2,62		$\psi_{VB}^{cerrada}$	39,35	9,17	
Média	1,22	14,03	97,37	Média	20,83	18,79	92,90
Máximo*	21,56	104,15	100,00	Máximo	59,03	81,46	93,43

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Frontais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.28.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Frontal – Polegar

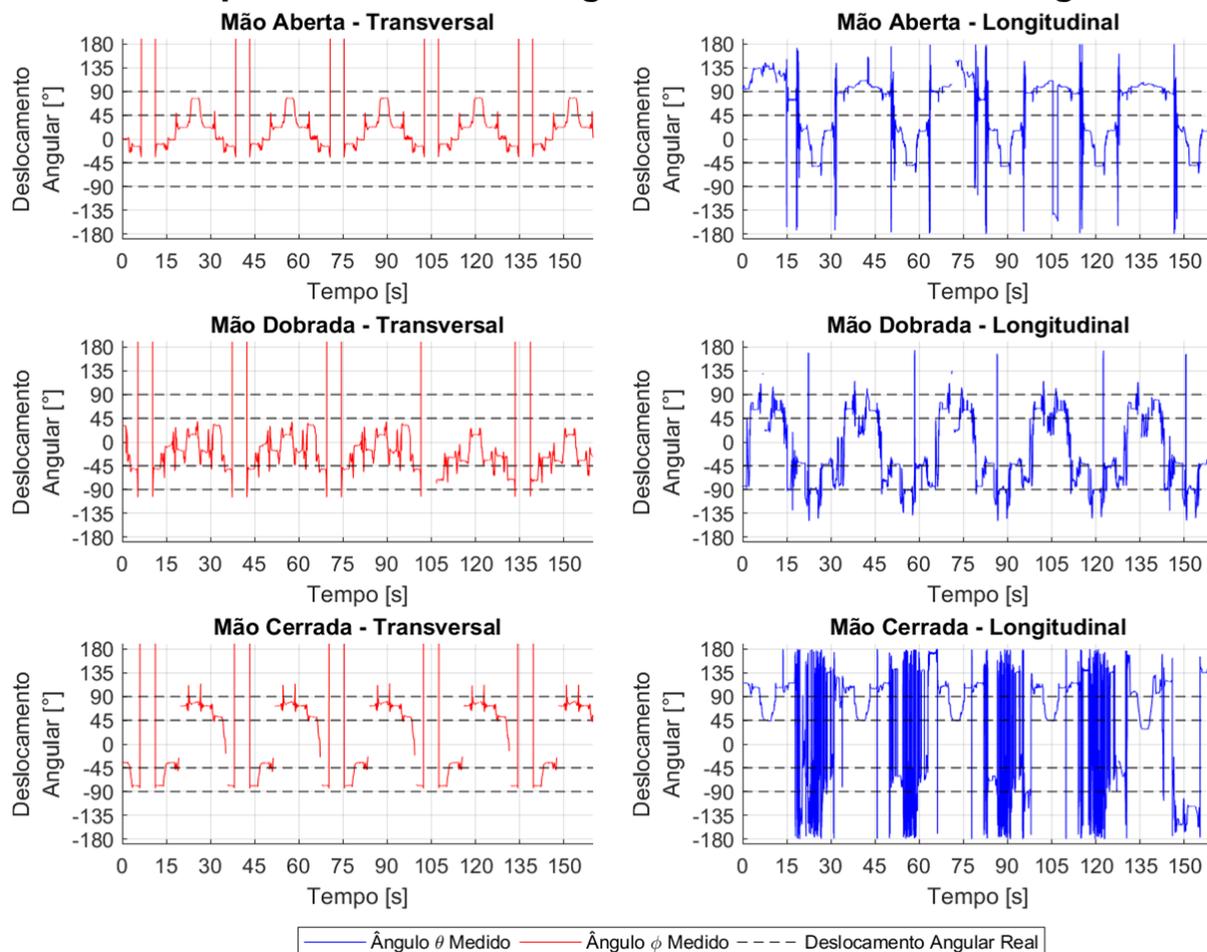


Figura A.28 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do polegar.

Na Tabela A.23 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Frontais para o polegar.

Tabela A.23 - Resultados dos EDA Frontal para o polegar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$	θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$
ϕ_{FR}^{aberta}	-	5,42		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	33,35	3,31		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	-22,66	0,59	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	5,82	2,54		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	-12,62	1,09		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	55,59		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	-12,53	20,40		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-68,58	18,00	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	65,73	7,20		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	-76,21	3,61		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	66,06		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	-33,77	1,06		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	27,38	1,95	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	-43,57	1,15		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-11,46	3,66		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	-12,43	12,78	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	76,21	66,06	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

A.3.2. Resultados das medições do dedo indicador

Os resultados para as medições dos EDA Laterais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.29.

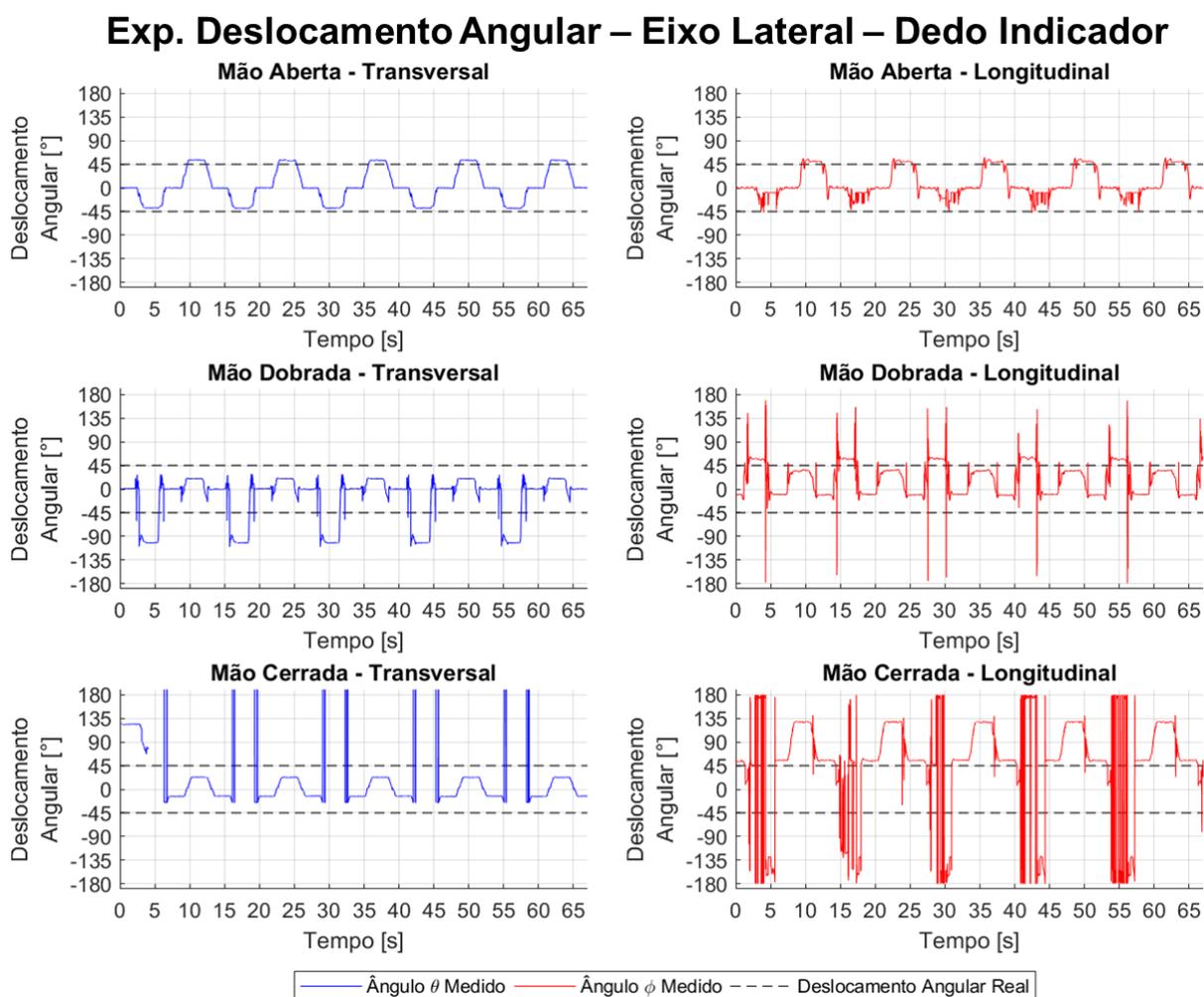


Figura A.29 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.24 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Laterais para o dedo indicador.

Tabela A.24 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	0,78		ϕ_{LR}^{aberta}	-	4,17	
θ_{LA}^{aberta}	6,50	0,90	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	29,48	23,58	100,00
θ_{LB}^{aberta}	7,64	1,39		ϕ_{LB}^{aberta}	5,81	4,41	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	11,42		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	4,78	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	-57,01	2,80	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	113,77	8,00	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	-25,10	0,81		$\phi_{LB}^{dobrada}$	0,95	2,03	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	122,23		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	2,06	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	6,34	132,31	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	-24,44	86,50	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	-22,33	0,56		$\phi_{LB}^{cerrada}$	28,21	2,02	
Média	-13,99	30,35	99,75	Média	25,63	15,28	100,00
Máximo*	57,01	132,31	100,00	Máximo	113,77	86,50	100,00

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Verticais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.30.

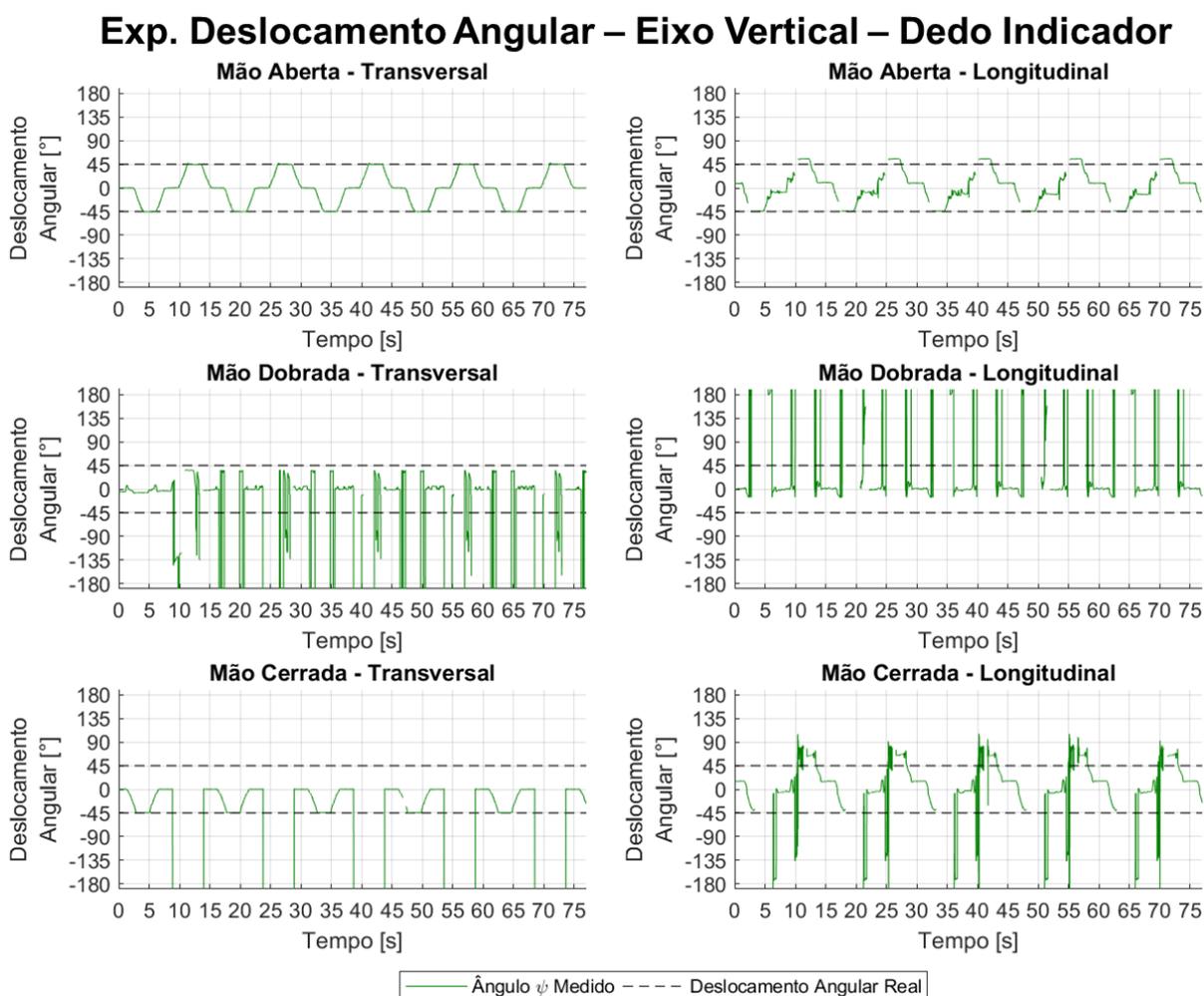


Figura A.30 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.25 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Verticais para o dedo indicador.

Tabela A.25 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]	ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,59		ψ_{VR}^{aberta}	-	15,54	
ψ_{VA}^{aberta}	-0,20	1,08	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	0,89	0,38	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	0,02	1,57		ψ_{VB}^{aberta}	10,06	0,79	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	7,71		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	3,88	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	144,39	34,41	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	21,08	6,11	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	99,00	36,55		$\psi_{VB}^{dobrada}$	106,63	5,55	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,23		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	103,88	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	0,39	0,14	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	-139,00	164,91	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	-1,94	0,17		$\psi_{VB}^{cerrada}$	20,02	14,09	
Média	40,28	9,16	97,37	Média	3,28	35,01	92,90
Máximo*	144,39	36,55	100,00	Máximo	139,00	164,91	93,43

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Frontais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.31.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Frontal – Dedo Indicador

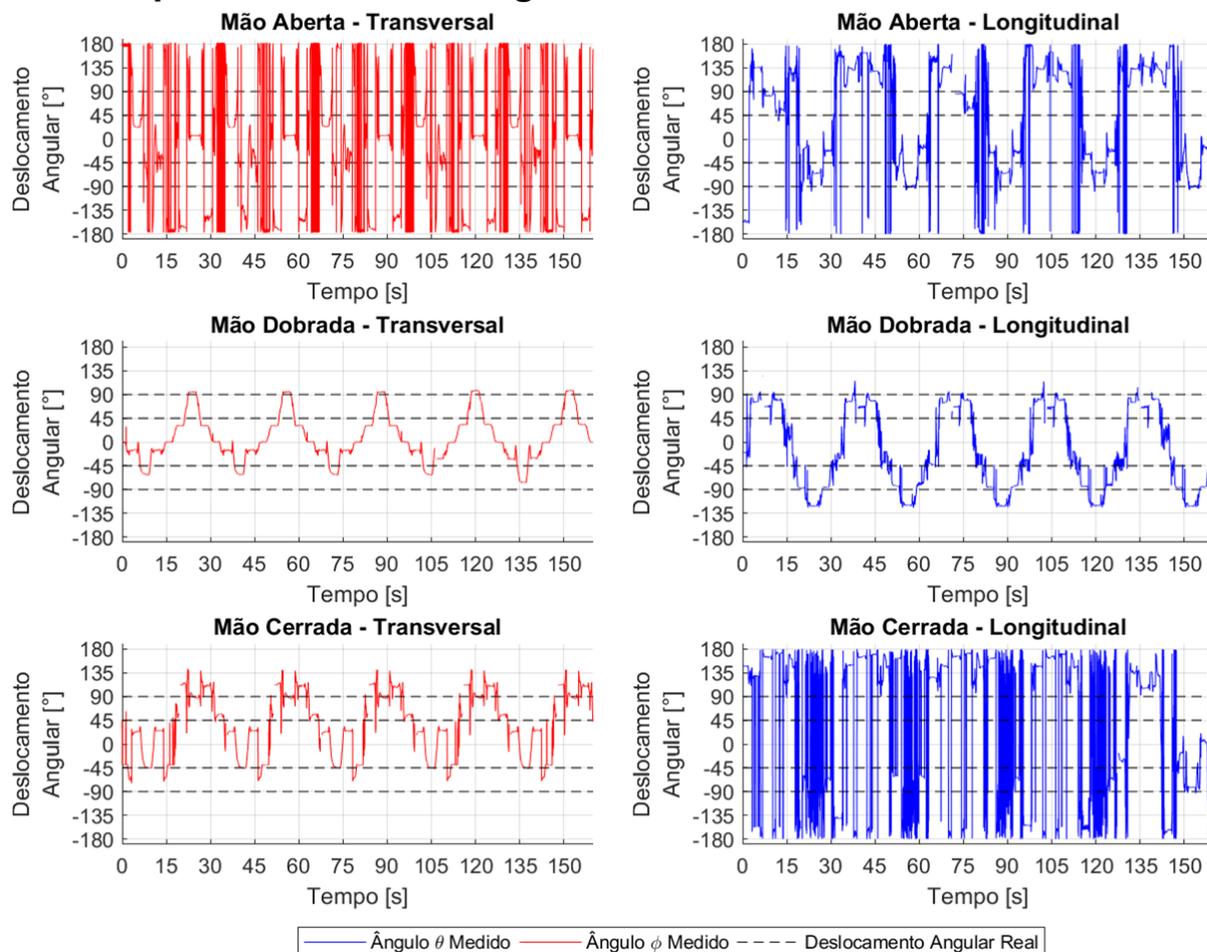


Figura A.31 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.26 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Frontais para o dedo indicador.

