

TRABALHO DE *GRADUAÇÃO*

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
ROBÓTICA PARA GUIAGEM DE AGULHAS
FLEXÍVEIS EM PROCEDIMENTOS CIRÚRGICOS
USANDO O MÉTODO DE MICROPASSOS**

Por,
André Augusto Geraldês

Brasília, outubro de 2012



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE *GRADUAÇÃO*

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
ROBÓTICA PARA GUIAGEM DE AGULHAS
FLEXÍVEIS EM PROCEDIMENTOS CIRÚRGICOS
USANDO O MÉTODO DE MICROPASSOS**

Por,
André Augusto Geraldês

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Antônio Padilha Lanari Bó, ENE/UnB

Orientador

Prof. João Luiz A. de Carvalho, ENE/UnB

Examinador interno

Prof. Rogério de Almeida Richa, INCoD/UFSC

Examinador externo

Brasília, outubro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

ANDRÉ, AUGUSTO GERALDES

Desenvolvimento de uma plataforma robótica para guiagem de agulhas flexíveis em procedimentos cirúrgicos usando o método de micropassos ,

[Distrito Federal] 2012.

x, (num_de_pags)p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2012). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1. Guiagem de Agulha

2.Robótica Cirúrgica

3. ???

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GERALDES, A. A., (2012). Desenvolvimento de uma plataforma robótica para guiagem de agulhas flexíveis em procedimentos cirúrgicos usando o método de micropassos. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-n°022, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, (num_de_pags)p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: André Augusto Geraldês

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Desenvolvimento de uma plataforma robótica para guiagem de agulhas flexíveis em procedimentos cirúrgicos usando o método de micropassos

GRAU: Engenheiro

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

André Augusto Geraldês

SQSW 105 Bloco G Apartamento 509 - Sudoeste.

70670-427 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

André Augusto Geraides

Agradecimentos

André Augusto Geraldes

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma plataforma robótica de guiagem de agulhas flexíveis, baseada no método de micropasso. Para isso desenvolve-se um novo dispositivo de inserção capaz de realizar a guiagem de forma discretizada. Tal dispositivo conta com um robô manipulador, cujo o controle também é apresentado. Para validar o sistema desenvolvido, realizam-se experimentos qualitativos e quantitativos, estudando-se a capacidade do mecanismo de micropasso de superar as desvantagens dos outros dispositivos. Os resultados obtidos mostram que o método de inserção por micropasso funciona e pode apresentar grandes vantagens em relação a outros métodos de guiagem de agulhas flexíveis, uma vez que mesmo experimentos realizados com um protótipo proporcionaram resultados satisfatórios.

Palavras Chave: Guiagem de Agulha, Robótica Cirúrgica, ???.

ABSTRACT

In this work, we present a needle steering robotic platform, based on microstepping. To achieve that a new insertion device is developed, enabling to perform insertions in a discrete way. Such device uses a manipulator robot, whose cartesian control is also presented. In order to validate the system, both qualitative and quantitative experiments are performed, evaluating the ability of the proposed device of overcoming the problems presented by other devices. The results show that the proposed method works and can provide great advantages in respect to other needle steering methods.

Keywords: Needle Steering, Surgical Robotics, ???

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.2 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 3 |
| 1.3 | OBJETIVOS DO PROJETO | 4 |
| 1.4 | APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO | 5 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 7 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 7 |
| 2.2 | GUIAGEM DE AGULHAS FLEXÍVEIS | 7 |
| 2.2.1 | MODELAGEM DO MOVIMENTO DA AGULHA | 7 |
| 2.2.2 | MÉTODOS DE INSERÇÃO | 9 |
| 2.2.3 | DISPOSITIVOS DE INSERÇÃO | 11 |
| 2.2.4 | CARACTERÍSTICAS DA AGULHA E DO TECIDO | 13 |
| 2.3 | CONTROLE CARTESIANO DE ROBÔS MANIPULADORES | 14 |
| 2.3.1 | REPRESENTAÇÃO DA POSE | 14 |
| 2.3.2 | CINEMÁTICA DIRETA | 15 |
| 2.3.3 | CINEMÁTICA DIFERENCIAL | 16 |
| 2.3.4 | CINEMÁTICA DIFERENCIAL INVERSA | 17 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 18 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 3.2 | O CONCEITO DE INSERÇÃO POR MICROPASSOS | 19 |
| 3.3 | O MECANISMO DE INSERÇÃO FABRICADO | 20 |
| 3.3.1 | REQUISITOS DO PROJETO | 21 |
| 3.3.2 | PROJETO INICIAL | 22 |
| 3.3.3 | PRIMEIRA FABRICAÇÃO | 22 |
| 3.3.4 | ADAPTAÇÃO DO PROJETO | 23 |
| 3.3.5 | FABRICAÇÃO FINAL DO MECANISMO | 25 |
| 3.4 | O MANIPULADOR UTILIZADO | 27 |
| 3.4.1 | MODELO CINEMÁTICO | 28 |
| 3.4.2 | MODELO CINEMÁTICO ALTERADO (6-DOF) | 30 |
| 3.5 | O CONTROLE DO MANIPULADOR | 31 |
| 3.5.1 | ROS | 32 |
| 3.5.2 | PACOTE <i>schunk_low</i> | 33 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.5.3 | PACOTE <i>schunk_high</i> | 36 |
| 3.5.4 | PACOTE <i>schunk_joy</i> | 37 |
| 3.5.5 | PACOTE <i>schunk_needle</i> | 38 |
| 4 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 42 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 42 |
| 4.2 | SETUP EXPERIMENTAL..... | 42 |
| 4.3 | EXPERIMENTOS PRELIMINARES | 45 |
| 4.4 | EXPERIMENTO DE FLAMBAGEM | 47 |
| 4.5 | EXPERIMENTO DE TORÇÃO | 48 |
| 4.6 | EXPERIMENTO DE REPETIBILIDADE | 50 |
| 4.7 | ANÁLISE DOS DADOS..... | 52 |
| 5 | CONCLUSÕES | 54 |
| 5.1 | PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS | 54 |
| 5.2 | PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS..... | 55 |
| 5.3 | TRABALHOS FUTUROS | 55 |
| | PUBLICAÇÕES | 56 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 57 |
| | ANEXOS | 60 |
| I | DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO DVD | 61 |
| II | ESQUEMÁTICOS MECÂNICOS | 62 |
| III | MONTAGEM E DESMONTAGEM DO MANIPULADOR SCHUNK | 69 |
| III.1 | CONEXÕES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DOS MÓDULOS PRL..... | 69 |
| III.2 | ACESSO À PLACA DE CONTROLE | 71 |
| III.3 | DESMONTAGEM DOS MÓDULOS PARA ALTERAR A CONFIGURAÇÃO DO ROBÔ . | 73 |
| IV | DOCUMENTAÇÃO AUTOMÁTICA USANDO ROS | 74 |
| IV.1 | COMANDO <i>roscap record</i> | 74 |
| IV.2 | COMANDO <i>roscap play</i> | 75 |
| IV.3 | PACOTE <i>schunk_bags</i> | 78 |
| V | TELEOPERAÇÃO DO MANIPULADOR UTILIZANDO O KINECT | 79 |
| V.1 | INTERFACE COM O SENSOR KINECT..... | 79 |
| V.2 | TELEOPERAÇÃO INTUITIVA USANDO AS MÃOS..... | 81 |
| V.3 | VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL..... | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Comparação entre uma cirurgia minimamente invasiva e uma cirurgia aberta. | 1 |
| 1.2 | Inserção de agulha de ponta assimétrica no tecido produzindo uma trajetória curvilínea. Fonte: [1] (Adaptado)..... | 2 |
| 1.3 | Sistema robótico completo para guiagem de agulhas flexíveis. Fonte: [1] (Adaptado) . | 4 |
| 1.4 | Dispositivos de inserção de agulha existentes. Fonte: [2] | 5 |
| 1.5 | <i>Dispositivo de Inserção por Micropassos</i> | 6 |
| 2.1 | Representação do movimento da agulha pelo modelo uniciclo. Fonte : [2]..... | 8 |
| 2.2 | Efeito de rigidez torcional na agulha quando rotacionada dentro do tecido. Fonte: [3] | 9 |
| 2.3 | Métodos de inserção para agulhas flexíveis..... | 10 |
| 2.4 | Métodos alternativos de inserção envolvendo manuseio da agulha e do tecido. Fonte : [4] | 11 |
| 2.5 | Modelo CAD do <i>Dispositivo de Roletes</i> . Fonte : [5] | 11 |
| 2.6 | Modelo CAD do <i>Dispositivo de Antena Telescópica</i> . Fonte : [5]..... | 12 |
| 2.7 | Diferentes tipos de pontas de agulha. Fonte: [6] (Adaptado)..... | 13 |
| 2.8 | Posição e orientação de um corpo rígido. Fonte: [7] | 14 |
| 2.9 | Cinemática Direta obtida pela multiplicação em sequencia das das transformações de pose de um elo ao outro do manipulador. Fonte: [7] | 16 |
| 3.1 | Principais elementos de uma plataforma de guiagem de agulha (os elementos destacados correspondem ao foco deste trabalho). | 18 |
| 3.2 | Etapas de um micropasso. (a) Segurando a agulha; (b) Inserindo a agulha; (c) Soltando a agulha; (d) Retrocedendo à posição inicial. Fonte : [2] | 20 |
| 3.3 | Furos para parafusos M4 na garra PG 070 do manipulador | 21 |
| 3.4 | Projeto inicial do mecanismo de inserção por micropasso..... | 23 |
| 3.5 | Primeira fabricação das peças fixas do mecanismo de inserção por micropasso..... | 24 |
| 3.6 | Projeto final do mecanismo de inserção por micropasso, utilizando eixos roscados. | 25 |
| 3.7 | Mecanismo de inserção por micropasso fabricado após as alterações de projeto. | 26 |
| 3.8 | Vista das peças utilizadas na montagem do mecanismo de inserção por micropasso. ... | 26 |
| 3.9 | Manipulador modular Schunk LWA3, com 7 graus de liberdade..... | 27 |
| 3.10 | Placa de interface para alimentação e controle do robô..... | 28 |
| 3.11 | Esquemático mecânico do manipulador Schunk, mostrando os sistemas de coordenadas associados a cada uma das juntas. Fonte : [8] | 29 |
| 3.12 | Manipulador Schunk em configuração modificada (6-DOF). | 31 |
| 3.13 | Organização dos pacotes presentes na stack <i>schunk</i> | 33 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.14 | Diagrama simplificado da lógica utilizada pelos controladores cartesianos. Fonte: [9] | 37 |
| 3.15 | Joystick USB utilizado para se teleoperar o manipulador Schunk..... | 38 |
| 3.16 | Representação do movimento do manipulador através de um modelo planar de 2-DOF. | 39 |
| | | |
| 4.1 | Agulha de Nitinol com chanfro de 5° e dobra na ponta | 43 |
| 4.2 | Setup experimental utilizado | 44 |
| 4.3 | Ajuste fino da posição da armação metálica do dispositivo de inserção por micropasso | 44 |
| 4.4 | Relação $\Delta D \times \Delta H$ para movimentos realizados perto do ponto de operação $\theta_i = 152.8^\circ$ | 45 |
| 4.5 | Inserção simples, realizada por sucessivos micropassos sem rotação | 46 |
| 4.6 | Inserção desviando de obstáculos, alternando-se entre micropassos e rotações de 180° | 47 |
| 4.7 | Flambagem da agulha durante o primeiro micropasso de uma inserção | 48 |
| 4.8 | Trajетórias real e esperada da agulha no experimento de torção | 50 |
| 4.9 | Sobreposição das trajetórias obtidas no experimento de repetibilidade | 52 |
| | | |
| II.1 | Esquemático da armação metálica - montagem das peças | 62 |
| II.2 | Esquemático da armação metálica - peças anterior, posterior e interiores | 63 |
| II.3 | Esquemático da armação metálica - peças superior e inferior | 64 |
| II.4 | Esquemático do suporte de fixação da armação - peça posterior (fixada à garra) | 65 |
| II.5 | Esquemático do suporte de fixação da armação - peça anterior (fixada à armação).... | 66 |
| II.6 | Esquemático do extensor da garra | 67 |
| II.7 | Esquemático dos fulcros..... | 68 |
| | | |
| III.1 | Esquemático mecânico de um módulo PRL. Fonte: [10] | 69 |
| III.2 | Encaixes mecânicos de um módulo PRL. Fonte: [11] | 70 |
| III.3 | Esquemático elétrico de montagem dos módulos PRL em série. Fonte: [11] | 70 |
| III.4 | Conexões elétricas de um módulo PRL | 71 |
| III.5 | Tampa removível no elemento de conexão, que permite acesso direto ao módulo PRL | 72 |
| III.6 | Placas de controle acessíveis por meio das tampas removíveis dos elementos de conexão | 72 |
| III.7 | Extensores dos cabos do barramento elétrico, necessários na configuração modificada do manipulador | 73 |
| | | |
| IV.1 | Utilização do comando <i>rosgag</i> em modo <i>record</i> (Figura gerada à partir do comando <i>rxgraph</i>)..... | 75 |
| IV.2 | Interface gráfica do comando <i>rxbag</i> para visualização dos dados armazenados em um arquivo <i>bag</i> | 76 |
| IV.3 | Recebimento de uma mensagem da perspectiva do nó receptor | 76 |
| IV.4 | Experimento de guiagem de agulha com rastreamento online | 77 |
| IV.5 | Experimento de guiagem de agulha com rastreamento offline | 77 |
| | | |
| V.1 | Sensor Kinect utilizado para rastrear a posição da mão do operador | 79 |
| V.2 | Pontos característicos do corpo da pessoa detectados pelo nó <i>do pacote</i> <i>openni_tracker</i> | 80 |
| V.3 | Pacote <i>schunk_kinect</i> utilizado para o controle cartesiano do efetuador do robô..... | 80 |
| V.4 | Experimento de teleoperação controlando o manipulador com o movimento das mãos. Fonte: [9] | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Parâmetros DH do manipulador Schunk..... | 30 |
| 3.2 | Parâmetros DH do manipulador Schunk em configuração modificada (6-DOF)..... | 31 |
| 3.3 | Funções de acionamento dos módulos Schunk PRL | 34 |
| 3.4 | Parâmetros configuráveis do controlador embarcado dos módulos Schunk PRL..... | 34 |
| 3.5 | Serviços disponíveis no nó <i>schunk_low_control</i> | 35 |
| 4.1 | Resultados do experimento de flambagem..... | 49 |
| 4.2 | Resultados do experimento de repetibilidade | 51 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