Tabela A.26 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo indicador.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$	θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$
ϕ_{FR}^{aberta}	-	-173,38		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	38,60	59,27		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	155,52	17,89	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	104,28	-100,50		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	-83,66	0,80		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	4,26		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	24,88	15,66		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-12,99	2,16	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	25,96	16,27		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	5,63	2,88		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	68,27		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	69,15	4,86		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	65,27	13,99	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	45,65	2,69		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-1,58	5,24		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	36,39	-3,98	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	155,52	173,38	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

A.3.3. Resultados das medições do dedo médio

Os resultados para as medições dos EDA Laterais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.32.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Lateral – Dedo Médio

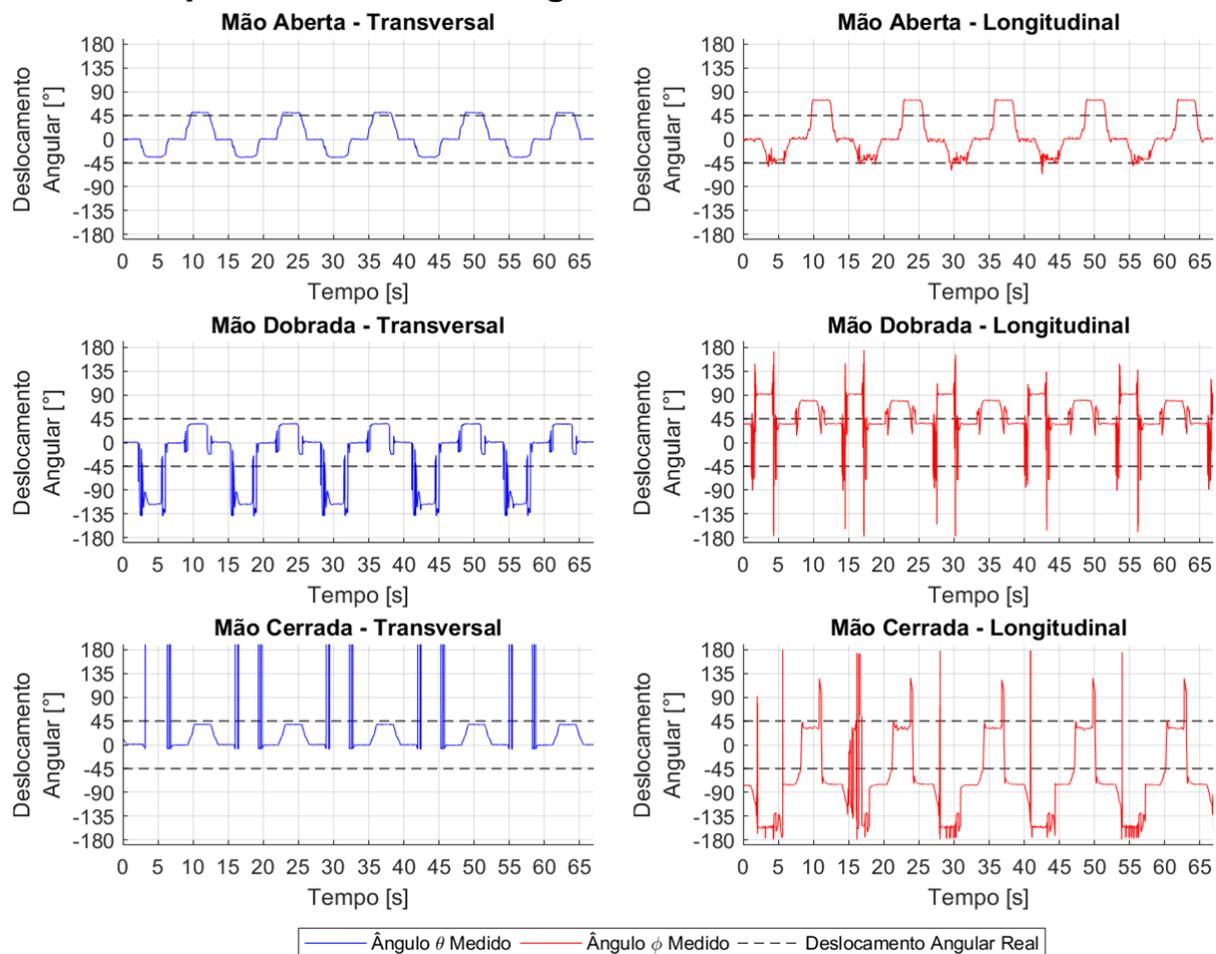


Figura A.32 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo médio.

Na Tabela A.27 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Laterais para o dedo médio.

Tabela A.27 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	1,01		ϕ_{LR}^{aberta}	-	5,59	
θ_{LA}^{aberta}	11,24	0,55	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	7,44	16,01	100,00
θ_{LB}^{aberta}	5,38	0,93		ϕ_{LB}^{aberta}	28,86	0,86	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	4,98		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	2,90	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	-70,95	10,23	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	100,44	22,75	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	-9,73	0,72		$\phi_{LB}^{dobrada}$	-1,20	1,09	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	1,40		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	2,40	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	20,23	3,79	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	-25,39	153,03	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	-6,64	0,83		$\phi_{LB}^{cerrada}$	62,02	5,99	
Média	-8,41	2,72	99,75	Média	28,69	23,40	100,00
Máximo*	70,95	10,23	100,00	Máximo	100,44	153,03	100,00

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Verticais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.33.

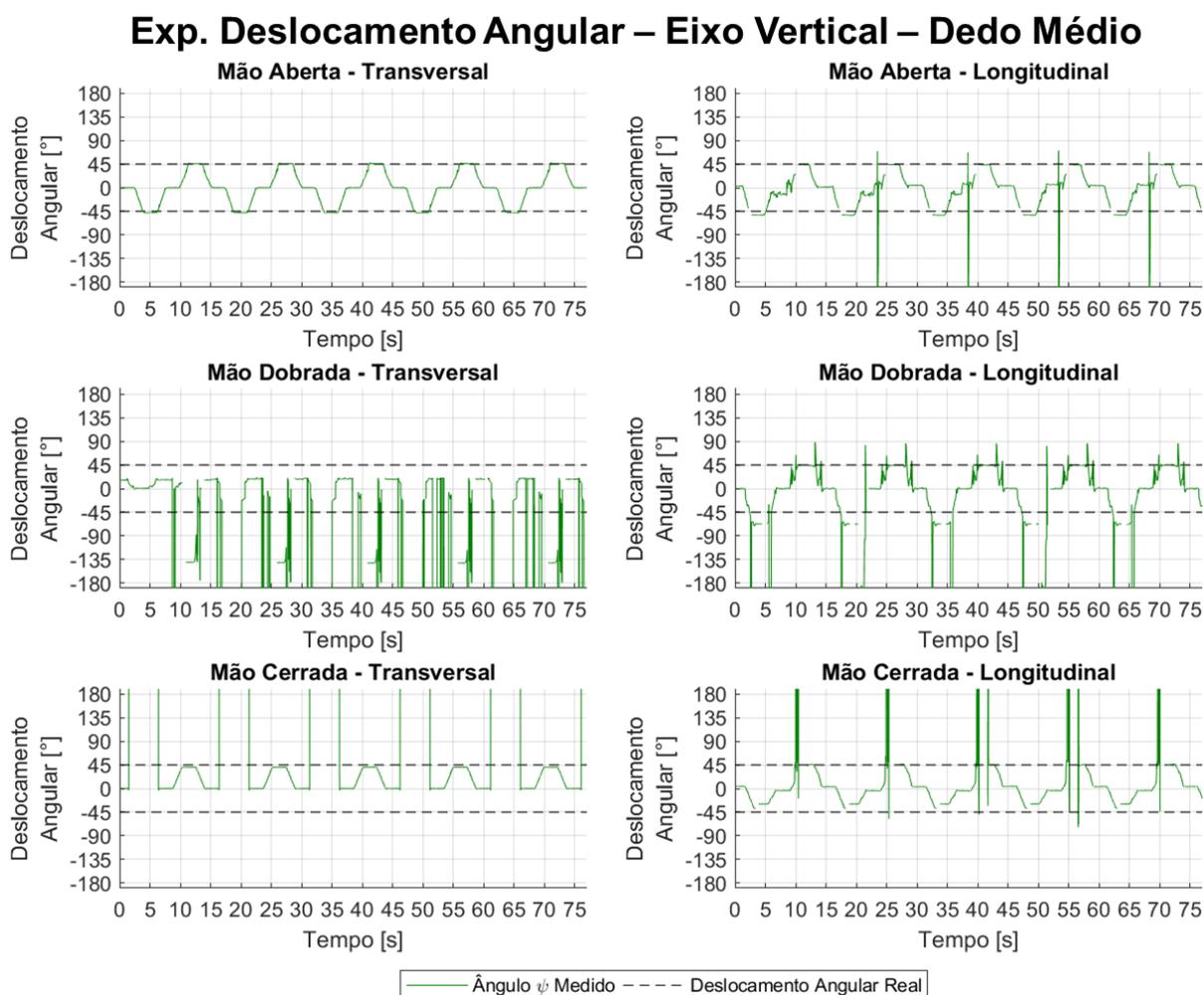


Figura A.33 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo médio.

Na Tabela A.28 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Verticais para o dedo médio.

Tabela A.28 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR} [^\circ]$	$R\psi_n [^\circ]$	$V[\%]$	ψ_n	$E\psi_{nR} [^\circ]$	$R\psi_n [^\circ]$	$V[\%]$
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,42		ψ_{VR}^{aberta}	-	18,13	
ψ_{VA}^{aberta}	-2,65	1,04	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	-7,17	0,65	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	1,11	0,91		ψ_{VB}^{aberta}	-1,22	0,42	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	115,13		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	6,84	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	148,88	30,65	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	-22,96	3,05	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	139,99	136,14		$\psi_{VB}^{dobrada}$	-0,56	1,17	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,55		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	4,64	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	-0,58	0,16	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	14,33	7,80	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	-4,32	0,22		$\psi_{VB}^{cerrada}$	2,34	59,39	
Média	47,07	31,69	97,37	Média	-2,54	11,34	92,90
Máximo*	148,88	136,14	100,00	Máximo	22,96	59,39	93,43

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Frontais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.34.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Frontal – Dedo Médio

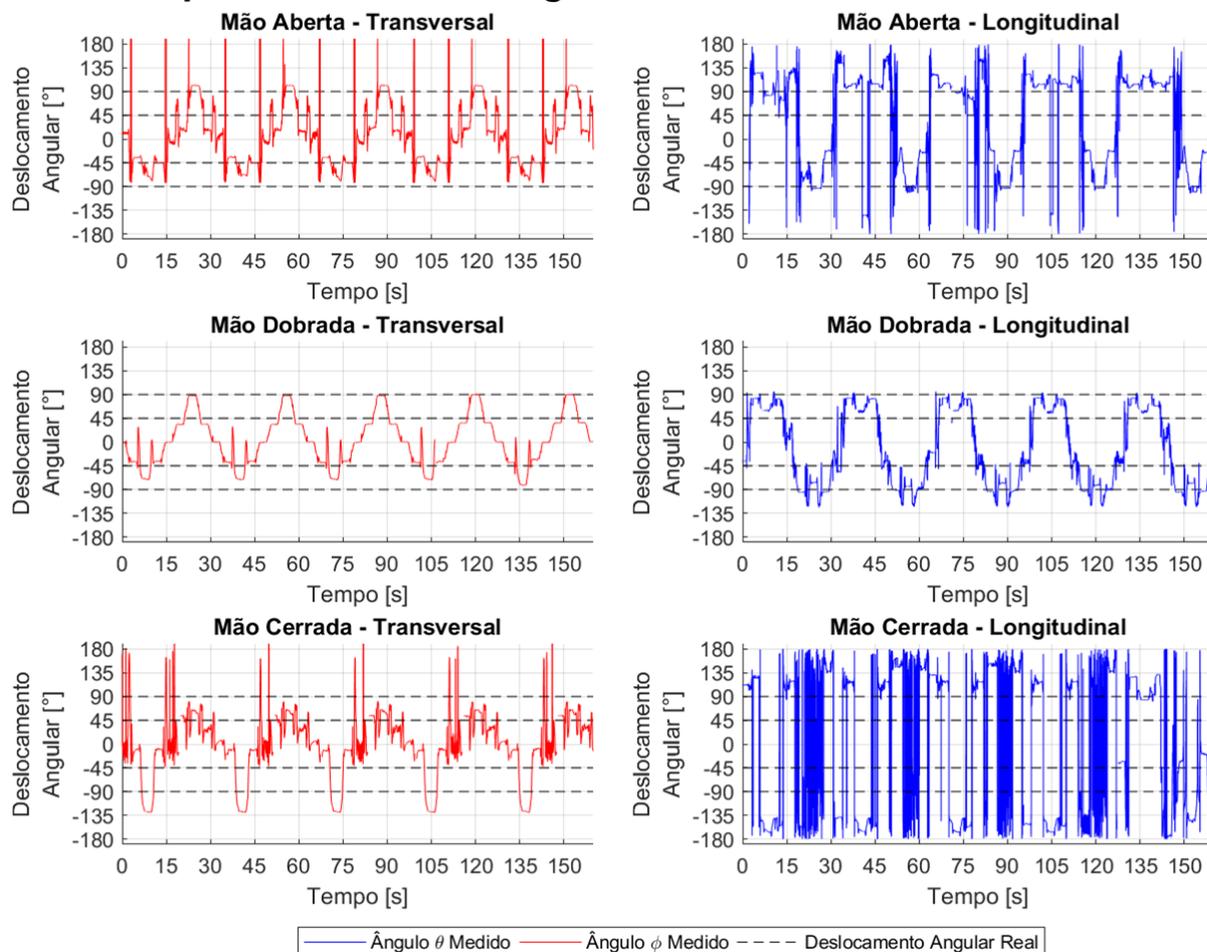


Figura A.34 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo médio.

Na Tabela A.29 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Frontais para o dedo médio.