| | | |
|----------------|--|---------|
| v | Velocidade linear | [m/s] |
| ω | Velocidade angular | [rad/s] |
| l | Comprimento da agulha | [m] |
| lin | Comprimento da porção da agulha inserida no tecido | [m] |
| $lout$ | Comprimento da porção da agulha fora do tecido | [m] |
| $w(l,r)$ | Força aplicada pelo tecido sobre a agulha | [N] |
| $g(l,r)$ | Deflexão da agulha | [m] |
| κ | Curvatura | [1/m] |
| κ_{max} | Curvatura natural da agulha | [1/m] |

Subscritos

| | |
|-------|------------|
| tar | tarefa |
| ref | referência |
| $-$ | dual |
| i | inicial |

Sobrescritos

| | |
|-----------|---------------------------|
| \cdot | Varição temporal |
| \dagger | Pseudo-inversa amortecida |

Siglas

| | |
|------|---|
| CAN | Controller Area Network |
| DC | Ciclo de trabalho (Duty Cycle) |
| DH | Denavit-Hartenberg |
| DOF | Graus de liberdade (Degree of Freedom) |
| CNC | Controle Numérico Computadorizado |
| ICRA | International Conference on Robotics and Automation (Conferência Internacional de Robótica e Automação) |
| LARA | Laboratório de Automação e Robótica |
| LARS | Latin America Robotics Symposium (Simpósio Latino-Americano de Robótica) |
| PCI | Placa de Circuito Impresso |
| PID | Proporcional Integral e Derivativo (tipo de controlador) |
| ROS | Robot Operating System |
| SBR | Simpósio Brasileiro de Robótica |
| USB | Universal Serial Bus |

Capítulo 1

Introdução

*Begin at the beginning and go on till
you come to the end; then stop
Lewis Carroll*

1.1 Contextualização

Procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos são aqueles em que o acesso ao corpo do paciente é realizado por meio de pequenas incisões, com mínima agressão tecidual. O conceito surgiu na década de 70 com o uso da minilaparotomia para fins terapêuticos [12], mas ganhou grande destaque na década de 90 quando passou a ser utilizado em diversas áreas da medicina, como cardiologia, ortopedia e no tratamento de diversos tipos de cânceres e tumores [13–16]. Esta técnica se diferencia bastante da cirurgia convencional, na qual grandes incisões são realizadas no corpo do paciente, como ilustra a Figura 1.1¹.

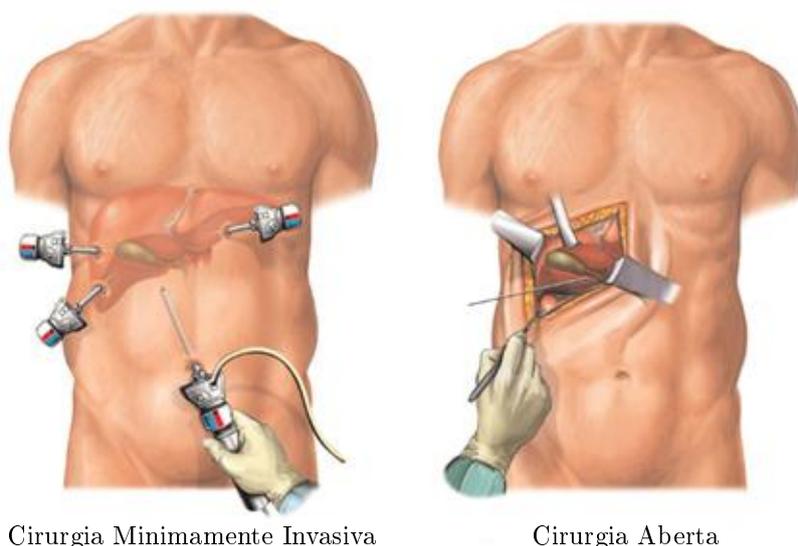


Figura 1.1: Comparação entre uma cirurgia minimamente invasiva e uma cirurgia aberta.

Muitas são as vantagens deste tipo de procedimento em relação à cirurgia aberta. Entre os principais benefícios estão: menor dano aos tecidos saudáveis, menor sangramento e risco de in-

¹Figura 1.1 extraída de <http://www.gallbladder-help.com/2010/08/laparoscopic-gallbladder-surgery/>

fecção, menor dor pós-operatória, redução no tempo de recuperação e de internação hospitalar e menor custo por operação. Entretanto, a complexidade de se realizar uma cirurgia minimamente invasiva é muito maior [1] e exige grande habilidade do cirurgião, devido à dificuldade de visualização, à falta de retorno tátil e à necessidade de se realizar movimentos muito precisos. Por este motivo, plataformas robóticas [13] vêm sendo utilizadas para auxiliar o cirurgião, com o objetivo de proporcionar maior conforto e segurança ao paciente.

Uma classe de procedimentos minimamente invasivos são as cirurgias percutâneas, que requerem a inserção de uma agulha através da pele do paciente até atingir uma posição alvo. Estas técnicas tem aplicações em biópsia, anestesia, coleta de sangue, neurocirurgia e braquiterapia [1]. Nestas situações, o posicionamento preciso da agulha é de vital importância, uma vez que um erro de posicionamento pode inutilizar o tratamento, além do risco de causar uma hemorragia, infecção ou outras complicações. Essa situação se torna crítica quando a posição alvo está localizada em regiões de difícil acesso, onde existam obstáculos no caminho da agulha, como órgãos importantes, vasos ou nervos.

Como forma de minimizar estes problemas, desenvolveram-se técnicas para guiar a agulha uma vez que ela esteja inserida no tecido. Uma delas utiliza agulhas com pontas assimétricas, de modo que a resultante das forças de interação com o tecido durante a inserção tenha uma componente radial, fazendo a agulha curvar levemente. Este fenômeno, ilustrado na Figura 1.2, pode ser intensificado utilizando-se agulhas muito finas e de material flexível, permitindo que trajetórias de maior curvatura sejam obtidas. Isso permite alcançar alvos que não possam ser acessados a partir de uma trajetória retilínea, desviando-se de áreas sensíveis ou impenetráveis.