Tabela A.29 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo médio.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$	θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$
ϕ_{FR}^{aberta}	-	21,03		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	5,32	6,89		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	-27,79	6,51	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	21,13	16,45		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	11,44	0,74		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	2,90		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	7,91	4,53		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-10,31	2,33	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	17,61	11,59		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	-1,30	1,93		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	71,45		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	33,35	9,32		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	-8,50	35,83	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	-37,92	1,82		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-28,22	7,18		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	-1,44	13,37	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	37,92	71,45	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

A.3.4. Resultados das medições do dedo anelar

Os resultados para as medições dos EDA Laterais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.35.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Lateral – Dedo Anelar

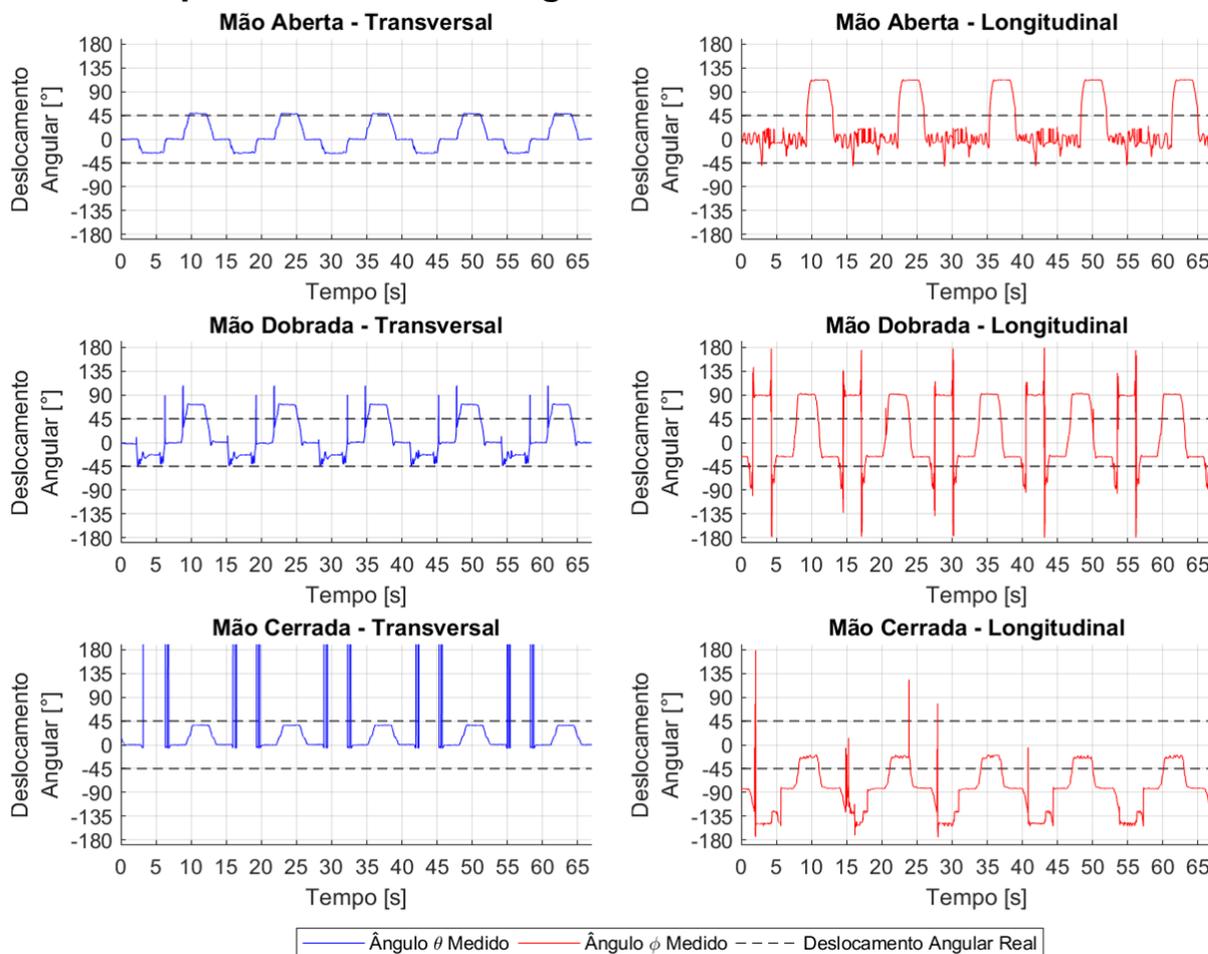


Figura A.35 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.30 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Laterais para o dedo anelar.

Tabela A.30 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	1,29		ϕ_{LR}^{aberta}	-	19,05	
θ_{LA}^{aberta}	18,89	1,17	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	45,01	27,43	100,00
θ_{LB}^{aberta}	3,39	1,04		ϕ_{LB}^{aberta}	66,92	1,50	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	17,25		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	7,85	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	20,53	6,94	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	161,25	3,47	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	26,79	1,27		$\phi_{LB}^{dobrada}$	73,38	1,72	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	0,76		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	2,20	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	-23,85	3,10	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	-15,89	23,20	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	-8,05	0,74		$\phi_{LB}^{cerrada}$	14,48	4,81	
Média	6,28	3,73	99,75	Média	57,52	10,14	100,00
Máximo*	26,79	17,25	100,00	Máximo	161,25	27,43	100,00

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Verticais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.36.

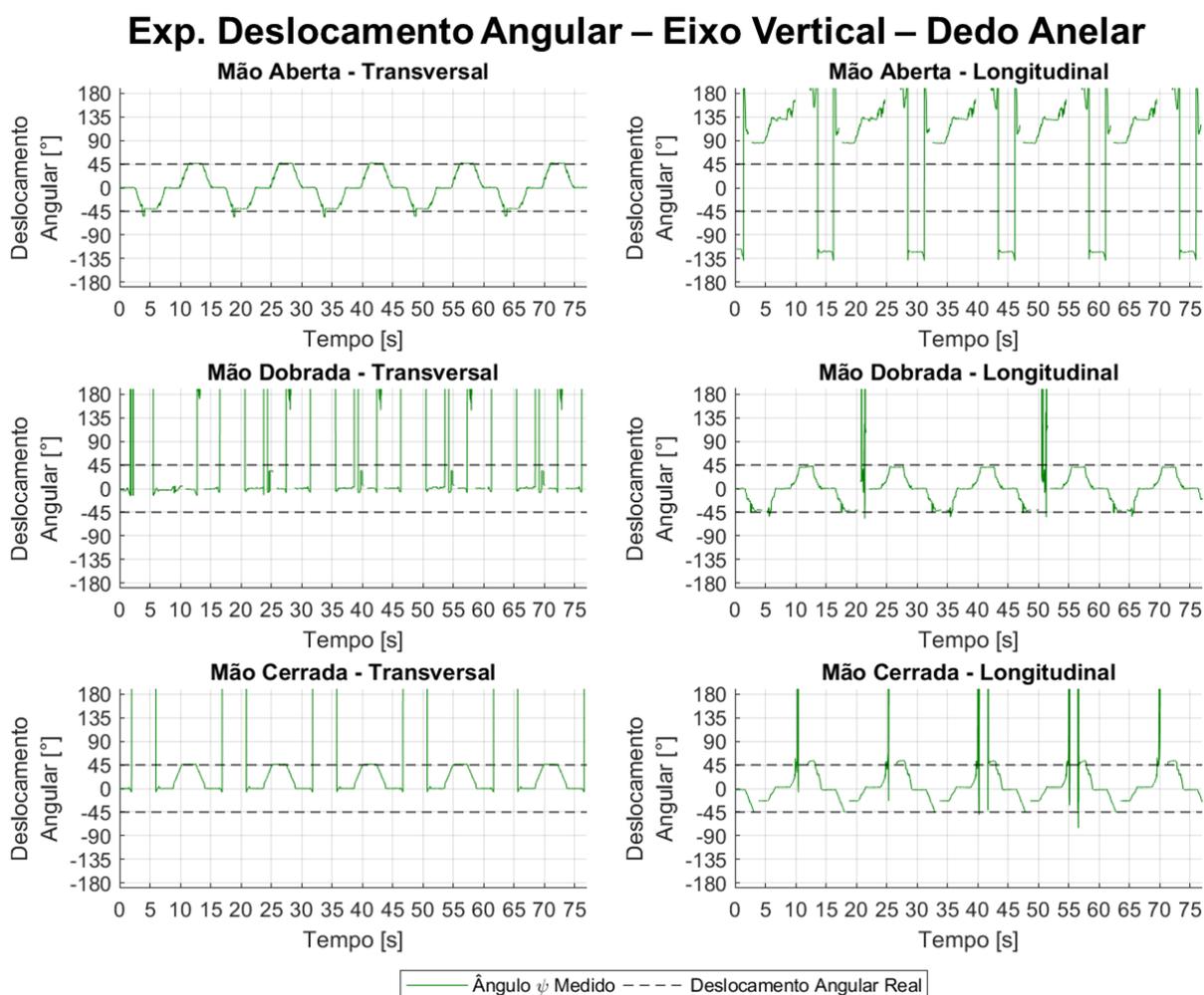


Figura A.36 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.31 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Verticais para o dedo anelar.

Tabela A.31 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]	ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,88		ψ_{VR}^{aberta}	-	140,25	
ψ_{VA}^{aberta}	4,06	12,10	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	130,20	1,07	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	1,65	0,52		ψ_{VB}^{aberta}	152,77	3,49	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	4,49		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	0,93	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	-3,08	40,01	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	3,56	1,76	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	-40,15	31,09		$\psi_{VB}^{dobrada}$	-4,09	1,44	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,33		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	3,18	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	1,46	0,98	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	18,47	20,74	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	1,25	0,24		$\psi_{VB}^{cerrada}$	8,16	58,73	
Média	-5,80	10,07	97,37	Média	51,51	25,73	92,90
Máximo*	40,15	40,01	100,00	Máximo	152,77	140,25	93,43

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Frontais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.37.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Frontal – Dedo Anelar

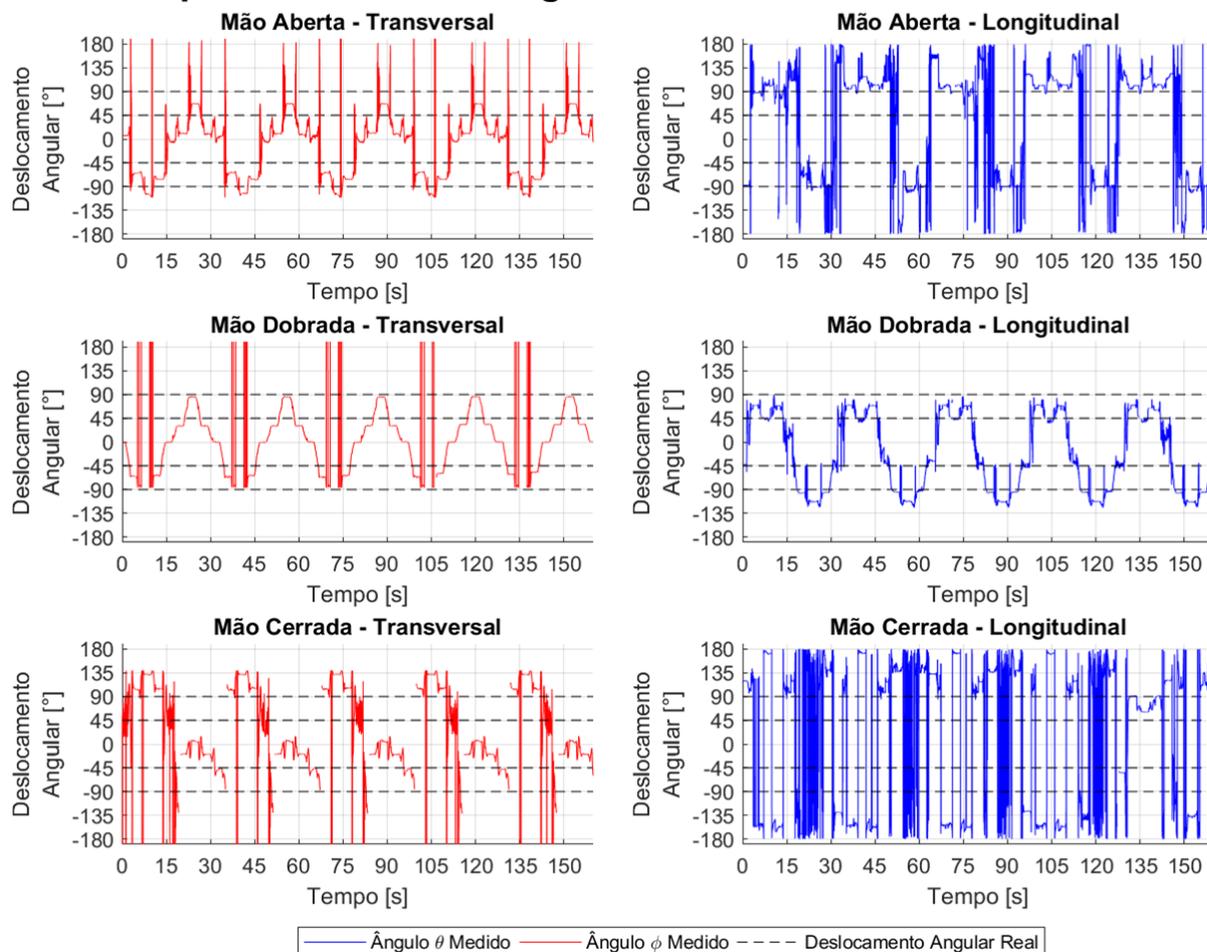


Figura A.37 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.32 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Frontais para o dedo anelar.

Tabela A.32 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo anelar.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$	θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$
ϕ_{FR}^{aberta}	-	10,54		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	-25,27	8,94		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	-35,26	2,85	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	-1,59	-146,05		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	-23,19	0,94		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	2,18		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	-18,13	7,77		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-13,35	2,65	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	-2,68	4,66		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	-4,44	1,10		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	124,25		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	149,97	5,29		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	-64,40	2,99	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	-138,34	0,53		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-84,77	3,63		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	-21,79	2,15	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	149,97	146,05	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

A.3.5. Resultados das medições do dedo mínimo

Os resultados para as medições dos EDA Laterais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.38.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Lateral – Dedo Mínimo

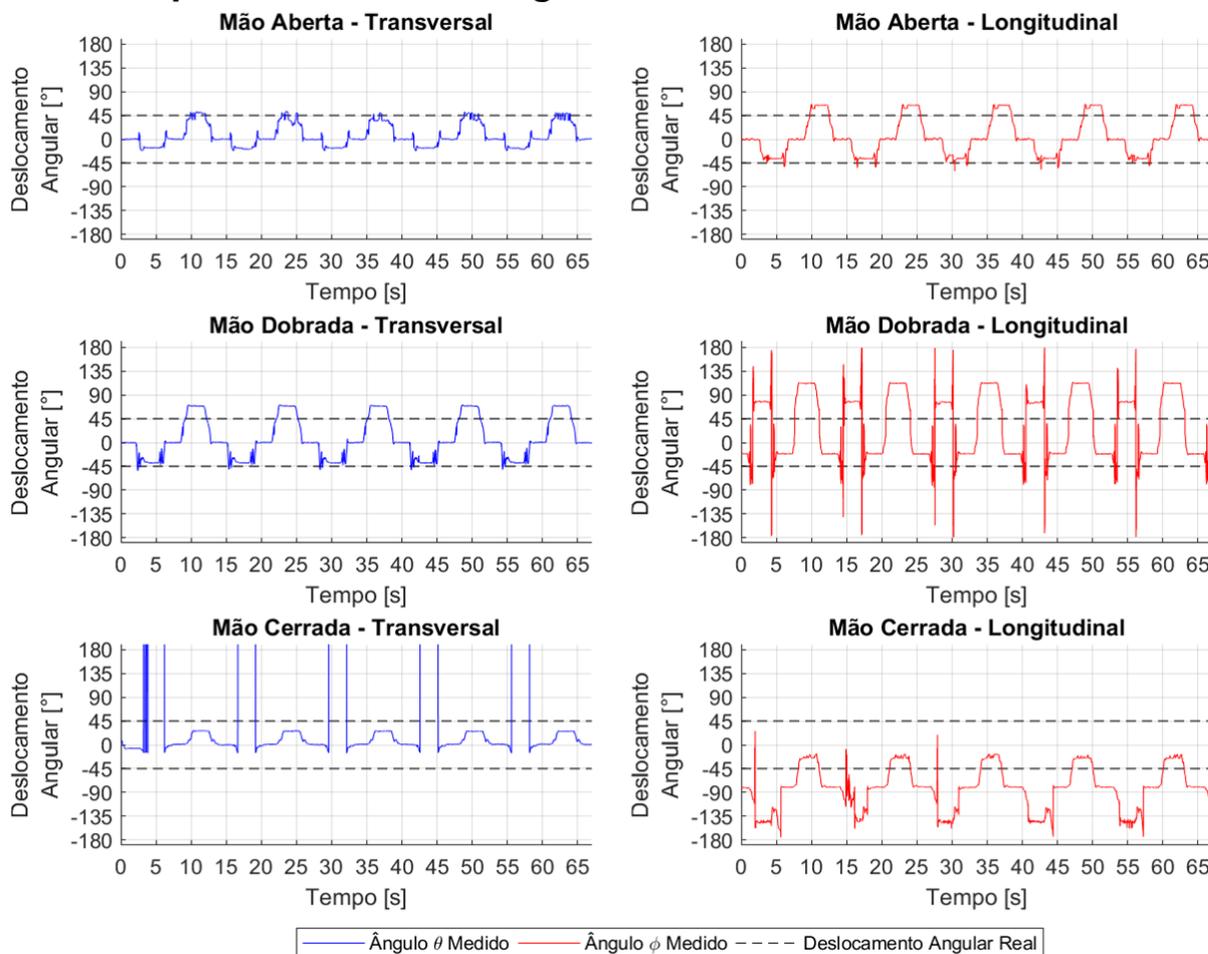


Figura A.38 – EDA Lateral – Posições angulares relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.33 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Laterais para o dedo mínimo.