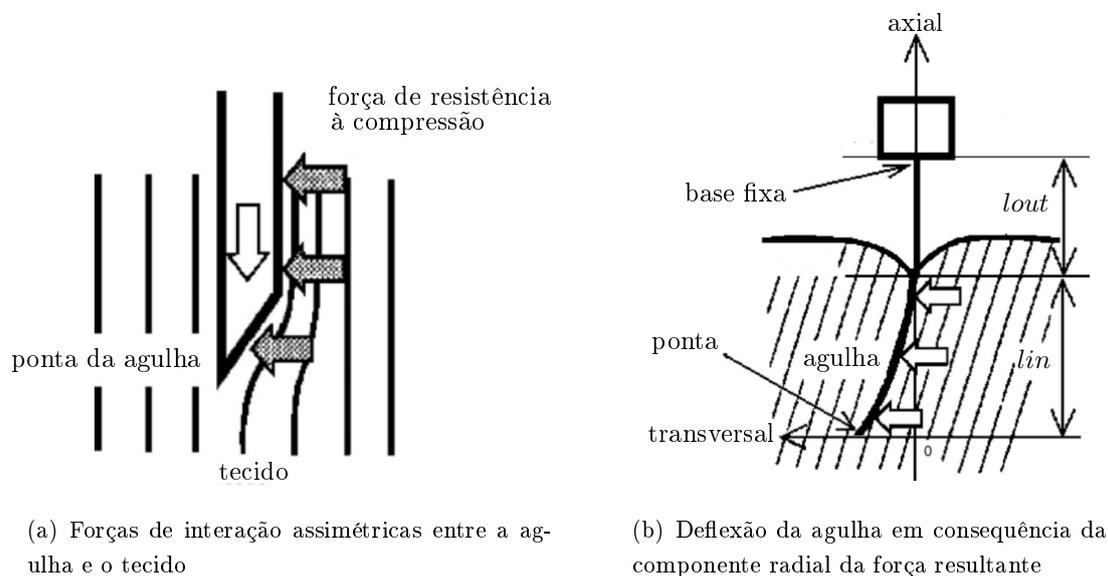


Figura 1.2: Inserção de agulha de ponta assimétrica no tecido produzindo uma trajetória curvilínea. Fonte: [1] (Adaptado)

Os primeiros trabalhos que propuseram o uso dessa técnica surgiram em 2003 e 2004, quando DiMaio [17] e Glozman [18] apresentaram modelos para a curvatura da agulha e formas de se fazer o controle de trajetória. Em 2006, Webster et al. [19] apresentaram um modelo mais simples para o problema e propuseram dois mecanismos capazes de realizar este tipo de inserção, o que permitiu

a realização de diversos trabalhos nesta área ao longo dos últimos 5 anos [6,20–25].

1.2 Definição do Problema

O problema de guiagem de agulhas flexíveis consiste basicamente em se controlar as velocidades de inserção v e rotação ω da agulha de modo a realizar o movimento desejado. Quando inserida sem rotação em um tecido uniforme, a tendência natural de uma agulha flexível de ponta assimétrica é curvar na direção de sua ponta, descrevendo uma trajetória de curvatura k aproximadamente constante. Quando rotacionada, a ponta da agulha tende a permanecer no mesmo ponto, variando apenas sua orientação, alterando-se assim o plano de curvatura. Quando inserção e rotação são aplicadas simultaneamente, a agulha descreve um movimento helicoidal no espaço 3D, sendo que o raio da hélice depende da razão v/ω . Dessa forma, é possível obter trajetórias complexas, controlando-se apenas dois graus de liberdade.

Conhecendo-se o modelo da agulha e do tecido, é possível determinar as velocidades de inserção e rotação necessárias para se alcançar a posição alvo, desviando de possíveis obstáculos. Para isso o controlador pode utilizar diversos algoritmos de planejamento de rotas. No entanto, devido a deformações e não-uniformidades no tecido de inserção, a curvatura da agulha pode não ser constante ao longo do processo, tornando necessário se rastrear a posição da agulha durante o procedimento de inserção. Por este motivo, sistemas de guiagem de agulha compreendem também equipamentos de imagens médicas como ultrassom, ressonância magnética ou fluoroscopia. A Figura 1.3 representa os elementos tipicamente envolvidos em um sistema completo de guiagem de agulha.

A construção de cada um destes elementos constitui um desafio diferente, fazendo com que a tarefa de guiagem de agulhas flexíveis seja bastante complexa. Um dos elementos de maior importância no sistema é o mecanismo de inserção de agulha utilizado, uma vez que o desempenho de tarefa é seriamente comprometido caso as velocidades de inserção e rotação da agulha não possam ser efetivamente controladas. Dadas as características mecânicas do sistema, como as dimensões da agulha e a natureza das forças de interação com o tecido, satisfazer esta condição nem sempre é uma tarefa trivial.

Até o presente momento, apenas dois dispositivos capazes de controlar v e ω (ilustrados na Figura 1.4) foram propostos. O *Dispositivo de Roletes*, apresentado por Webster et al. [19], é formado por um par de roletes atuados, responsáveis por controlar a velocidade de inserção, e um segundo motor que gira todo o subsistema de inserção, controlando assim a velocidade de rotação da agulha. Suas principais vantagens são a simplicidade e a compacidade do mecanismo. Apesar disso, ele apresenta problemas de escorregamento na direção de inserção e rotação indesejada da agulha, devido a falhas de alinhamento entre os dois roletes.

No caso do *Dispositivo de Antena Telescópica*, apresentado em [5], a agulha é diretamente conectada ao motor que controla a rotação, enquanto um outro motor translada todo o subsistema de rotação, controlando a velocidade de inserção. Utiliza-se também uma antena telescópica em volta da agulha, para evitar que ocorra flambagem. Por não haver movimento relativo entre a agulha e o dispositivo, o problema do escorregamento é drasticamente reduzido. Além disso este

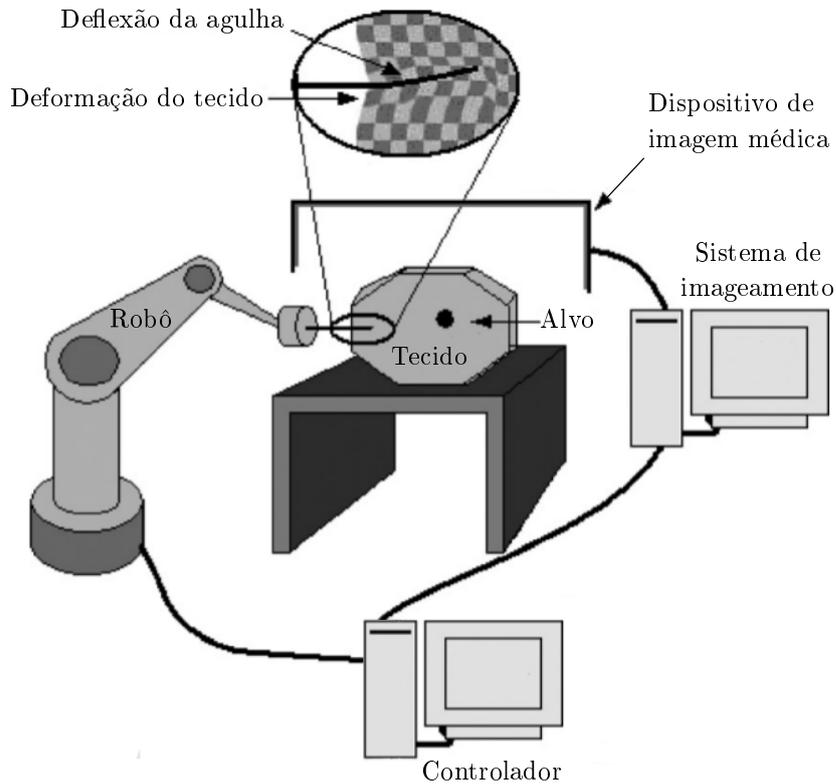


Figura 1.3: Sistema robótico completo para guiagem de agulhas flexíveis. Fonte: [1] (Adaptado)

dispositivo fornece mais precisão na rotação e possibilita a utilização de um sensor de força, o que não era possível no mecanismo anterior.

Por estes motivos, o sistema baseado em antena telescópica tornou-se o mecanismo padrão para inserção de agulhas flexíveis e vem sendo amplamente utilizado em trabalhos desenvolvidos na área [4, 22, 23, 26–28]. Entretanto, o fato da agulha ser atuada pela base, conseqüentemente distante do ponto de inserção, acarreta em outros problemas. Primeiramente apesar da antena telescópica aumentar a robustez do sistema, a flambagem ainda ocorre dentro do tubo, gerando incerteza na medida do comprimento de agulha inserido. Além disso, atuar a agulha pela base aumenta o efeito da rigidez torcional, fazendo com que a rotação aplicada não seja inteiramente transmitida à ponta da agulha, provocando assim uma defasagem na posição angular da ponta.

1.3 Objetivos do Projeto

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma plataforma robótica para guiagem de agulhas flexíveis, com o foco na elaboração de um novo mecanismo de inserção que solucione os problemas dos mecanismos atualmente existentes. Para isto, propõe-se um dispositivo que atue a agulha próxima do ponto de inserção, mas que seja capaz de soltá-la repetidamente para alterar o ponto de atuação. Tal dispositivo, como mostra a Figura 1.5, necessita de um conjunto de prensas, adicionando um grau de liberdade ao sistema, além de v e ω .