Tabela A.33 - Resultados dos EDA Lateral para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
θ_n	$E\theta_{nR}[^{\circ}]$	$R\theta_n[^{\circ}]$	$V[\%]$	ϕ_n	$E\phi_{nR}[^{\circ}]$	$R\phi_n[^{\circ}]$	$V[\%]$
θ_{LR}^{aberta}	-	1,44		ϕ_{LR}^{aberta}	-	2,71	
θ_{LA}^{aberta}	27,97	2,25	100,00	ϕ_{LA}^{aberta}	8,74	8,59	100,00
θ_{LB}^{aberta}	-2,08	12,91		ϕ_{LB}^{aberta}	18,12	6,24	
$\theta_{LR}^{dobrada}$	-	1,77		$\phi_{LR}^{dobrada}$	-	6,51	
$\theta_{LA}^{dobrada}$	6,99	3,43	100,00	$\phi_{LA}^{dobrada}$	143,11	4,40	100,00
$\theta_{LB}^{dobrada}$	24,23	1,14		$\phi_{LB}^{dobrada}$	88,78	1,26	
$\theta_{LR}^{cerrada}$	-	6,98		$\phi_{LR}^{cerrada}$	-	2,28	
$\theta_{LA}^{cerrada}$	24,53	71,35	99,26	$\phi_{LA}^{cerrada}$	-15,54	27,21	100,00
$\theta_{LB}^{cerrada}$	-19,06	0,98		$\phi_{LB}^{cerrada}$	11,78	6,77	
Média	10,43	11,36	99,75	Média	42,50	7,33	100,00
Máximo*	27,97	71,35	100,00	Máximo	143,11	27,21	100,00

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Verticais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.39.

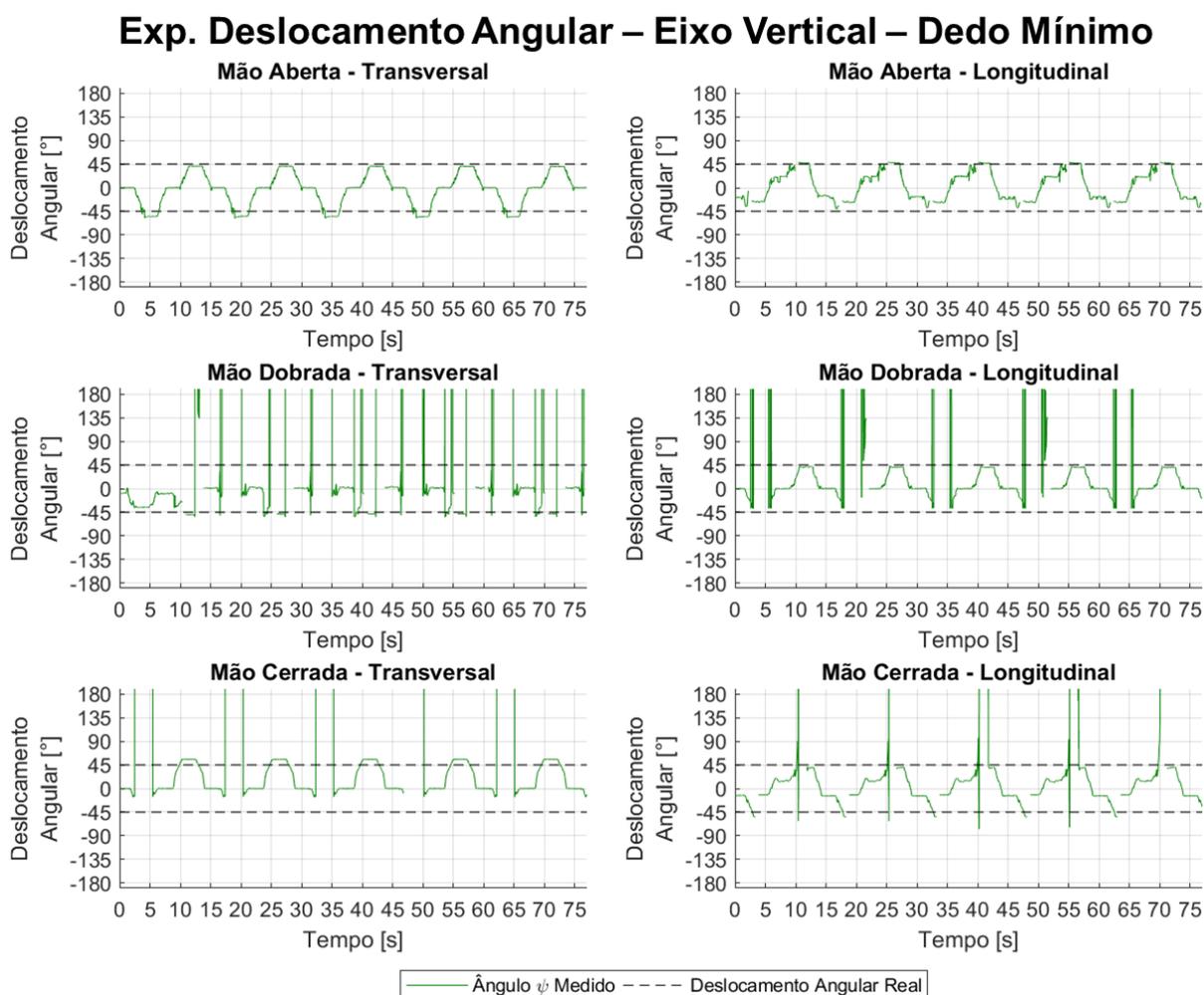


Figura A.39 – EDA Vertical – Posições angulares relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.34 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Verticais para o dedo mínimo.

Tabela A.34 - Resultados dos EDA Vertical para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]	ψ_n	$E\psi_{nR}$ [°]	$R\psi_n$ [°]	V [%]
ψ_{VR}^{aberta}	-	0,70		ψ_{VR}^{aberta}	-	27,59	
ψ_{VA}^{aberta}	-9,28	10,33	100,00	ψ_{VA}^{aberta}	17,82	2,08	93,15
ψ_{VB}^{aberta}	-4,13	0,79		ψ_{VB}^{aberta}	2,30	1,44	
$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	11,48		$\psi_{VR}^{dobrada}$	-	0,49	
$\psi_{VA}^{dobrada}$	88,75	-23,89	92,78	$\psi_{VA}^{dobrada}$	0,46	2,80	92,12
$\psi_{VB}^{dobrada}$	-52,10	66,39		$\psi_{VB}^{dobrada}$	-4,23	1,46	
$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	0,32		$\psi_{VR}^{cerrada}$	-	18,37	
$\psi_{VA}^{cerrada}$	-1,06	0,45	99,31	$\psi_{VA}^{cerrada}$	27,24	41,44	93,43
$\psi_{VB}^{cerrada}$	10,74	0,33		$\psi_{VB}^{cerrada}$	-3,69	56,65	
Média	5,49	7,43	97,37	Média	6,65	16,92	92,90
Máximo*	88,75	66,39	100,00	Máximo	27,24	56,65	93,43

* Máximo absoluto

Os resultados para as medições dos EDA Frontais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.40.

Exp. Deslocamento Angular – Eixo Frontal – Dedo Mínimo

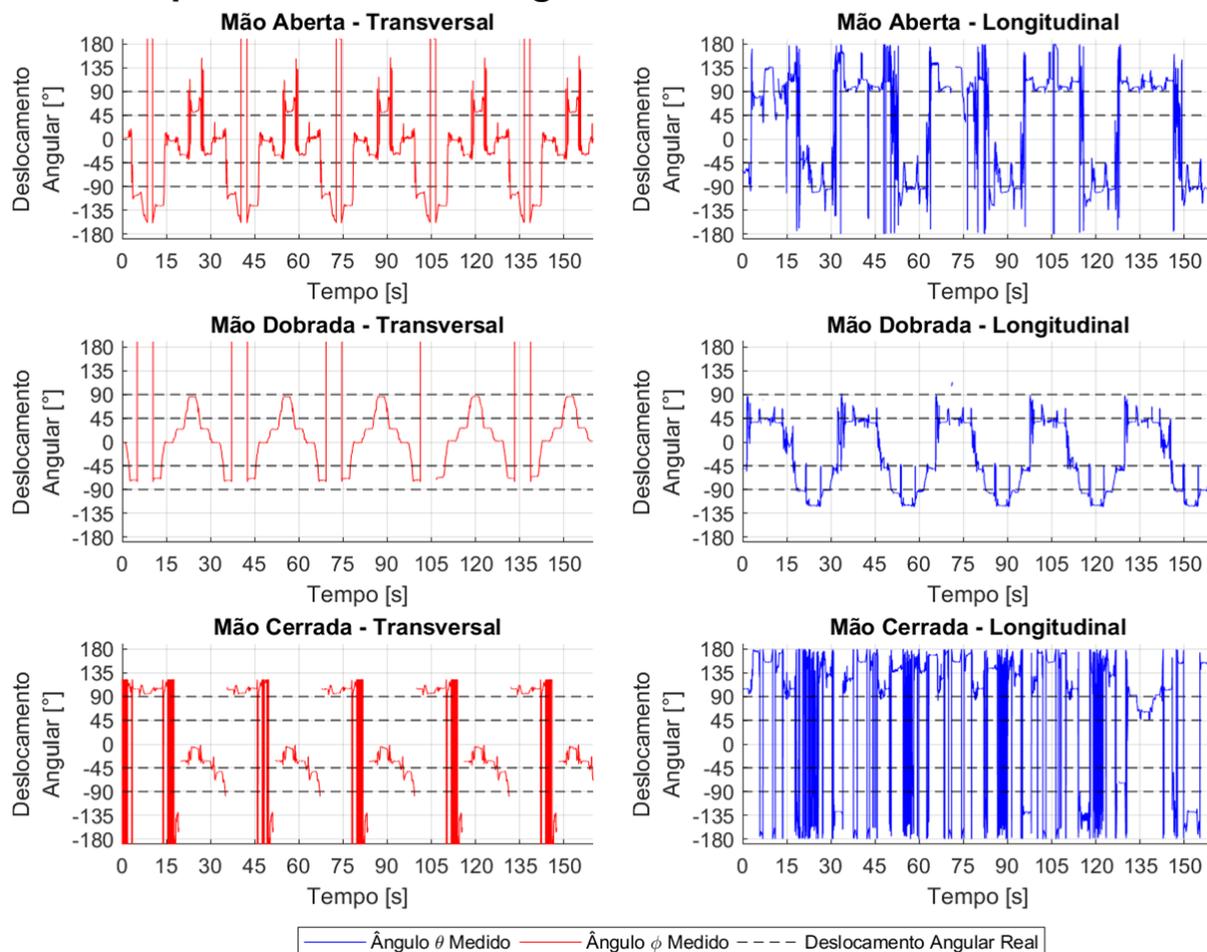


Figura A.40 – EDA Frontal – Posições angulares relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.35 são apresentados os erros e repetibilidades calculadas nos EDA Frontais para o dedo mínimo.

Tabela A.35 - Resultados dos EDA Frontal para o dedo mínimo.

Disposição Transversal				Disposição Longitudinal			
ϕ_n	$E\phi_{nR} [^\circ]$	$R\phi_n [^\circ]$	$V[\%]$	θ_n	$E\theta_{nR} [^\circ]$	$R\theta_n [^\circ]$	$V[\%]$
ϕ_{FR}^{aberta}	-	6,31		θ_{FR}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FA}^{aberta}	-70,65	15,03		θ_{FA}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FB}^{aberta}	-74,15	4,46	100,00	θ_{FB}^{aberta}	-	-	98,72
ϕ_{FC}^{aberta}	-156,12	1,74		θ_{FC}^{aberta}	-	-	
ϕ_{FD}^{aberta}	-38,28	3,38		θ_{FD}^{aberta}	-	-	
$\phi_{FR}^{dobrada}$	-	3,09		$\theta_{FR}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{dobrada}$	-24,71	5,75		$\theta_{FA}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{dobrada}$	-19,57	1,85	99,65	$\theta_{FB}^{dobrada}$	-	-	96,68
$\phi_{FC}^{dobrada}$	-10,88	0,74		$\theta_{FC}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{dobrada}$	-3,88	1,20		$\theta_{FD}^{dobrada}$	-	-	
$\phi_{FR}^{cerrada}$	-	-79,46		$\theta_{FR}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FA}^{cerrada}$	149,70	2,23		$\theta_{FA}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FB}^{cerrada}$	-77,55	3,47	97,16	$\theta_{FB}^{cerrada}$	-	-	99,68
$\phi_{FC}^{cerrada}$	-174,08	0,75		$\theta_{FC}^{cerrada}$	-	-	
$\phi_{FD}^{cerrada}$	-96,93	3,61		$\theta_{FD}^{cerrada}$	-	-	
Média	-49,76	-1,72	98,94	Média	-	-	98,36
Máximo*	174,08	79,46	100,00	Máximo	-	-	99,68

* Máximo absoluto

A.3.6. Conclusões sobre os experimentos de deslocamento angular para os dedos da mão

Nos experimentos de deslocamento angular para os dedos pode-se observar a ocorrência de vários ruídos, caracterizados por linhas verticais nos gráficos. Acredita-se que isso se deve ao LMC não conseguir reconhecer a correta posição angular da mão, invertendo-a em 180° e causando a descontinuidade nas leituras.

A.4. Experimentos de Deslocamento Circular para os Dedos da Mão

Neste tópico, são apresentados os resultados dos experimentos de deslocamento circular.

A.4.1. Resultados das medições do polegar

Os resultados para as medições dos EDC Laterais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.41.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Polegar

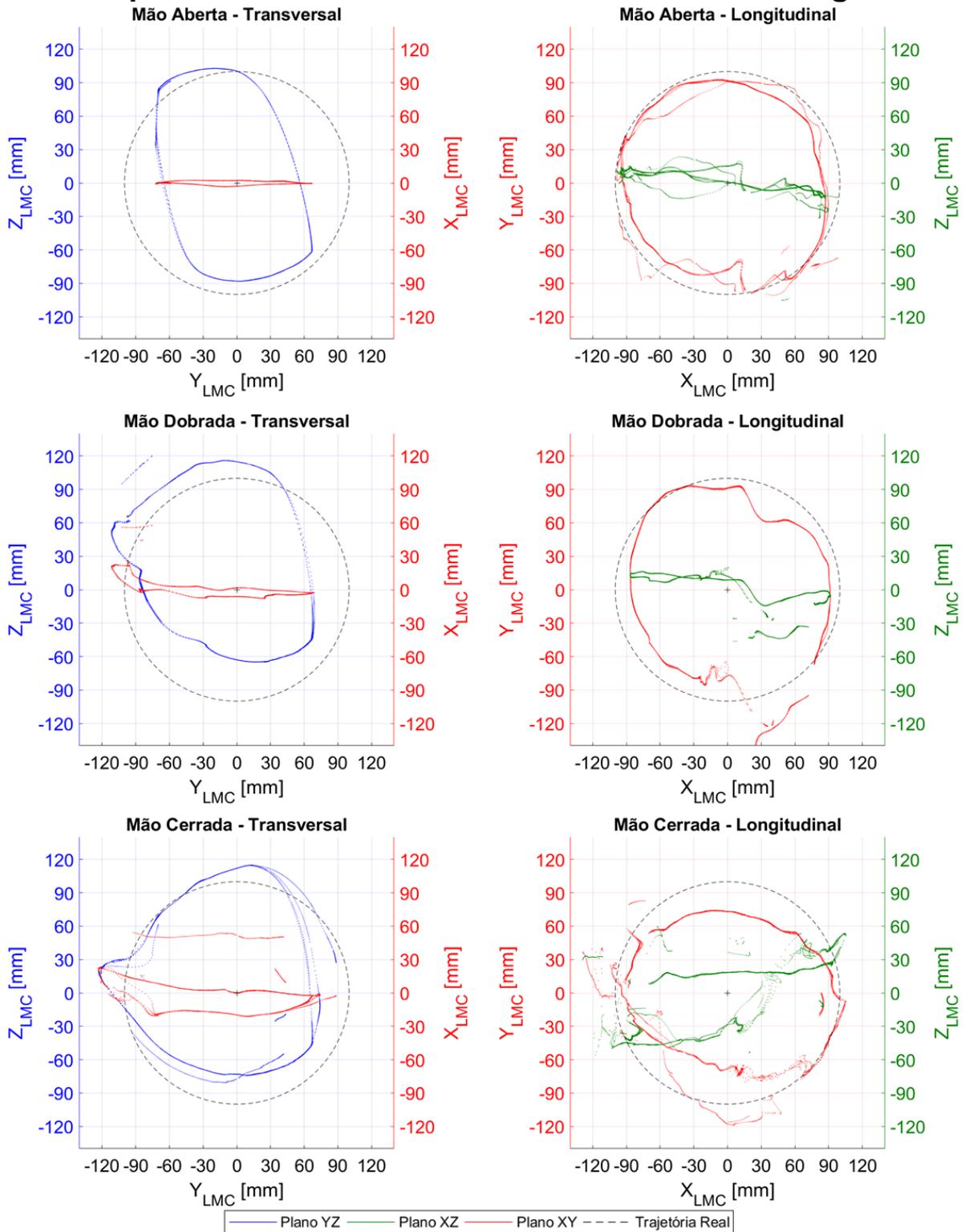


Figura A.41 – EDC Lateral – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.36 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Laterais para o polegar.