A ideia por trás deste novo mecanismo é discretizar o processo de inserção, dividindo-o em momentos em que a agulha está sendo inserida e momentos em que o dispositivo retrocede para

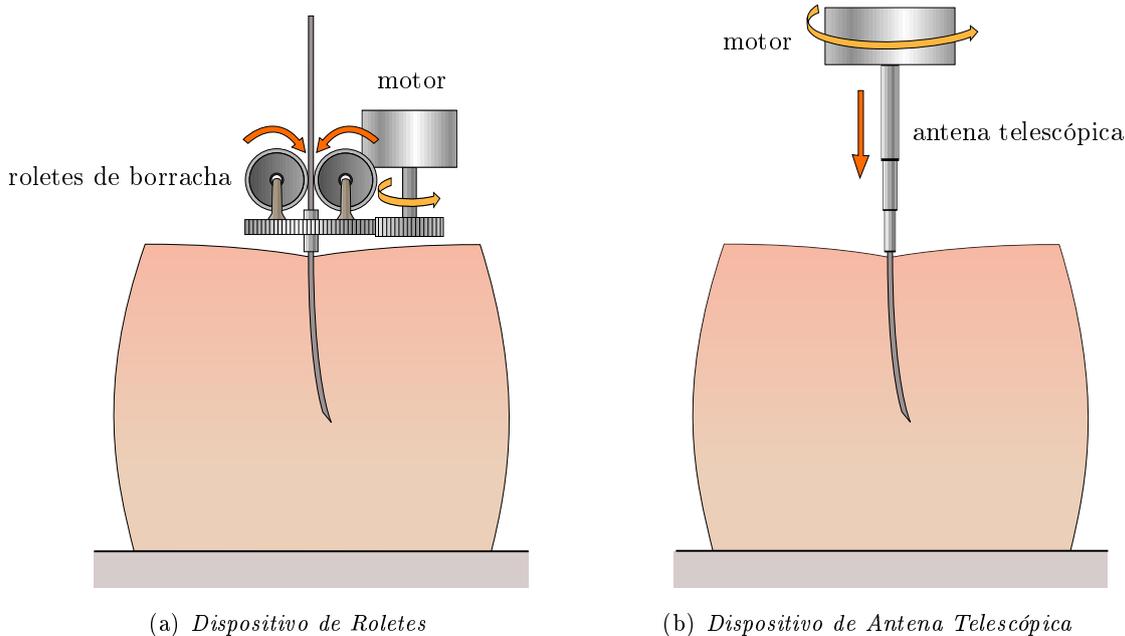


Figura 1.4: Dispositivos de inserção de agulha existentes. Fonte: [2]

recuar o ponto de atuação. Este sistema se inspira no movimento que um cirurgião normalmente faz, realizando inserções longas através de repetidos micropassos. Esta proposta requer não apenas a fabricação de tal mecanismo como também a implementação do controlador para realizar a inserção de forma discretizada.

Ao invés de construir um sistema dedicado de três graus de liberdade, optou-se aqui por utilizar um robô manipulador, visto que esta alternativa proporciona mais flexibilidade ao sistema, o que é de extremo interesse do ponto de vista de uma plataforma robótica de pesquisa. À partir do controle cartesiano do manipulador é possível se comandar v e ω de forma simples, sendo apenas necessário produzir-se um mecanismo que se acople ao efetador do robô. Esta foi a alternativa adotada nos trabalhos de Bernardes et al. [22, 29], aos quais buscamos dar continuidade. Para realizar o controle do manipulador, utilizou-se o modelo de quatérnions duais, proposto em [30], dando também continuidade aos trabalhos de Marinho [8].

De uma forma mais geral, o objetivo deste trabalho é também desenvolver uma plataforma robusta de pesquisa na área de guiagem de agulhas flexíveis no LARA. Em função disso algumas escolhas são feitas priorizando o desenvolvimento da plataforma a médio prazo e a continuidade do trabalho.

1.4 Apresentação do Manuscrito

Este manuscrito descreve as atividades realizadas pelo autor durante este Trabalho de Graduação, como parte do projeto de guiagem de agulhas flexíveis no LARA. Durante o desenvolvimento contou-se com a colaboração de Murilo Marinho, estudante de mestrado que também participa do projeto. Suas contribuições auxiliaram todo o trabalho de modo geral, principalmente em relação ao controle cartesiano do manipulador (que já havia sido modelado em [8]) e à realização dos

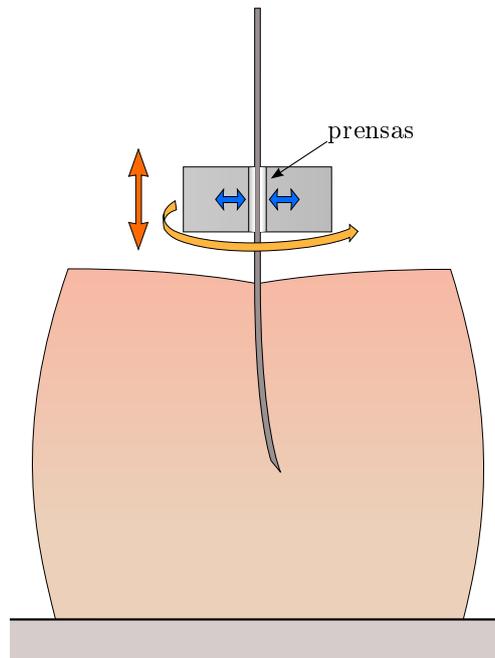


Figura 1.5: *Dispositivo de Inserção por Micropassos*

experimentos, que puderam ser conduzidos sempre por duas pessoas.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre guiagem de agulhas flexíveis e princípios básicos de controle de robôs manipuladores. No capítulo 3 descrevem-se o manipulador utilizado e todas as etapas do desenvolvimento do sistema de inserção por micropassos, incluindo a fabricação do mecanismo e o software desenvolvido para se controlar o manipulador. No capítulo 4 apresentam-se os experimentos realizados para se validar o sistema desenvolvido e faz-se a análise dos resultados. O capítulo 5 expõe as considerações finais do projeto e apresenta as perspectivas de trabalhos futuros.

Os anexos I a IV contêm informações sobre ferramentas de depuração desenvolvidas e procedimentos de manutenção do manipulador, além dos esquemáticos mecânicos e da descrição do conteúdo do DVD. O anexo V descreve um trabalho de teleoperação no contexto de interação homem-robô, realizado a partir dos algoritmos de controle aqui desenvolvidos para o manipulador. Tal trabalho foi realizado em paralelo com este projeto e produziu um artigo aceito no LARS/SBR 2012.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

You have to study a great deal to know a little
Charles de Secondat

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos necessários para a compreensão do desenvolvimento realizado neste trabalho. Inicialmente faz-se uma revisão bibliográfica sobre guiagem de agulhas flexíveis, citando-se os principais trabalhos desenvolvidos na área nos últimos anos. Em seguida, apresentam-se os princípios básicos de controle de robôs manipuladores.

2.2 Guiagem de Agulhas Flexíveis

Guiagem de agulhas flexíveis é um problema bastante recente sendo que os primeiros trabalhos importantes na área surgiram há menos de uma década [17, 18] [17, 18]. Nos últimos anos ele vem sendo estudado por diversos grupos de pesquisa, sendo abordadas diferentes partes do problema, tais como: formas de se modelar o movimento da agulha; diferentes tipos de agulha; métodos de inserção e suas implicações e dispositivos capazes de controlar a agulha.

2.2.1 Modelagem do Movimento da Agulha

A primeira tentativa de se modelar o comportamento de uma agulha flexível foi feita em 2003 por DiMaio [17], que modelou a interação entre a agulha e o tecido pelo método de elementos finitos. Essa representação apresentava alguns problemas, pois necessitava determinar um grande número de parâmetros. Em 2004, Glozman [18] propôs um modelo mais simples, representando as reações do tecido como um conjunto de molas virtuais. Apesar das duas formulações serem capazes de determinar a posição da ponta agulha, ambos modelos propostos eram muito complexos.

Em 2005, Webster et al. [19] modelaram a inserção da agulha através de um modelo cinemático não-holonômico com duas variáveis de entrada: as velocidades de inserção e rotação da agulha. Tal representação consiste em uma variação do modelo de uma bicicleta, com parâmetros ϕ (ângulo frontal) e l_1 (distância base), que juntos determinam a curvatura k_{max} da trajetória da agulha. Segundo esta formulação, o movimento de inserção da agulha é análogo ao de uma bicicleta se

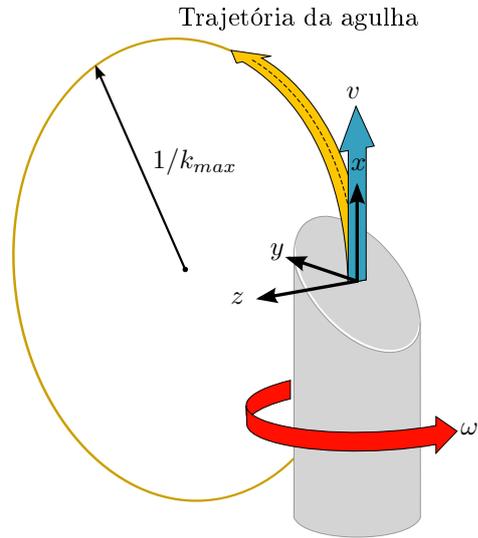


Figura 2.1: Representação do movimento da agulha pelo modelo uniciclo. Fonte : [2]

movendo sobre uma circunferência de raio $1/k_{max}$ e a rotação da base da agulha apenas altera o plano de movimento da bicicleta. Efetivamente vemos que é possível representar o sistema utilizando-se apenas o parâmetro k_{max} , de modo que o modelo da bicicleta pode ser simplificado para o modelo de um uniciclo.

Em [19], comparam-se estas duas representações e mostra-se que o modelo do uniciclo descreve o movimento da agulha de forma satisfatória, apesar de utilizar um único parâmetro. A Figura 2.1 mostra o movimento da agulha segundo este modelo. De forma mais elaborada pode-se mostrar que o modelo cinemático contém as seguintes restrições não holonômicas: $\omega_y = v_y = v_z = 0$ e $\omega_z = k_{max}v_x$. Dessa forma o sistema possui dois graus de liberdade, v_x e ω_x , que correspondem às velocidades de inserção e rotação da agulha, comumente denotadas por v e ω . Devido a sua simplicidade este modelo vem sendo adotado pela grande maioria dos grupos que trabalham com guiagem de agulha.

O modelo proposto por Webster [19] se preocupa apenas em representar o movimento no plano, considerando que a agulha gira em torno do próprio eixo e que a rotação aplicada na base da agulha se transmite integralmente à sua ponta. Em 2008, no entanto, Reed [31] analisou os efeitos do atrito lateral que ocorre quando a agulha é rotacionada dentro do tecido. De acordo com seus estudos, dependendo do material da agulha este efeito de rigidez torcional pode provocar uma diferença angular ente a base e a ponta da agulha. Em alguns casos esta diferença pode chegar a 30° , para um comprimento de agulha inserido de apenas 10 cm.

A Figura 2.2 representa a torção que surge na agulha em consequência do atrito lateral com o tecido. Este efeito tem sérias consequências, caso se considere que o movimento da agulha ocorre sempre no plano. Por causa disso, Reed apresentou um método de compensação da torção acumulada, que consiste em recuar um pouco a agulha, periodicamente, capaz de reduzir o problema em até 85%. Este compensador pode ser adicionado ao sistema de controle do movimento no plano, como faz-se em [4].

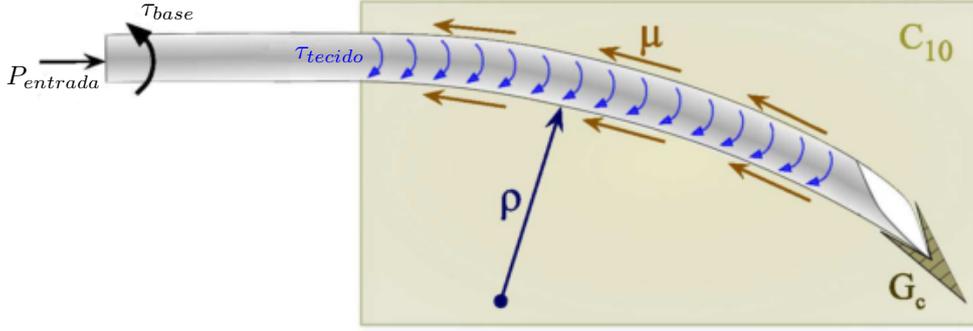


Figura 2.2: Efeito de rigidez torcional na agulha quando rotacionada dentro do tecido. Fonte: [3]

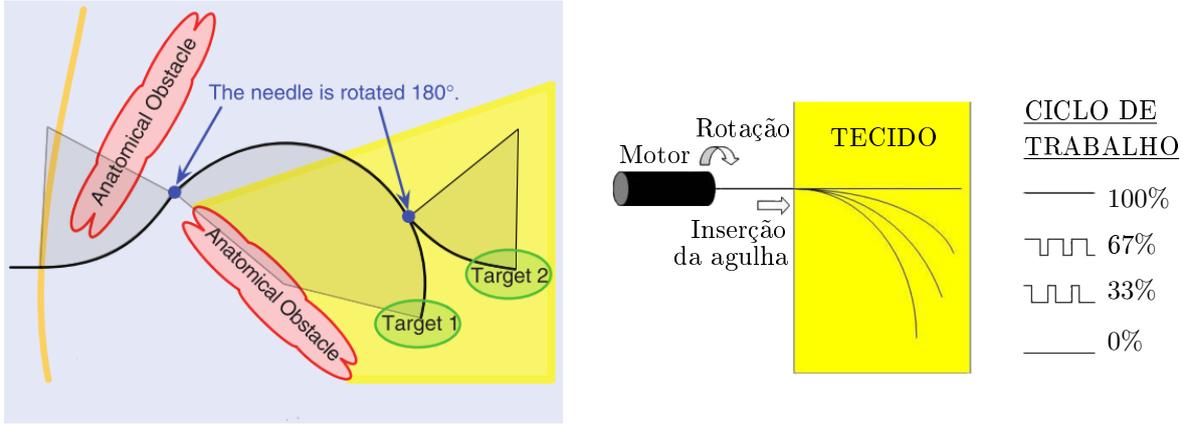
2.2.2 Métodos de Inserção

Utilizando-se os modelos apresentados, o desafio de guiagem de agulha torna-se controlar as velocidades de inserção e rotação de modo a realizar uma trajetória desejada. A maioria dos trabalhos desenvolvidos até hoje concentra-se em realizar trajetórias 2D, de modo a facilitar a realização dos experimentos, no entanto seria possível realizar trajetórias 3D combinando-se rotação e translação adequadamente. Alguns trabalhos modelam o movimento da agulha em 3D [32], no entanto a validação do modelo se dá apenas em simulação.

Uma das primeiras estratégias de inserção proposta [19] consiste em discretizar o procedimento alternando entre períodos de pura inserção e períodos de pura rotação. Nos períodos de pura inserção a agulha descreve um arco de circunferência, como previsto no modelo uniciclo. Já nos períodos de pura rotação, procura-se manter a agulha parada e rotacionar a sua ponta em exatos 180° , com o objetivo de simplesmente inverter o sentido de curvatura, sem alterar o plano de movimento.

A principal vantagem desta estratégia é que ela procura utilizar o mínimo de rotações necessárias, uma vez que cada erro de rotação pode alterar o plano de movimento da agulha. Além disso, muitas trajetórias complexas podem ser obtidas com um número pequeno de rotações, como mostra a Figura 2.3(a). Por este motivo, muitos grupos de pesquisa têm optado por este método de inserção. A sua maior desvantagem é que só se pode produzir trajetórias que possam ser discretizadas em um somatório de arcos de curvatura k_{max} , o que pode causar complicações caso k_{max} seja grande.

Outra estratégia de inserção muito utilizada, representada na Figura 2.3(b), combina inserção e rotação ao mesmo tempo, em uma lógica de controle baseada no ciclo de trabalho [34]. Quando inserção e rotação são aplicadas simultaneamente, a agulha descreve um movimento helicoidal no espaço 3D, onde o raio da hélice é proporcional à v/ω . Caso a velocidade de rotação seja muito superior à de inserção o raio da hélice tende a 0 e a agulha descreve uma trajetória retilínea. Este fenômeno possibilita obter-se qualquer trajetória curvilínea entre a curvatura natural κ_{max} e o movimento retilíneo, alternando-se entre períodos T_{ins} de pura inserção e períodos T_{rot} de inserção e rotação simultâneas. A curvatura obtida κ pode ser representada em função do ciclo de trabalho de rotação, pela expressão



(a) Método de inserção e rotação separadas. Fonte: [4] (Adaptado) (b) Método de inserção por ciclo de trabalho. Fonte: [33] (Adaptado)

Figura 2.3: Métodos de inserção para agulhas flexíveis

$$\kappa = \kappa_{max} (1 - DC) \quad (2.1)$$

$$DC = \frac{T_{rot}}{T_{rot} + T_{ins}} \quad (2.2)$$

A vantagem dessa estratégia é a geração de trajetórias arbitrárias contendo qualquer valor de curvatura menor do que κ_{max} , proporcionando assim uma solução mais geral à tarefa de guiagem de agulha. Além disso, por abordar o problema de forma contínua, ela pode ser mais facilmente expandida para gerar trajetórias 3D, do que o método anterior que realiza inserção e rotação separadamente.

Além destes métodos de inserção, existem técnicas que propõem a movimentação lateral da agulha ou mesmo do tecido. O método de manuseio pela base [17,21] consiste em movimentar a base da agulha perpendicularmente ao eixo de inserção, de modo a provocar um movimento no sentido contrário na porção da agulha que está dentro do tecido, uma vez que o ponto de inserção age como um fulcro. Entretanto este efeito tende a diminuir quando um comprimento grande da agulha já está inserido, pois a força necessária para causar a deflexão da ponta aumenta. Vale lembrar que a força lateral que se pode aplicar na agulha sem que ela rasgue a superfície do tecido é limitada, fazendo com que esta técnica só seja aplicável à uma faixa de comprimentos de inserção.

O método de manuseio do tecido [35] consiste em movimentar o tecido de modo a aproximar o alvo e afastar os obstáculos do caminho da agulha. Esta técnica já é realizada por médicos de forma manual, em cirurgias nos seios. Apesar de originariamente estas técnicas serem aplicadas à guiagem de agulhas rígidas, acredita-se que elas possam ser utilizadas para melhorar os resultados de guiagem de agulhas flexíveis se utilizadas em conjunto com outros métodos de inserção, como mostra a Figura 2.4.

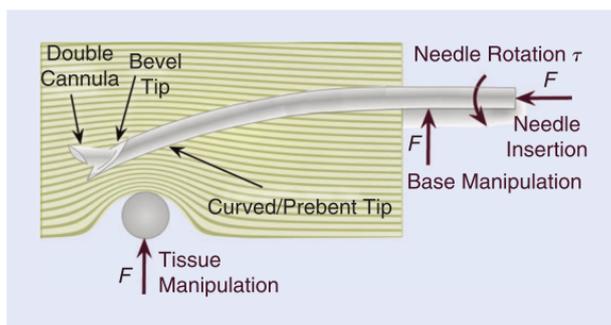


Figura 2.4: Métodos alternativos de inserção envolvendo manuseio da agulha e do tecido. Fonte : [4]

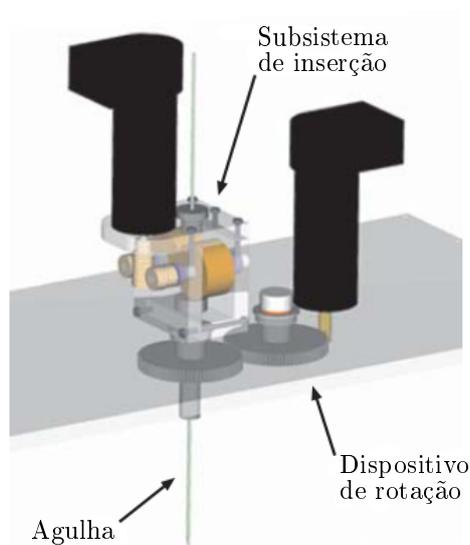


Figura 2.5: Modelo CAD do *Dispositivo de Roletes*. Fonte : [5]

2.2.3 Dispositivos de Inserção

A maioria dos métodos de inserção requer o controle das velocidades de inserção e rotação da agulha. Esta tarefa nem sempre é trivial, uma vez que a agulha é um corpo difícil de ser manuseado (extremamente fino e flexível), existindo portanto a necessidade de se desenvolver dispositivos de inserção cada vez mais eficientes. Até o presente momento, apenas dois dispositivos diferentes foram propostos para agulhas flexíveis [5]. São eles o *Dispositivo de Roletes* e o *Dispositivo de Antena Telescópica*.