Tabela A.36 - Resultados dos EDC Lateral para o polegar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-8,15	-45,92	10,56	100,00	Aberta	-6,76	-28,07	31,80	100,00
Dobrada	-12,65	-43,24	52,99	100,00	Dobrada	-5,07	-32,40	67,33	100,00
Cerrada	-8,65	-53,04	26,66	97,47	Cerrada	-8,09	-33,75	37,35	100,00
	-9,81	-53,04	52,99	99,16		-6,64	-33,75	67,33	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Verticais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.42.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Vertical – Polegar

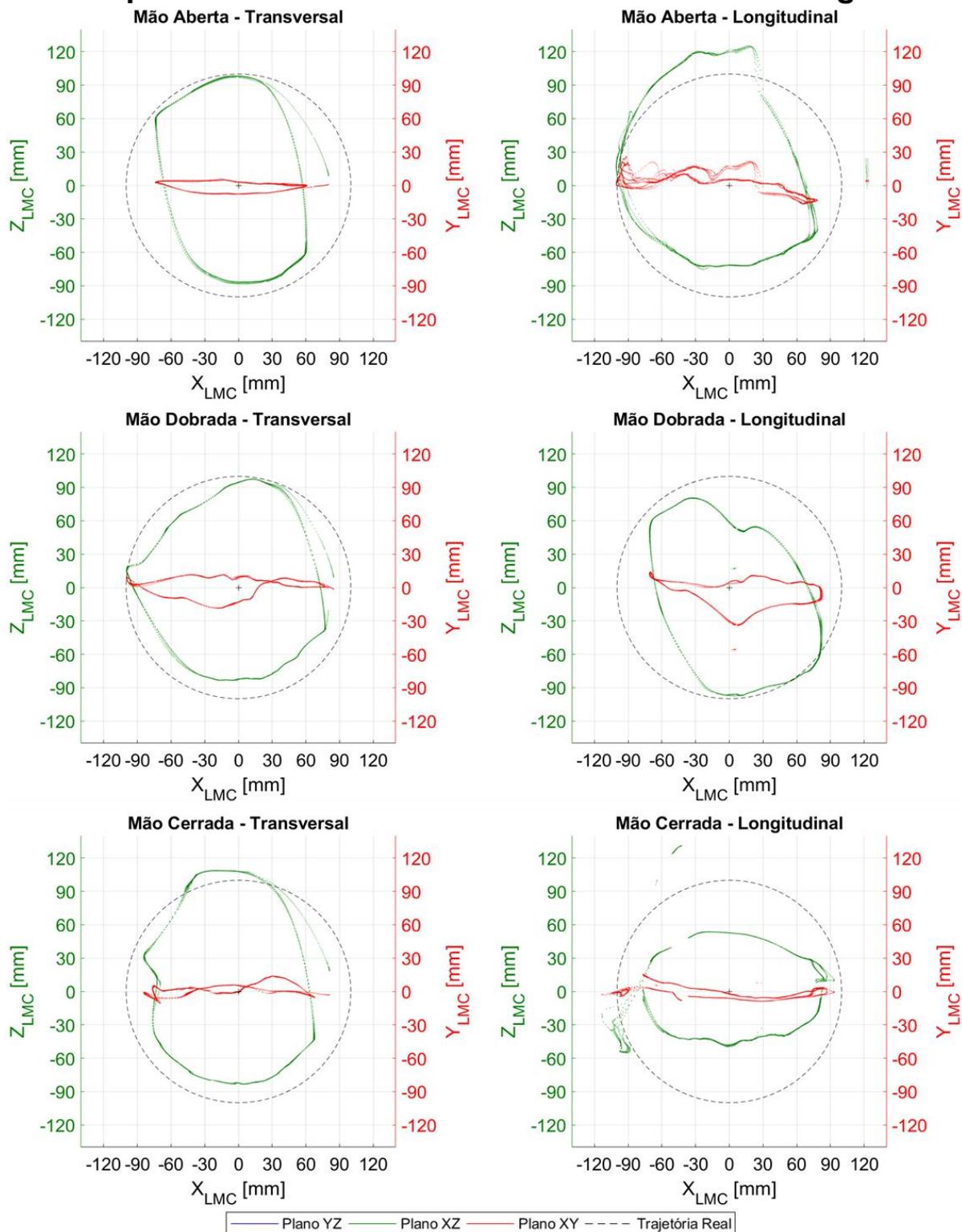


Figura A.42 – EDC Vertical – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.37 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Verticais para o polegar.

Tabela A.37 - Resultados dos EDC Vertical para o polegar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-12,55	-43,99	-1,36	100,00	Aberta	-9,26	-35,96	28,33	100,00
Dobrada	-12,61	-28,86	1,40	100,00	Dobrada	-13,46	-41,72	3,70	100,00
Cerrada	-12,41	-37,59	11,90	100,00	Cerrada	-27,09	-55,56	38,01	100,00
	-12,52	-43,99	11,90	100,00		-16,61	-55,56	38,01	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Frontais transversais e longitudinais para o polegar são mostrados na Fig. A.43.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Frontal – Polegar

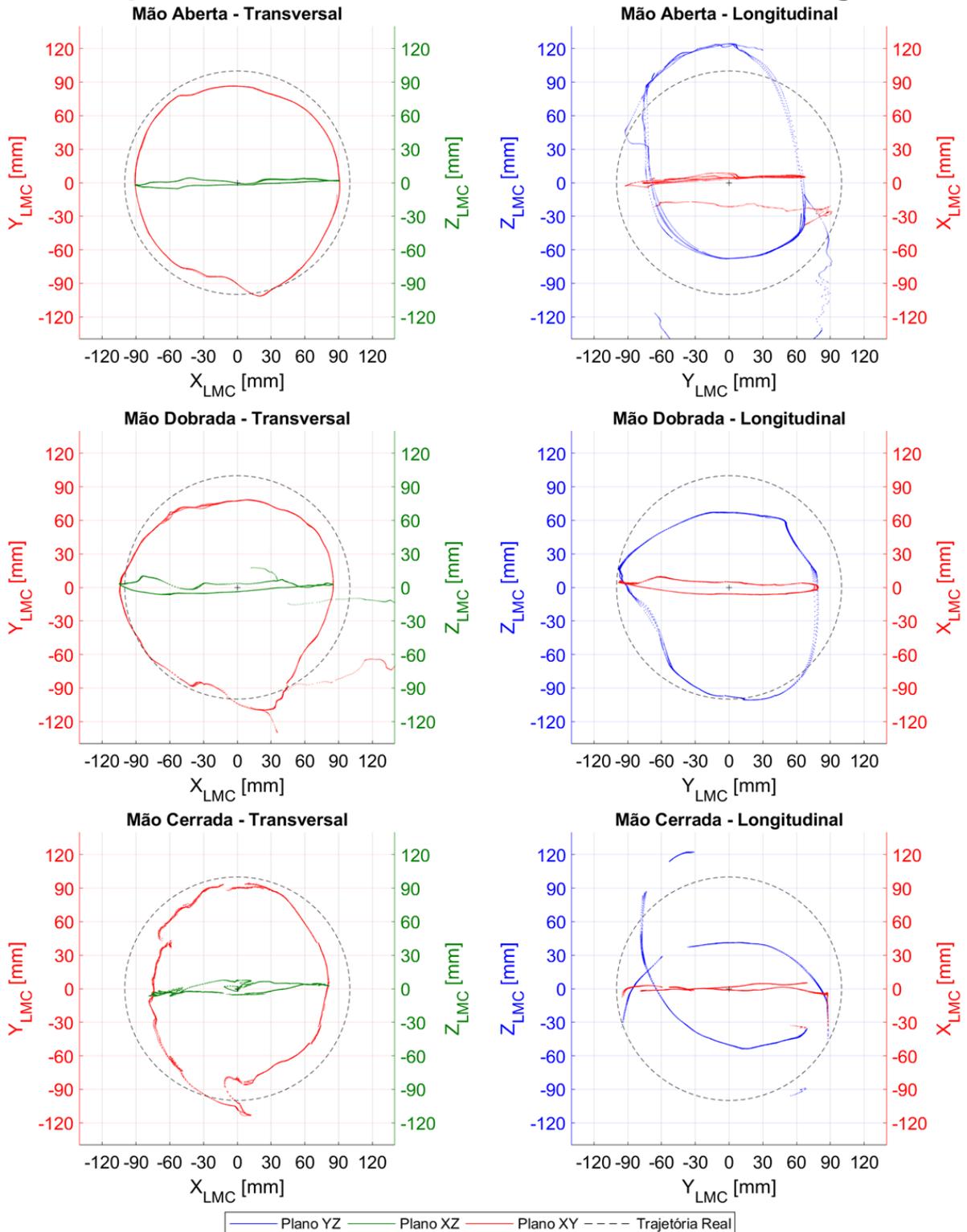


Figura A.43 – EDC Frontal – Posições relativas do polegar.

Na Tabela A.38 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Frontais para o polegar.

Tabela A.38 - Resultados dos EDC Frontal para o polegar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-9,17	-15,68	3,58	100,00	Aberta	-5,31	-36,74	66,69	97,49
Dobrada	-5,91	-23,41	84,26	98,72	Dobrada	-16,51	-33,26	5,84	100,00
Cerrada	-14,12	-30,77	14,23	100,00	Cerrada	-24,14	-59,06	27,96	100,00
	-9,73	-30,77	84,26	99,57		-15,32	-59,06	66,69	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

A.4.2. Resultados das medições do dedo indicador

Os resultados para as medições dos EDC Laterais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.44.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Dedo Indicador

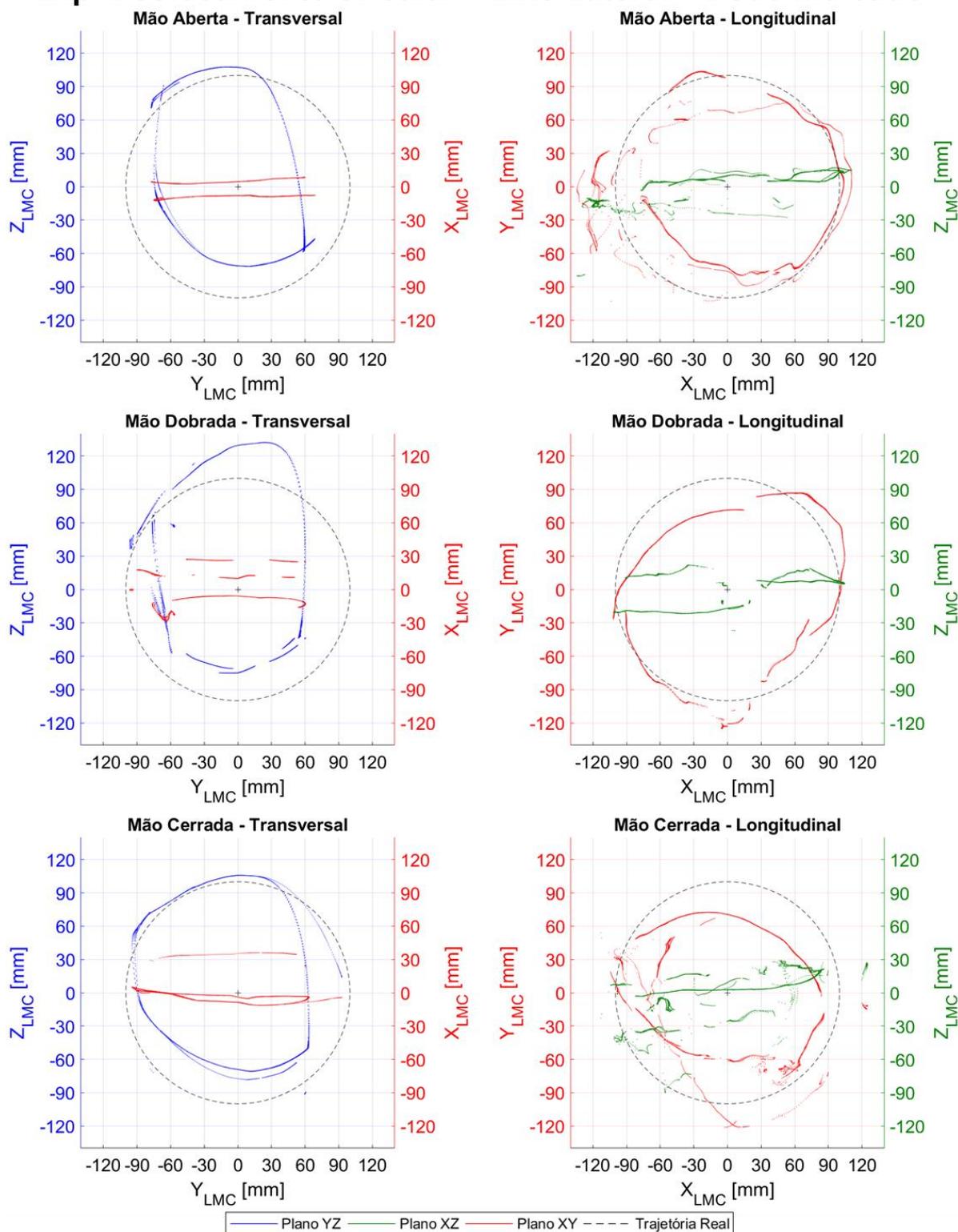


Figura A.44 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.39 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Laterais para o dedo indicador.

Tabela A.39 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo indicador.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-13,42	-45,91	12,98	100,00	Aberta	-4,30	-33,39	56,33	100,00
Dobrada	-13,75	-39,59	35,17	100,00	Dobrada	-3,22	-26,90	25,71	100,00
Cerrada	-11,40	-37,71	11,76	97,47	Cerrada	-17,08	-49,30	28,26	100,00
	-12,86	-45,91	35,17	99,16		-8,20	-49,30	56,33	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Verticais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.45.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Vertical – Dedo Indicador

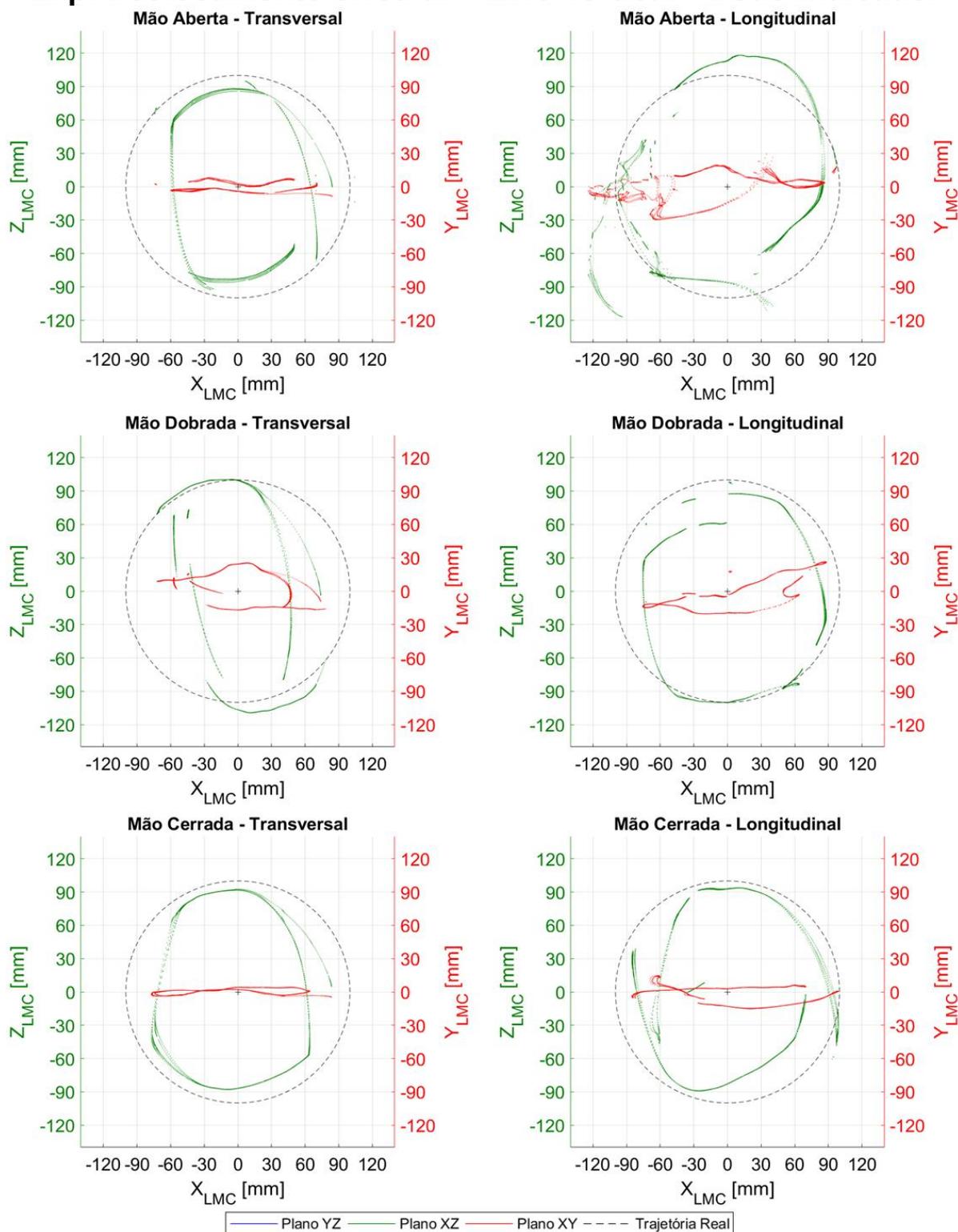


Figura A.45 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.40 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Verticais para o dedo indicador.

Tabela A.40 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo indicador.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-17,98	-43,02	5,45	100,00	Aberta	-4,33	-33,76	52,36	100,00
Dobrada	-5,82	-61,72	13,36	100,00	Dobrada	-11,64	-39,20	5,72	100,00
Cerrada	-14,37	-39,35	-6,98	100,00	Cerrada	-16,92	-76,98	11,41	100,00
	-12,72	-61,72	13,36	100,00		-10,96	-76,98	52,36	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Frontais transversais e longitudinais para o dedo indicador são mostrados na Fig. A.46.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Frontal – Dedo Indicador

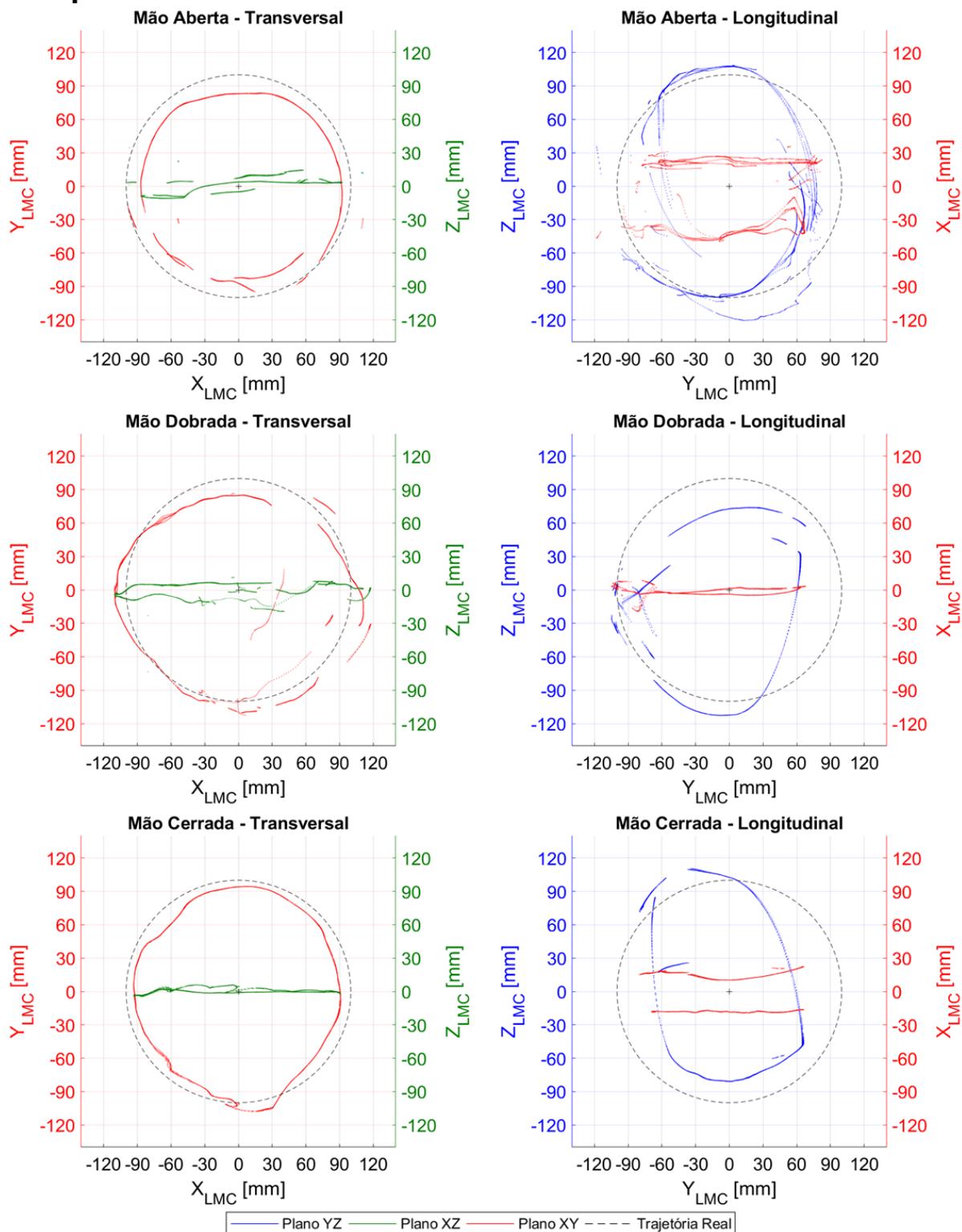


Figura A.46 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo indicador.

Na Tabela A.41 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Frontais para o dedo indicador.

Tabela A.41 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo indicador.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-11,42	-34,72	16,52	100,00	Aberta	-2,66	-45,31	31,93	97,49
Dobrada	-0,47	-60,67	21,84	98,72	Dobrada	-17,12	-42,94	13,35	100,00
Cerrada	-6,86	-15,00	9,46	100,00	Cerrada	-12,19	-52,50	18,02	100,00
	-6,25	-60,67	21,84	99,57		-10,66	-52,50	31,93	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

A.4.3. Resultados das medições do dedo médio

Os resultados para as medições dos EDC Laterais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.47.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Dedo Médio

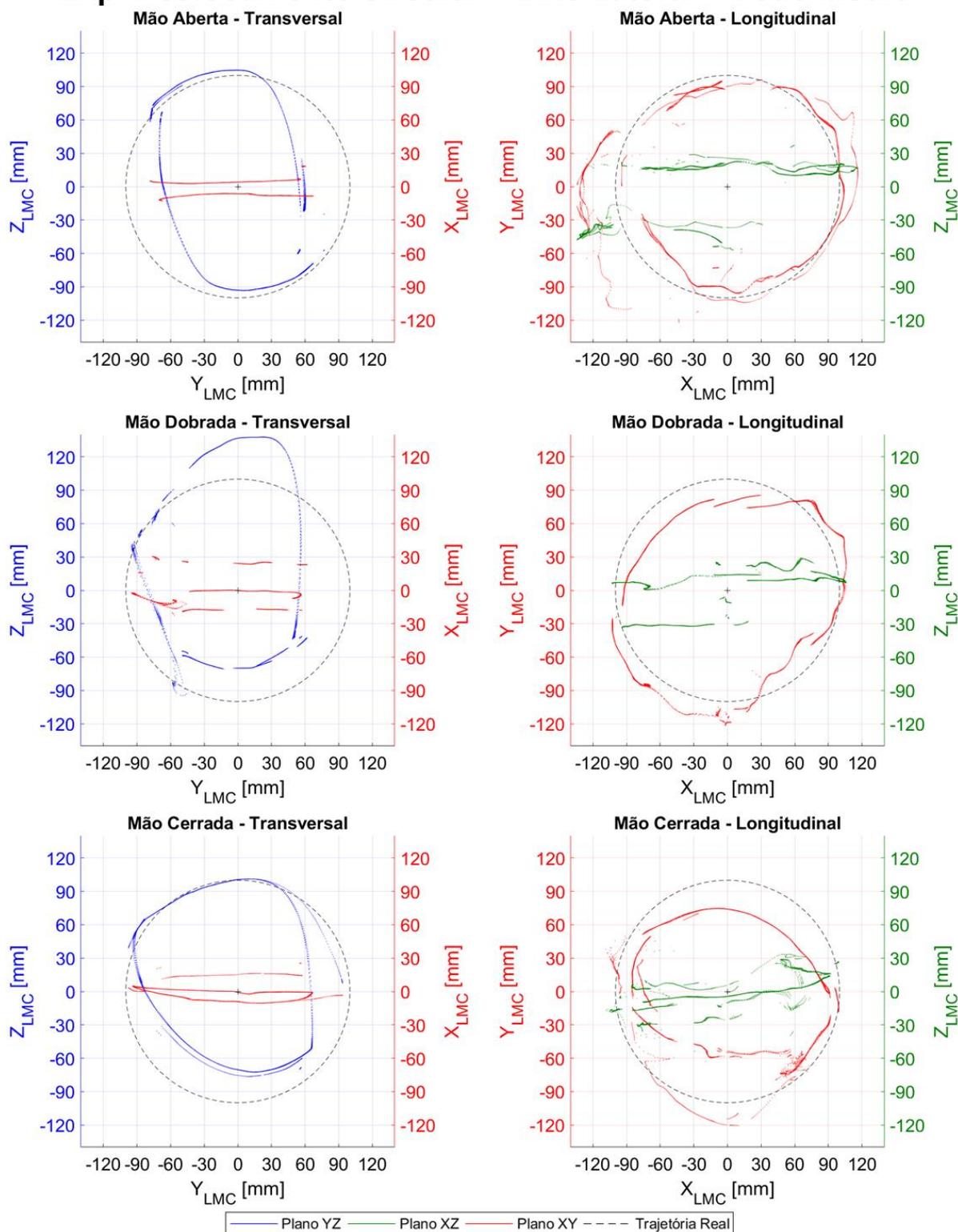


Figura A.47 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.42 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Laterais para o dedo médio.

Tabela A.42 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo médio.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-12,46	-45,81	6,03	100,00	Aberta	5,40	-28,12	51,85	100,00
Dobrada	-12,92	-45,58	40,09	100,00	Dobrada	-0,36	-23,31	22,08	100,00
Cerrada	-12,08	-35,25	5,95	97,47	Cerrada	-16,02	-46,50	21,16	100,00
	-12,48	-45,81	40,09	99,16		-3,66	-46,50	51,85	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Verticais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.48.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Vertical – Dedo Médio

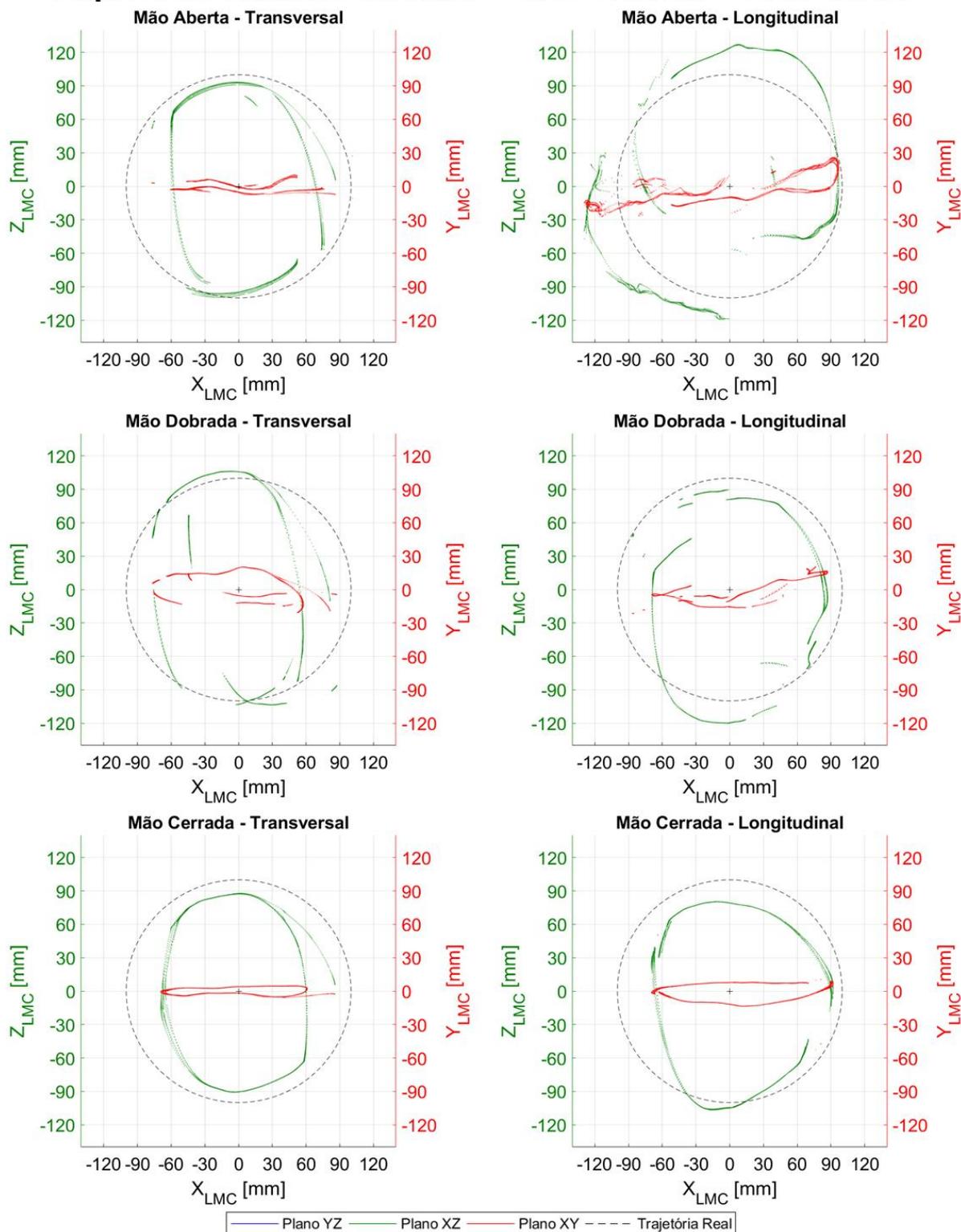


Figura A.48 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.43 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Verticais para o dedo médio.