O *Dispositivo de Roletes*, mostrado na Figura 2.5, consiste em um par de roletes de borracha que realizam a inserção empurrando a agulha para cima ou para baixo. Ambos roletes são movidos por engrenagens, ligadas a um parafuso rosca sem fim, conectado a um motor. Um segundo motor é utilizado para rotacionar todo o subsistema de inserção, provocando assim a rotação da agulha em torno do próprio eixo.

A principal vantagem deste sistema é a sua simplicidade, uma vez que são utilizados dois motores independentes para controlar as velocidades de inserção e rotação da agulha. Outra

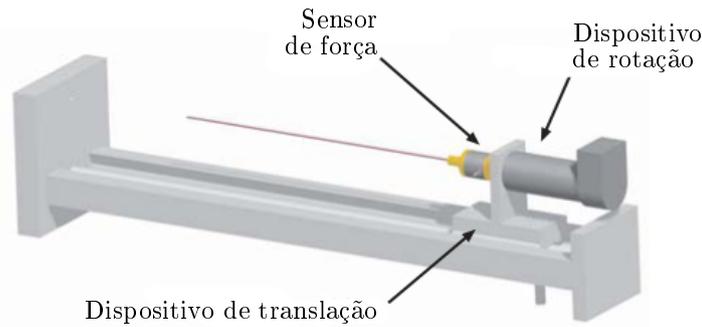


Figura 2.6: Modelo CAD do *Dispositivo de Antena Telescópica*. Fonte : [5]

vantagem é o fato de ser um mecanismo muito compacto, permitindo o seu transporte à sala de cirurgia com facilidade. Apesar disso, este dispositivo não fornece um controle preciso da velocidade da agulha, pois pode ocorrer escorregamento entre a agulha e os roletes durante a inserção. Este efeito se acentua quando grande parte da agulha já está em contato com o tecido. Além disso, o fato de existirem dois roletes movimentando a agulha faz com que ela sofra pequenas rotações, caso a velocidade dos dois não seja rigorosamente a mesma. Outra desvantagem deste mecanismo é a dificuldade de se acoplar um sensor de força para medir tensões e torções na agulha, durante a inserção.

O *Dispositivo de Antena Telescópica*, mostrado na Figura 2.6 foi construído com o objetivo de solucionar os problemas do *Dispositivo de Roletes*. Neste mecanismo a base da agulha é fixada diretamente ao motor responsável pela rotação, de modo a eliminar o problema do escorregamento, enquanto o outro motor translada toda a estrutura. Utiliza-se também uma antena telescópica em torno da agulha, para se evitar que ocorra o fenômeno de flambagem.

Além de solucionar o problema de escorregamento este dispositivo ainda fornece mais precisão na rotação e possibilita a utilização de um sensor de força, auxiliando a caracterizar as forças de interação entre a agulha e o tecido. Entretanto, mesmo com o uso da antena telescópica a flambagem pode ocorrer no interior do tubo adicionando incerteza à medição do comprimento de agulha inserido e às medições de força realizadas. Além disso o fato de atuar a agulha pela base e não pelo ponto de inserção aumenta o efeito de rigidez torcional causando maior defasagem entre o ângulo da base e o da ponta da agulha. Tal problema pode ser minimizado utilizando-se o compensador de torção proposto por Reed, no entanto este interfere no desempenho do controlador de trajetória. Outra desvantagem deste mecanismo é o fato de ele ser muito grande (em relação ao *Dispositivo de Roletes*), fazendo com que ele precise estar sempre fixo.

Em [36, 37], Swensen et al. modelaram os efeitos da dinâmica de torção em agulhas flexíveis. De acordo com os resultados apresentados, o mecanismo que proporciona melhor controle sobre a orientação da agulha é aquele que aplica a rotação muito próximo do ponto de inserção, como ocorre com o *Dispositivo de Roletes*. Mais ainda, Swensen et al. afirmam que um dispositivo capaz de efetivamente controlar a agulha pelo ponto de inserção seria o dispositivo ideal, do ponto de vista de controle.

A maioria dos trabalhos desenvolvidos atualmente utiliza o *Dispositivo de Antena Telescópica*,

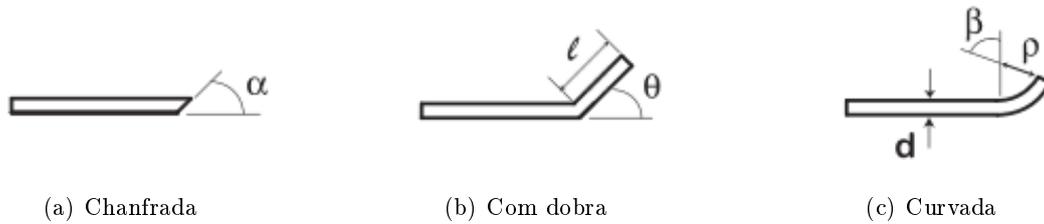


Figura 2.7: Diferentes tipos de pontas de agulha. Fonte: [6] (Adaptado)

que vem sofrendo poucas alterações ao longo do tempo. Em [22] este dispositivo foi fixado ao efetuador de um manipulador, tornando o sistema mais flexível de modo que a inserção possa ser realizada em qualquer direção. Esta estratégia também possibilita realizar outros tipos de movimento, possibilitando o uso de técnicas como o manuseio pela base.

2.2.4 Características da Agulha e do Tecido

Um parâmetro importante em um sistema de guiagem de agulha é a curvatura natural k_{max} que a agulha descreve quando inserida sem rotação. Normalmente é desejável que este parâmetro seja o mais alto possível, pois ele representa uma restrição ao sistema, uma vez que as técnicas de controle até o momento só permitem obter curvaturas de 0 até k_{max} . Em [5] Webster analisa a influência do ângulo do chanfro da agulha em k_{max} e mostra que existe uma relação linear, sendo que chanfros mais acentuados produzem curvaturas maiores.

Outras formas de se aumentar k_{max} também já foram exploradas. Em [6], investiga-se o uso de agulhas com dobras na ponta, como mostra a Figura 2.7(b), de modo a aumentar o nível de assimetria. Este fator proporciona curvaturas muito maiores do que às de agulhas somente chanfradas, porém acarreta em outras consequências. Além de causar maior dano ao tecido, elas provocam um deslocamento lateral da ponta da agulha no momento da rotação, gerando uma descontinuidade na trajetória. Isto pode fazer a agulha atingir um órgão próximo, caso esta descontinuidade não seja considerada no modelo. Em [4], estendeu-se o modelo do uniciclo para incorporar tais elementos, no entanto a aplicabilidade de agulhas com dobras ainda é questionável, principalmente quando se utiliza a estratégia de inserção por ciclo de trabalho.

Outro fator que influencia a curvatura k_{max} é a rigidez relativa entre a agulha e o tecido. Isso sugere que o material da agulha deva ser selecionado adequadamente para o tipo de tecido em que a cirurgia vá ser realizada. No entanto, para fins de pesquisa tem-se optado por utilizar sempre a mesma agulha e modificar a rigidez do tecido. Em [38] faz-se uma análise com diferentes tipos de tecido propondo-se um método para a caracterização de suas propriedades, medindo-se a tensão de ruptura e a elasticidade não-linear. A maioria dos tecidos utilizados atualmente são homogêneos apesar do corpo humano apresentar não-uniformidades. Com o objetivo de incorporar este tipo de fator e estudar os seus efeitos na guiagem de agulha, Reed [4] simulou o efeito de uma membrana existente dentro do tecido.

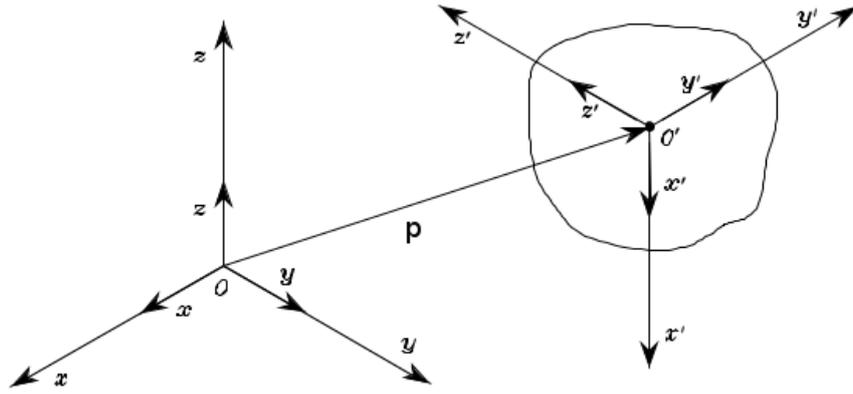


Figura 2.8: Posição e orientação de um corpo rígido. Fonte: [7]

2.3 Controle Cartesiano de Robôs Manipuladores

Do ponto de vista mecânico, um robô manipulador pode ser representado como uma cadeia cinemática de corpos rígidos (elos), conectados por juntas, que podem ser prismáticas ou de revolução. Uma ponta da cadeia é fixa à base, enquanto a outra é livre e carrega o efetuador. O movimento resultante da estrutura completa é obtido pela composição dos movimentos elementares de cada elo em relação ao anterior. Desta forma, para se manipular um objeto no espaço é necessário descrever a posição e a orientação do efetuador.

A cinemática direta do manipulador é a formulação que permite calcular-se a pose (posição e orientação) do efetuador em função das suas variáveis de junta. O problema contrário, de se determinar o conjunto de variáveis de junta que corresponde a uma dada pose é chamado cinemática inversa. Com isso é possível se controlar a posição do efetuador do manipulador no espaço, no entanto caso seja necessário determinar as suas velocidades, utiliza-se a cinemática diferencial, obtida através da matriz jacobiana.

Estes são os principais elementos envolvidos no problema de controle de manipuladores. As seções a seguir apresentam cada um destes conceitos de forma resumida. Para uma explicação mais detalhada, pode-se consultar [7].