Tabela A.43 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo médio.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-12,46	-42,55	5,26	100,00	Aberta	8,99	-58,54	38,58	100,00
Dobrada	-4,15	-53,37	23,24	100,00	Dobrada	-13,72	-42,82	21,44	100,00
Cerrada	-17,06	-40,38	-9,03	100,00	Cerrada	-14,41	-35,62	8,35	100,00
	-11,22	-53,37	23,24	100,00		-6,38	-58,54	38,58	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Frontais transversais e longitudinais para o dedo médio são mostrados na Fig. A.49.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Frontal – Dedo Médio

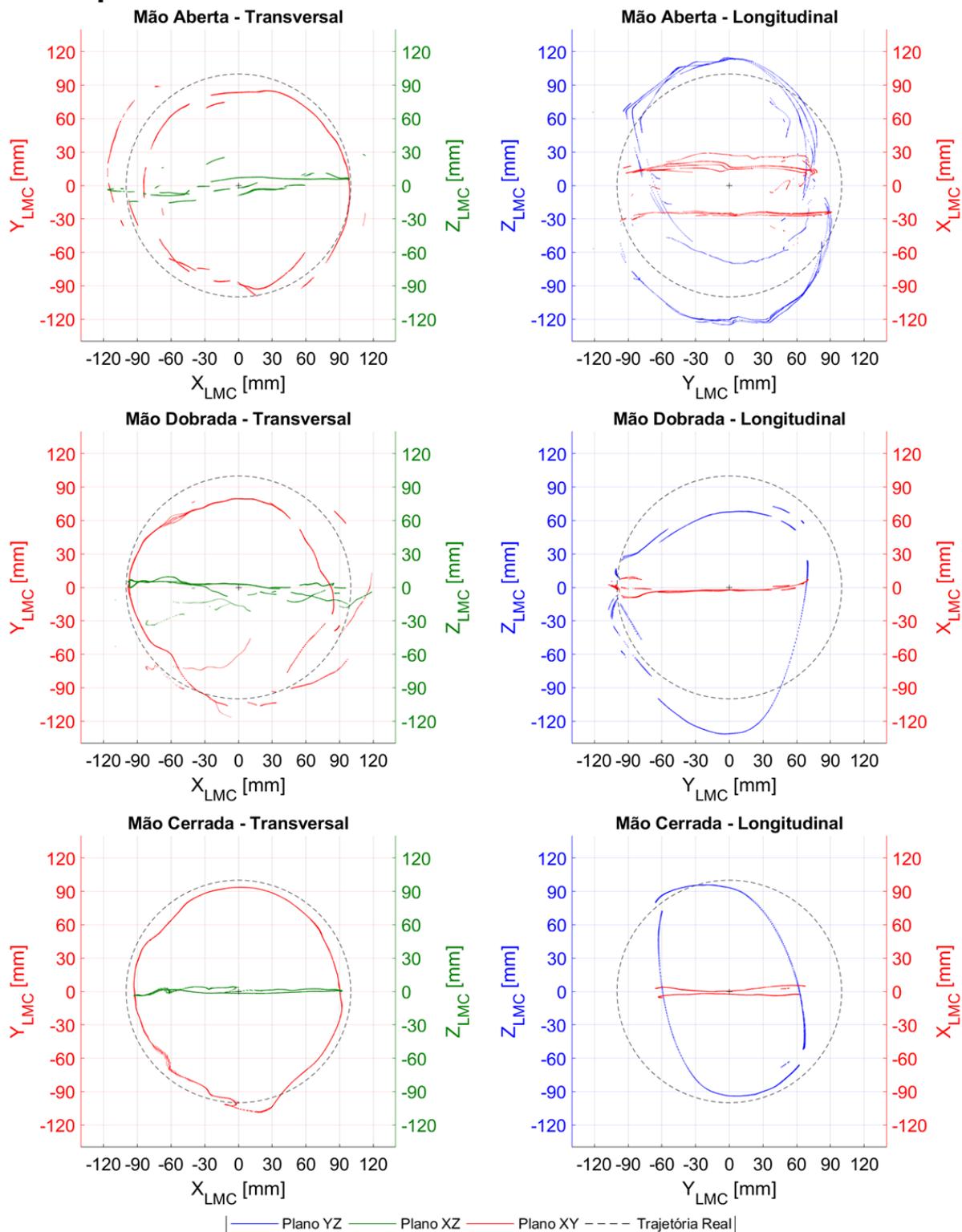


Figura A.49 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo médio.

Na Tabela A.44 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Frontais para o dedo médio.

Tabela A.44 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo médio.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-6,41	-27,23	20,22	100,00	Aberta	5,25	-41,96	49,12	97,49
Dobrada	-10,24	-48,19	22,15	98,72	Dobrada	-9,78	-33,19	31,69	100,00
Cerrada	-6,62	-14,55	10,51	100,00	Cerrada	-10,63	-41,49	5,30	100,00
	-7,76	-48,19	22,15	99,57		-5,05	-41,96	49,12	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

A.4.4. Resultados das medições do dedo anelar

Os resultados para as medições dos EDC Laterais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.50.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Dedo Anelar

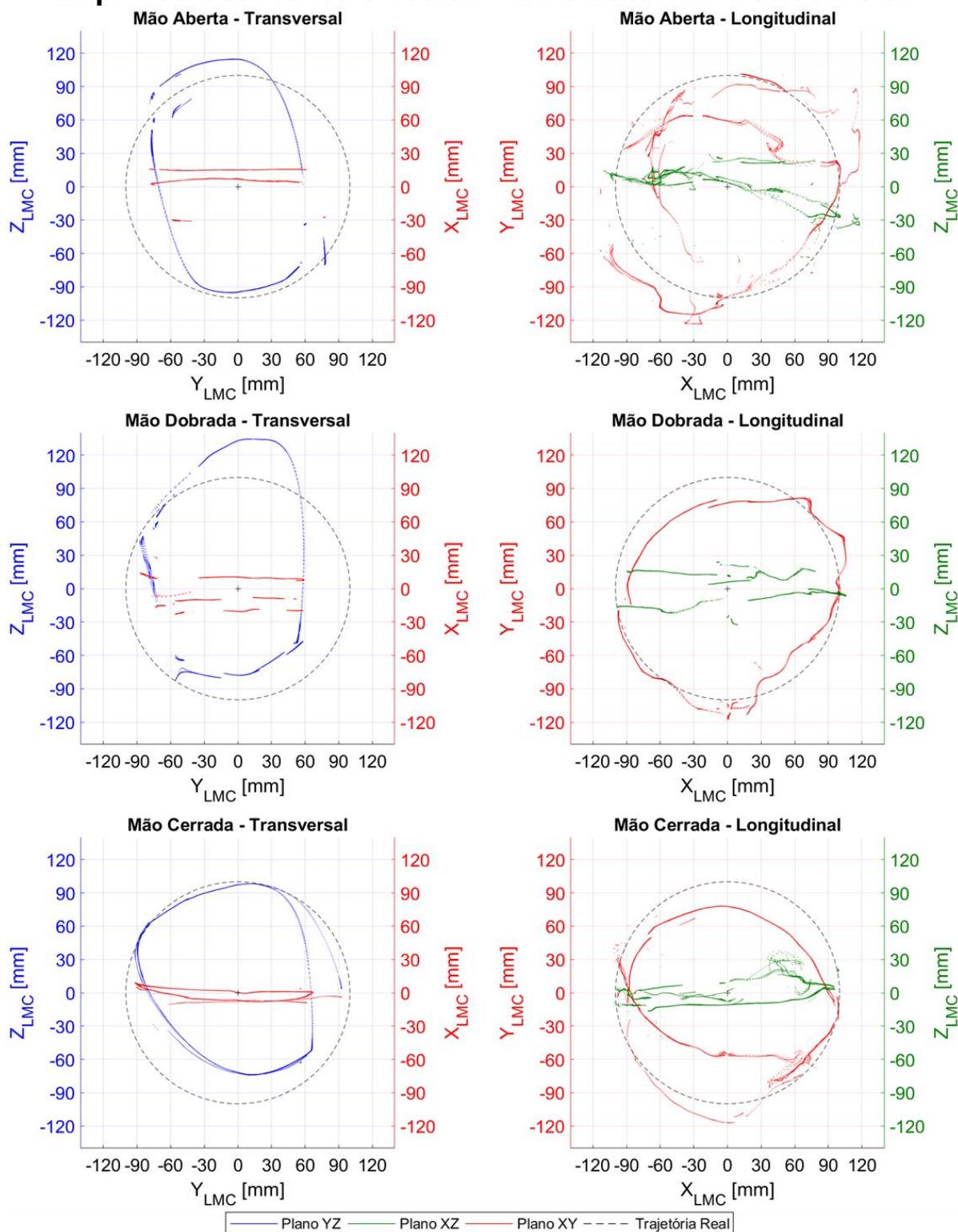


Figura A.50 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.45 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Laterais para o dedo anelar.

Tabela A.45 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo anelar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-4,43	-39,55	16,66	100,00	Aberta	-5,84	-50,86	47,40	100,00
Dobrada	-11,26	-41,93	36,99	100,00	Dobrada	-4,93	-26,68	18,34	100,00
Cerrada	-13,68	-36,26	1,64	97,47	Cerrada	-14,98	-46,14	17,11	100,00
	-9,79	-41,93	36,99	99,16		-8,58	-50,86	47,40	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Verticais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.51.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Vertical – Dedo Anelar

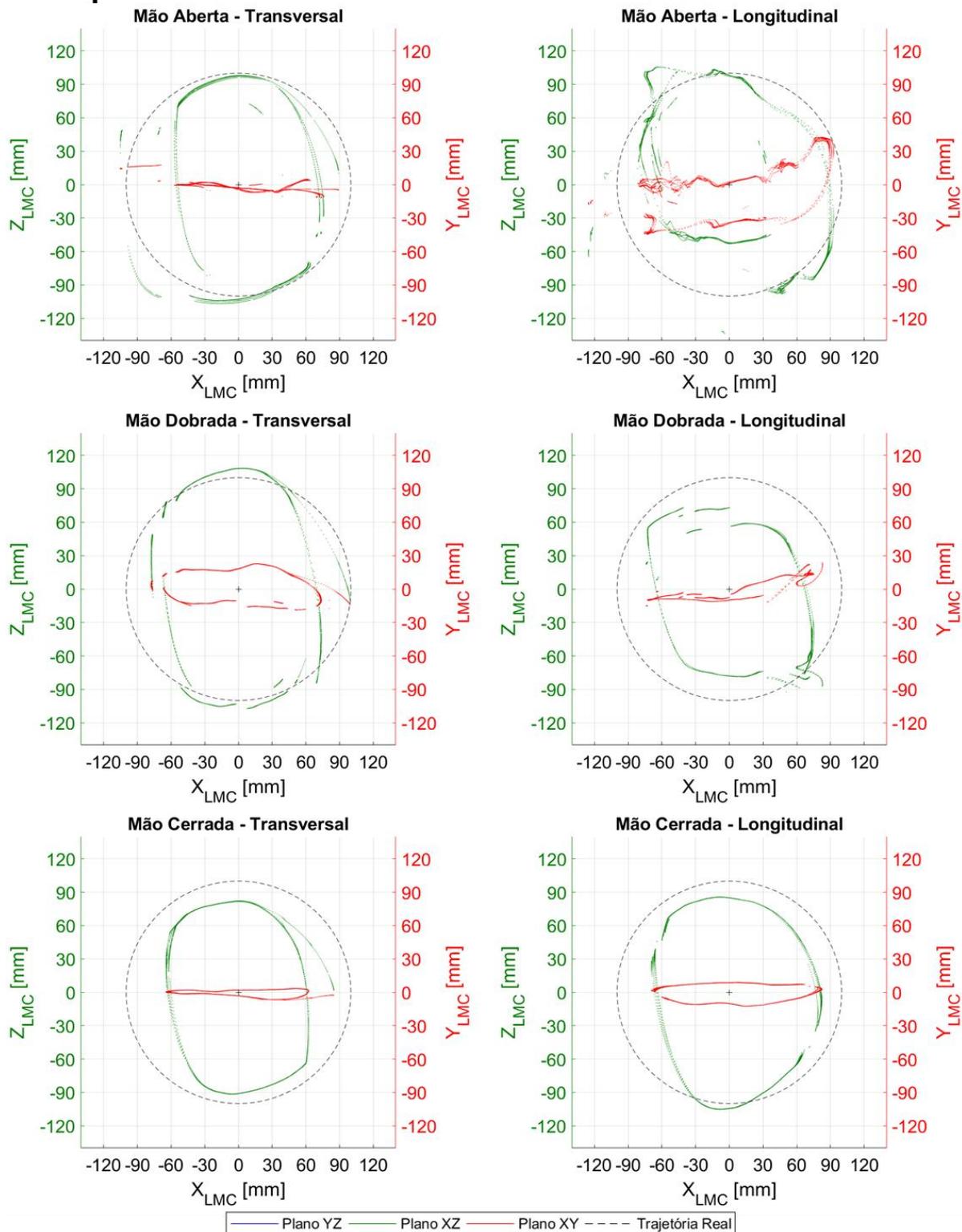


Figura A.51 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.46 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Verticais para o dedo anelar.

Tabela A.46 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo anelar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-6,97	-58,58	26,45	100,00	Aberta	-6,32	-51,99	41,77	100,00
Dobrada	-1,64	-34,80	10,61	100,00	Dobrada	-15,95	-43,45	22,47	100,00
Cerrada	-18,26	-40,58	-8,11	100,00	Cerrada	-13,89	-37,35	6,17	100,00
	-8,96	-58,58	26,45	100,00		-12,06	-51,99	41,77	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Frontais transversais e longitudinais para o dedo anelar são mostrados na Fig. A.52.

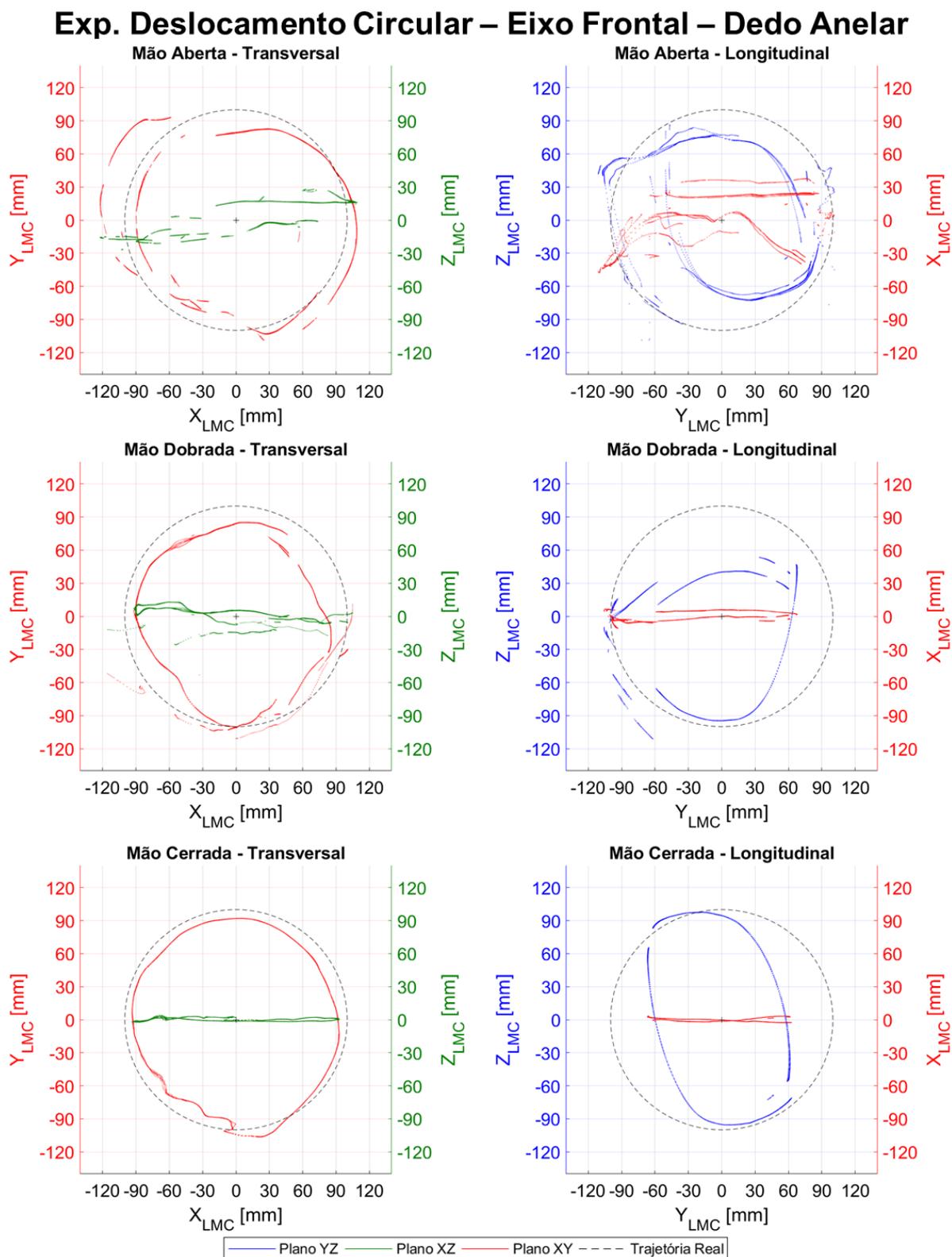


Figura A.52 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo anelar.