2.3.1 Representação da Pose

Para se representar a pose de um corpo rígido é necessário determinar a sua posição e orientação em relação a um quadro de referência Q^{ref} . Para se determinar a orientação atribui-se um quadro ao corpo Q^{corpo} , que pode ser posicionado em qualquer ponto conveniente, geralmente o centro de massa do corpo. Dessa forma, descreve-se a pose do corpo pelo vetor de translação

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

que une as origens dos quadros Q^{ref} e Q^{corpo} e pela orientação relativa entre eles. A Figura 2.8

ilustra estes elementos. Existem várias formas diferentes de se representar a orientação relativa. Uma delas é utilizando-se uma matriz de rotação, composta pelas projeções dos três vetores de Q^{corpo} em Q^{ref} , do tipo

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{bmatrix}.$$

Quando esta representação é utilizada a pose pode ser descrita por uma matriz de transformação homogênea do tipo

$$\mathbf{A}_{corpo}^{ref} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x & p_x \\ x'_y & y'_y & z'_y & p_y \\ x'_z & y'_z & z'_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Outras formas de se representar a orientação são: ângulos de Euler, ângulos RPY e o quatérnion unitário. Tanto a representação por ângulos de Euler quanto ângulos RPY utilizam apenas 3 parâmetros, descrevendo a orientação como um conjunto de 3 rotações realizadas em tornos dos eixos coordenados de Q^{ref} .

Quando se representa a rotação por um quatérnion unitário, que possui 4 parâmetros, pode-se representar a pose por um quatérnion dual, do tipo

$$\underline{m}_{corpo}^{ref} = r_{corpo}^{ref} + \epsilon \frac{1}{2} t_{corpo}^{ref} r_{corpo}^{ref},$$

onde r_{corpo}^{ref} é o quatérnion unitário que representa a rotação, t_{corpo}^{ref} é um quatérnion que representa a translação, do tipo

$$t_{corpo}^{ref} = (0 \quad p_x \quad p_y \quad p_z)^T$$

e ϵ é um elemento especial de modo que $\epsilon^2 = 0$, mas $\epsilon \neq 0$. A formulação de quatérnions duais pode ser vista detalhadamente em [30], ou de forma resumida em [8].

2.3.2 Cinemática Direta

Considerando-se um manipulador, formado por n juntas em cadeia, e chamando-se a variável da junta i de θ_i , percebe-se que a pose do seu efetuador depende do vetor de variáveis de junta

$$\vec{\theta} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix}.$$

Fixando-se um quadro a cada elo do manipulador, pode-se representar a pose relativa entre uma junta Q^i e a junta antecedente Q^{i-1} por uma matriz de transformação homogênea \mathbf{A}_i^{i-1} ou por um quatérnio dual \underline{m}_i^{i-1} . Dessa forma a pose do efetuador pode ser calculada em relação à referência por

$$\mathbf{T}_n^0 = \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \dots \mathbf{A}_n^{n-1}$$

ou

$$\underline{m}_n^0 = \underline{m}_1^0 \underline{m}_2^1 \dots \underline{m}_n^{n-1}$$

como mostra a Figura 2.9. Tais expressões são chamadas de Modelo Cinemático Direto (MCD) do manipulador.

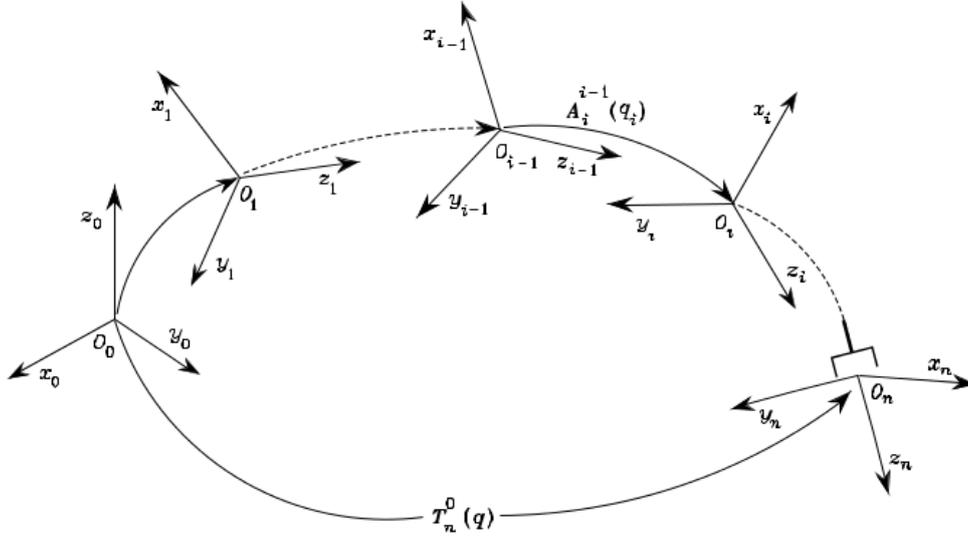


Figura 2.9: Cinemática Direta obtida pela multiplicação em sequencia das das transformações de pose de um elo ao outro do manipulador. Fonte: [7]

Usualmente, determina-se as transformações de uma junta a outra extraíndo-se 4 parâmetros, segundo a convenção Denavit-Hartenberg (DH). Segundo esta convenção o elo deve ser representado por: uma rotação de θ em torno do eixo z , seguida de um deslocamento d na direção z e um deslocamento a na direção x , seguida de uma rotação de α em torno do eixo x . Seguindo-se este método o elo pode ser plenamente representado pela tupla $(\theta \ d \ a \ \alpha)$. Esta convenção é tão amplamente utilizada no contexto de manipuladores que o MCD do robô é comumente representado simplesmente pela lista de parâmetros DH.

2.3.3 Cinemática Diferencial

A cinemática diferencial consiste em se determinar as velocidades do efetuador em função das velocidades das juntas. Esta relação é geralmente descrita por

$$P_{fer}^{\dot{r}ef} = J_x(\tilde{\theta}(t)) \cdot \dot{\tilde{\theta}} \quad (2.3)$$

onde P_{fer}^{ref} é a variação da pose do efetuador e $J_x(\tilde{\theta}(t))$ é a matriz jacobiana, que muda para cada estado do manipulador. A matriz jacobiana é obtida pela diferenciação da cinemática direta, porém como existe mais de uma forma de se representar P_{fer}^{ref} existe mais de um tipo de jacobiana.

A Jacobiana Geométrica relaciona $\dot{\tilde{\theta}}$ com as velocidades lineares e angulares do efetuador. Ela é calculada por

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial x}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial y}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} & \cdots & \frac{\partial z}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \phi_x}{\partial \theta_4} & \cdots & \frac{\partial \phi_x}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \phi_y}{\partial \theta_5} & \cdots & \frac{\partial \phi_y}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial \phi_z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \phi_z}{\partial \theta_6} & \cdots & \frac{\partial \phi_z}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial t} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

em que ϕ_x , ϕ_y e ϕ_z são os ângulos de rotação em torno dos eixos x, y e z do quadro do efetuador.

A Jacobiana Analítica relaciona $\dot{\tilde{\theta}}$ com a variação temporal da representação mínima de pose. No caso em que a pose é representada por quatérnions duais ela é dada por

$$\begin{pmatrix} \dot{a}_p \\ \dot{b}_p \\ \dot{c}_p \\ \dot{d}_p \\ \dot{a}_d \\ \dot{b}_d \\ \dot{c}_d \\ \dot{d}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial a_p}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_p}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial a_p}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial b_p}{\partial \theta_1} & \frac{\partial b_p}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial b_p}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial d_d}{\partial \theta_1} & \frac{\partial d_d}{\partial \theta_6} & \cdots & \frac{\partial d_d}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \theta_n}{\partial t} \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

2.3.4 Cinemática Diferencial Inversa

A cinemática diferencial inversa consiste em se determinar as velocidades que devem ser aplicadas em cada junta para se obter as velocidades desejadas no efetuador. Para isso, calcula-se a relação inversa da 2.3, obtendo-se

$$\dot{\tilde{\theta}} = (J_x)^{-1} \cdot P_{fer}^{ref}. \quad (2.6)$$

Caso a jacobiana não seja inversível, utiliza-se geralmente a pseudo-inversa

$$J_x^\dagger = J_x^T (J_x J_x^T)^{-1}. \quad (2.7)$$

A cinemática inversa consiste em se determinar os valores das variáveis de junta que resultam em uma dada pose no espaço. Como geralmente estes valores são difíceis de se obter do MCD, este problema muitas vezes é resolvido pela integração da Cinemática Diferencial Inversa.

Capítulo 3

Desenvolvimento

*That's one microstep for a robot,
one giant leap for mankind
Neil Armstrong (adaptado)*

3.1 Introdução

Para se construir uma plataforma robótica de guiagem de agulhas flexíveis, é preciso desenvolver tanto o hardware como o software específicos para esta tarefa. O hardware consiste na agulha e no dispositivo capaz de controlá-la, além dos outros elementos necessários para a realização de experimentos como o tecido e um conjunto de câmeras. O software deve conter um controlador para o dispositivo de inserção, mas também pode abranger planejadores de rota e sistemas de rastreamento da agulha, dependendo do grau de automação e complexidade da plataforma. A Figura 3.1 destaca os principais elementos envolvidos em um sistema deste tipo.

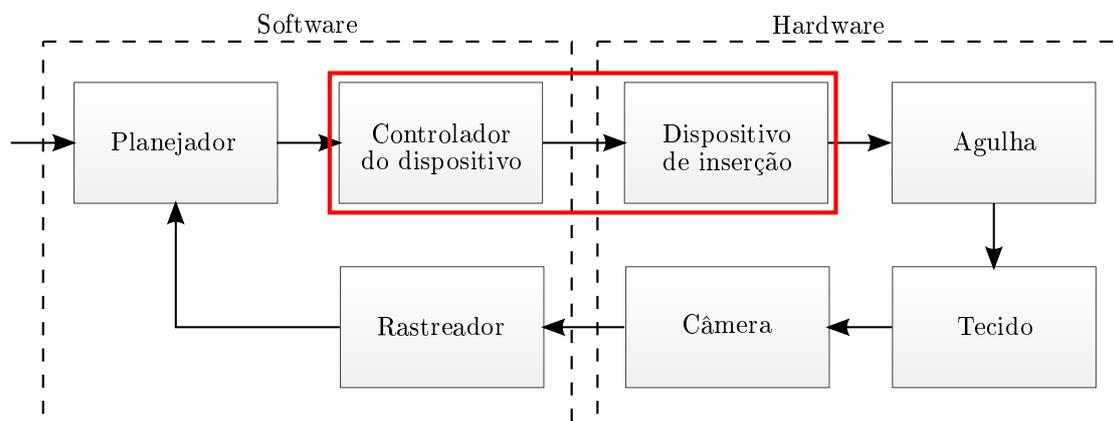


Figura 3.1: Principais elementos de uma plataforma de guiagem de agulha (os elementos destacados correspondem ao foco deste trabalho).