Na Tabela A.47 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Frontais para o dedo anelar.

Tabela A.47 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo anelar.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	1,62	-41,29	26,95	100,00	Aberta	-9,02	-54,59	31,20	97,49
Dobrada	-12,47	-35,37	27,15	98,72	Dobrada	-22,51	-60,83	27,35	100,00
Cerrada	-7,10	-15,83	9,05	100,00	Cerrada	-9,87	-43,86	5,75	100,00
	-5,99	-41,29	27,15	99,57		-13,80	-60,83	31,20	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

A.4.5. Resultados das medições do dedo mínimo

Os resultados para as medições dos EDC Laterais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.53.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Lateral – Dedo Mínimo

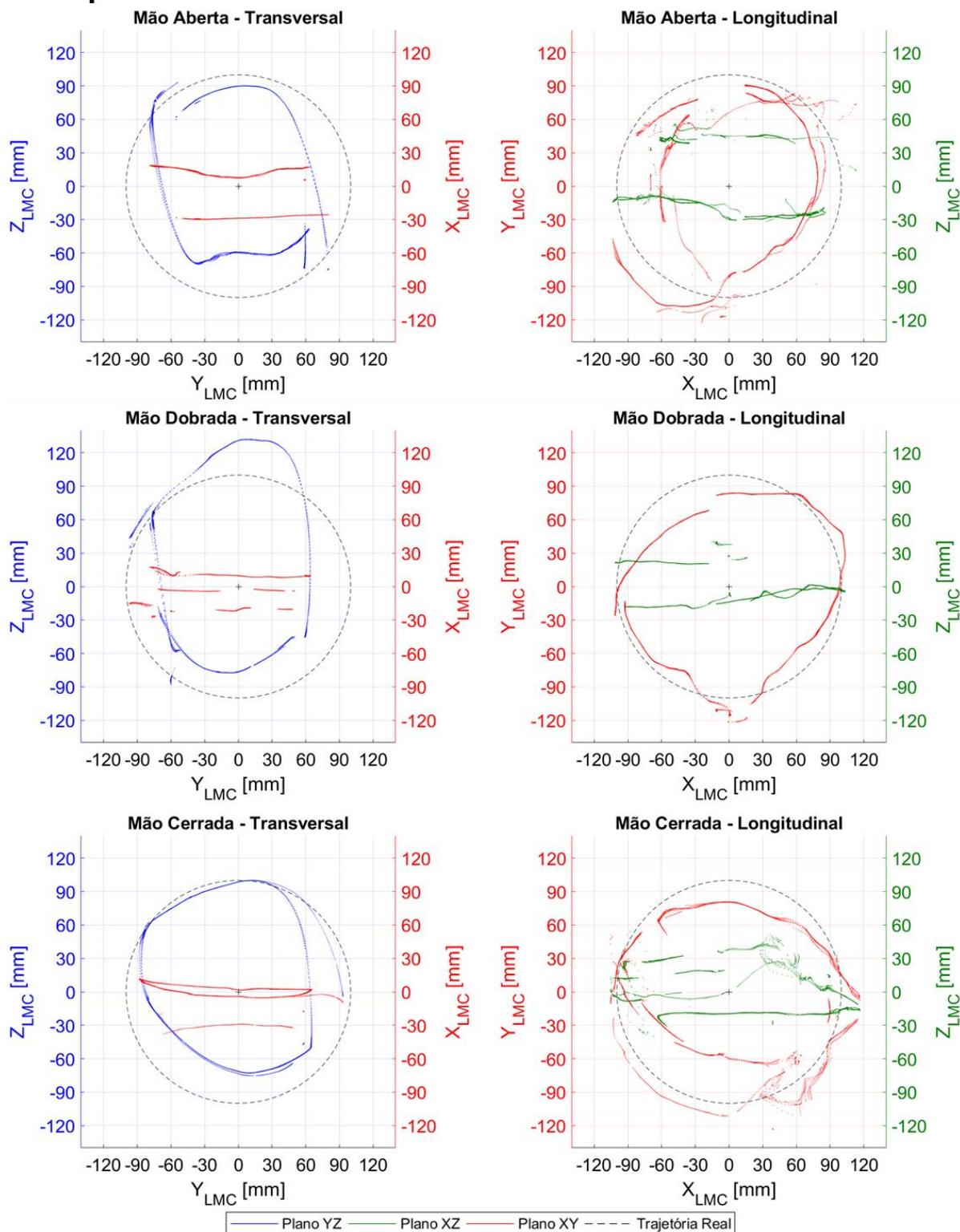


Figura A.53 – EDC Lateral – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.48 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Laterais para o dedo mínimo.

Tabela A.48 - Resultados dos EDC Lateral para o dedo mínimo.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-12,06	-40,69	12,60	100,00	Aberta	-7,66	-28,09	35,84	100,00
Dobrada	-11,76	-35,69	33,71	100,00	Dobrada	-5,45	-26,63	24,82	100,00
Cerrada	-14,38	-36,31	2,39	97,47	Cerrada	-7,31	-61,92	32,77	100,00
	-12,73	-40,69	33,71	99,16		-6,81	-61,92	35,84	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Verticais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.54.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Vertical – Dedo Mínimo

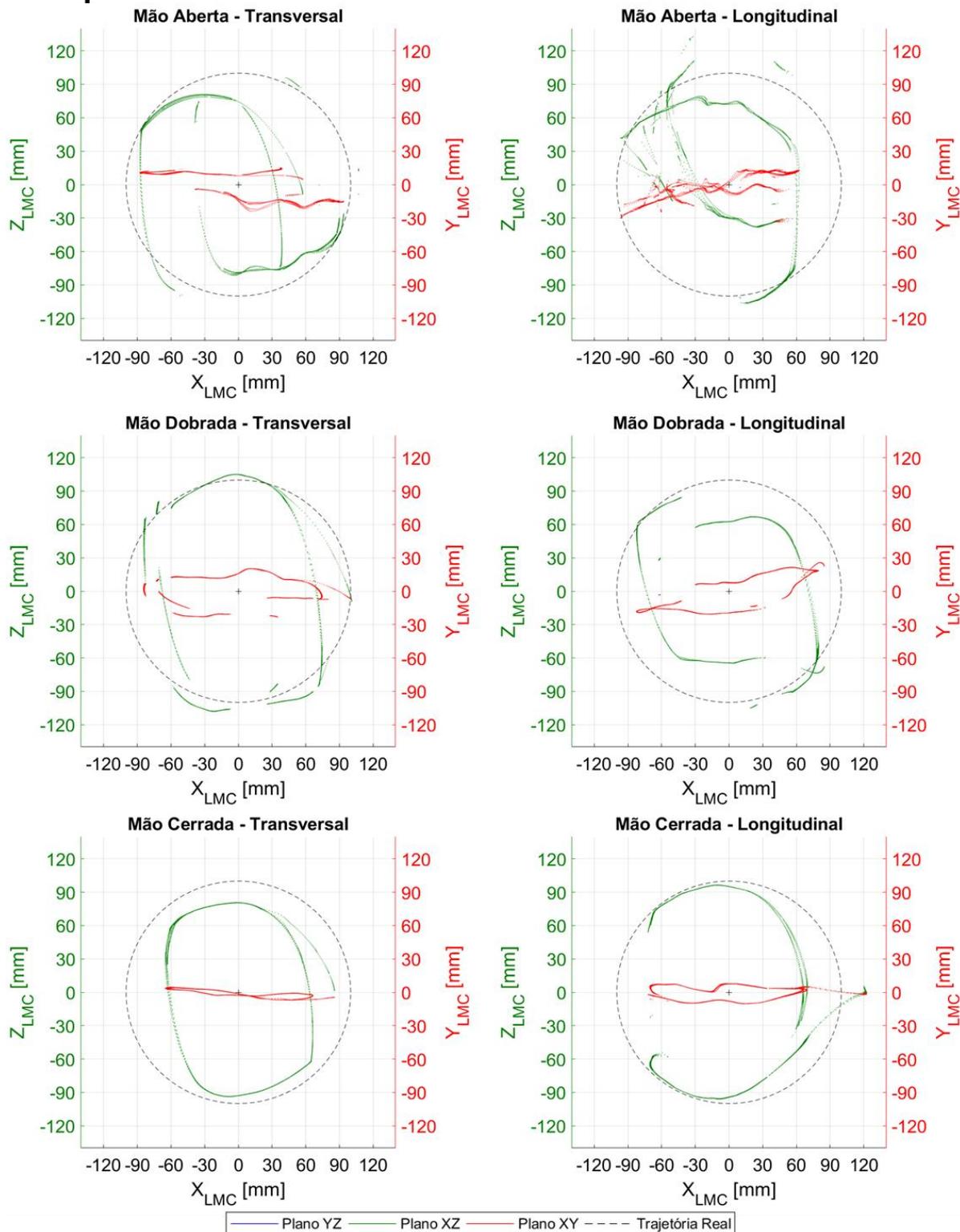


Figura A.54 – EDC Vertical – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.49 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Verticais para o dedo mínimo.

Tabela A.49 - Resultados dos EDC Vertical para o dedo mínimo.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-12,85	-65,49	13,35	100,00	Aberta	-19,20	-77,25	36,76	100,00
Dobrada	0,21	-33,21	12,83	100,00	Dobrada	-11,36	-37,23	12,30	100,00
Cerrada	-16,79	-39,77	-5,58	100,00	Cerrada	-9,17	-34,68	22,69	100,00
	-9,81	-65,49	13,35	100,00		-13,24	-77,25	36,76	100,00
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

Os resultados para as medições dos EDC Frontais transversais e longitudinais para o dedo mínimo são mostrados na Fig. A.55.

Exp. Deslocamento Circular – Eixo Frontal – Dedo Mínimo

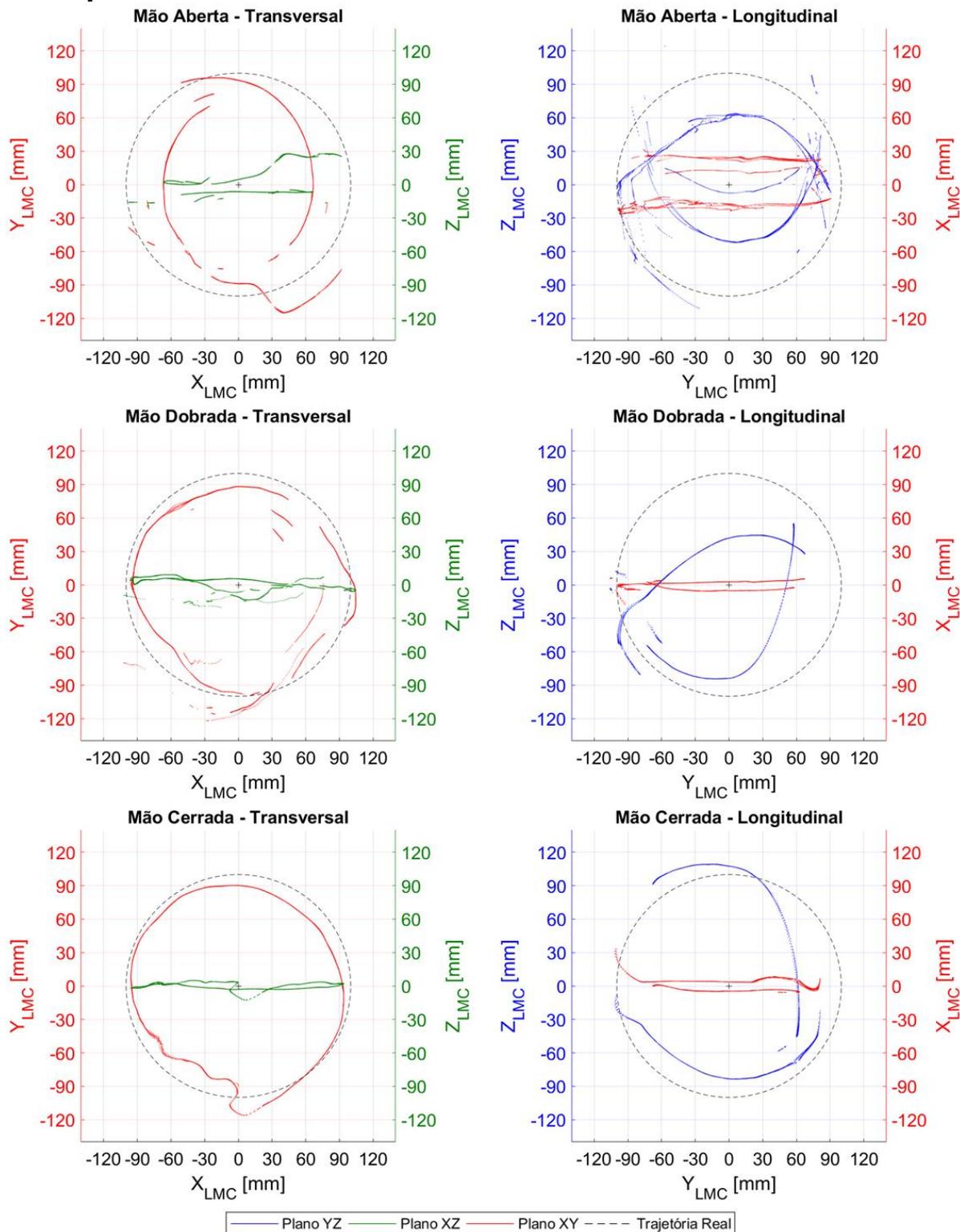


Figura A.55 – EDC Frontal – Posições relativas do dedo mínimo.

Na Tabela A.50 são apresentados o erro médio, mínimo e máximo calculados nos EDC Frontais para o dedo mínimo.

Tabela A.50 - Resultados dos EDC Frontal para o dedo mínimo.

Disposição Transversal					Disposição Longitudinal				
Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]	Mão	\bar{E} [mm]	E_{min} [mm]	E_{max} [mm]	V[%]
Aberta	-15,14	-33,90	25,93	100,00	Aberta	-25,28	-85,63	38,94	97,49
Dobrada	-7,82	-44,08	25,97	98,72	Dobrada	-26,14	-61,25	13,18	100,00
Cerrada	-6,78	-20,75	17,15	100,00	Cerrada	-7,56	-39,50	15,72	100,00
	-9,91	-44,08	25,97	99,57		-19,66	-85,63	38,94	99,16
	*	**	***	*		*	**	***	*

* Valores médios para o erro médio, porcentagem de frames válidos e frames por segundo

** Valores mínimos para o erro mínimo

*** Valores máximos para o erro máximo

A.4.6. Conclusões sobre os experimentos de deslocamento circular para os dedos da mão

Analisando os gráficos gerados nos experimentos de deslocamento angular para os dedos da mão, é possível observar a ocorrência de diversas discontinuidades nas trajetórias. Acredita-se que a causa deste fenômeno seja um embaralhamento nas leituras dos dedos. O embaralhamento acontece quando o LMC confunde a leitura dos dedos, atribuindo os parâmetros lidos em um dedo para outro. Acredita-se que isto possa ter ocorrido pelo fato da pose da mão de madeira manter os dedos próximos uns dos outros.