Dada a sua grande importância no sistema, decidiu-se concentrar os esforços deste trabalho no desenvolvimento do dispositivo de inserção e do controlador do dispositivo. Estes dois elementos são descritos em detalhes ao longo deste capítulo. Para possibilitar a realização de experimentos, também foi necessário obter-se um conjunto de agulha e tecido. Informações sobre estes são fornecidas na seção 4.2, durante a descrição do setup experimental. Não foi objeto deste trabalho

o desenvolvimento dos subsistemas relativos a câmera, rastreador ou planejador.

Para se realizar a inserção, utilizou-se um robô manipulador com um efetuator do tipo garra, ao qual se acoplou o dispositivo de inserção criado especificamente para esta plataforma, capaz de segurar e direcionar a agulha com precisão. O desenvolvimento do controlador do dispositivo foi feito em ambiente Linux, usando-se a linguagem de programação C++ e o meta sistema operacional para robótica ROS.

A seção 3.2 apresenta o conceito criado de inserção por micropasso. Em seguida, a seção 3.3 descreve o dispositivo de inserção produzido para possibilitar tal método de inserção, intitulado *Dispositivo de Inserção por Micropassos*. A seção 3.4 apresenta as características do manipulador utilizado e finalmente a seção 3.5 descreve o ambiente de programação utilizado e a lógica de controle implementada.

3.2 O Conceito de Inserção por Micropassos

Como mostrado na seção 2.2.1, o problema de guiagem de agulha consiste em se controlar as velocidades de inserção v e rotação ω da ponta da agulha durante a operação. Utilizando-se um manipulador cuja última junta seja rotacional, obtém-se facilmente tal condição, uma vez que pode-se controlar ω rotacionando-se a última junta e v realizando-se o controle cartesiano do efetuator. No entanto é necessário que o manipulador seja capaz de segurar e orientar a agulha adequadamente, motivo pelo qual deve-se acoplar um dispositivo customizado ao seu efetuator.

Dois mecanismos de inserção diferentes foram apresentados na seção 2.2.3. Um deles é o *Dispositivo de Antena Telescópica*, o mais utilizado atualmente, mas que apresenta problemas de flambagem e rigidez torcional, por atuar a agulha pela base. O outro é o *Dispositivo de Roletes*, que atua a agulha próximo ao ponto de inserção, mas que tem problemas de escorregamento, uma vez que a agulha não é fixada ao dispositivo. Considerando-se estas dificuldades, decidiu-se aqui explorar uma nova forma de se realizar a inserção, buscando-se uma solução diferente que elimine os problemas dos dois dispositivos ao mesmo tempo.

De acordo com as pesquisas de Swensen [36,37], atuar a agulha próximo ao ponto de inserção é melhor do que pela base, pois isso reduz drasticamente os problemas de rigidez torcional, eliminando a necessidade de um compensador de torção, aumentando assim a eficiência do controlador de trajetória. No entanto, para que isso ocorra é necessário mudar o ponto de atuação da agulha repetidamente, como acontece no *Dispositivo de Roletes*, o que dificulta o controle das velocidades da agulha com precisão.

Considerando isso, decidiu-se elaborar um novo dispositivo que atue a agulha próximo do ponto de inserção, sem acarretar no problema do escorregamento. No caso do *Dispositivo de Roletes*, este problema ocorre principalmente devido ao fato das forças de reação aplicadas pelo tecido quando se tenta mover a agulha serem não-lineares, tornando difícil ao mecanismo manter o controle sobre a agulha. Pensando-se nisso, o conceito do novo dispositivo baseou-se em evitar estas forças de reação, alterando-se o ponto de atuação com a agulha parada.

Para se alcançar tal resultado, o ponto de atuação deve ser alterando afastando-se o dispositivo

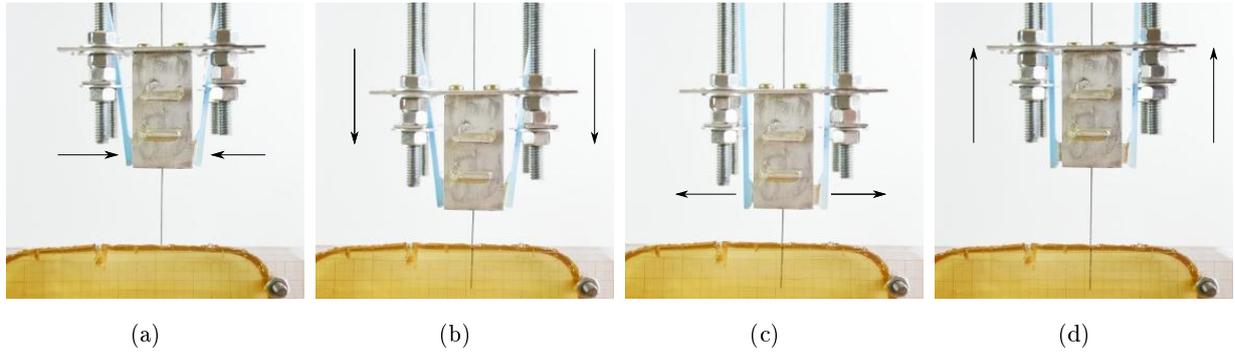


Figura 3.2: Etapas de um micropasso. (a) Segurando a agulha; (b) Inserindo a agulha; (c) Soltando a agulha; (d) Retrocedendo à posição inicial. Fonte : [2]

de inserção do tecido, mantendo a agulha, parcialmente inserida, imóvel. Ao contrário do *Dispositivo de Roletes* no qual o ponto de atuação muda continuamente, neste método ele é alterado de forma discreta, dividindo-se a inserção em dois estágios. No primeiro, o dispositivo segura firmemente a agulha e se aproxima do tecido, realizando uma pequena inserção. No segundo, a agulha, já parcialmente inserida, é liberada e o dispositivo se afasta, recuando o ponto de atuação.

A Figura 3.2 mostra as diferentes etapas do movimento descrito. Inicialmente o dispositivo aperta a agulha de forma que ela fique fixa (3.2(a)). Em seguida o manipulador move a estrutura inteira para frente, realizando uma pequena inserção (3.2(b)). Após isso, o dispositivo solta a agulha (3.2(c)) e o manipulador retorna à posição inicial (3.2(d)). Estas quatro operações constituem um micropasso, que pode ser realizado repetidamente para se obter inserções longas. Rotacionando-se a agulha entre um micropasso e outro é possível realizar trajetórias complexas, solucionando o problema de guiagem de agulha.

A vantagem deste método de inserção em relação ao *Dispositivo de Roletes* é que, enquanto neste os movimentos relativos agulha-tecido e agulha-dispositivo ocorrem simultaneamente, aquele os realiza em momentos distintos. Pode-se dizer que o método proposto constitui uma solução híbrida na qual a agulha não está nem sempre fixa ao dispositivo nem sempre solta, utilizando-se a garra do manipulador para alternar entre os dois estados. Esta forma de realizar a inserção inspira-se no movimento que um cirurgião normalmente faz ao inserir uma agulha longa manualmente.

Este tipo de mecanismo permite utilizar as duas estratégias de inserção apresentadas em 2.2.2. Caso se deseje realizar inserção e rotação separadamente, as rotações de 180° podem ser realizadas entre determinados passos, uma vez que o tamanho do micropasso pode ser arbitrariamente pequeno. Já no caso da inserção por ciclo de trabalho, pode-se alternar entre micropassos de pura inserção e micropassos de inserção e rotação simultâneas. Desta forma o cálculo do ciclo de trabalho deve ser adaptado para o caso discreto.

3.3 O Mecanismo de Inserção Fabricado

Para realizar uma inserção por micropasso, foi preciso produzir um mecanismo para ser acoplado à garra do manipulador. Tal mecanismo deveria ser composto por duas partes: uma fixa, respon-

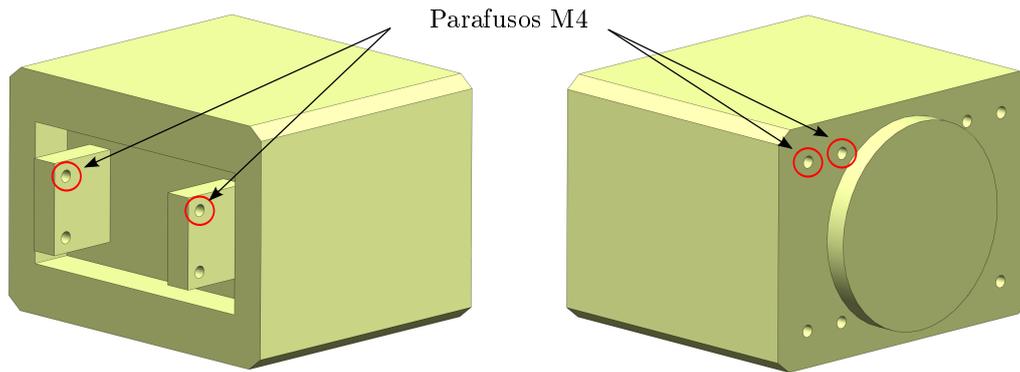


Figura 3.3: Furos para parafusos M4 na garra PG 070 do manipulador .

sável por suportar a agulha e determinar a sua direção; e uma móvel responsável por apertar e soltar agulha. A parte móvel deve ser conectada aos dedos da garra, por possuírem atuação permitindo-se segurar e soltar a agulha. Já a parte fixa deve ser acoplada à própria estrutura da garra.

3.3.1 Requisitos do Projeto

Como a garra do manipulador utilizado, cujo modelo CAD está representado na Figura 3.3, possui furos para parafuso M4 (8 furos na parte posterior e dois em cada dedo), procurou-se utilizá-los para fazer a fixação das peças do mecanismo produzido, de modo que este pudesse ser facilmente acoplado e desacoplado do manipulador. Esta condição que impomos, reforça a ideia de que o mecanismo de inserção deva ser facilmente acoplado em manipuladores do mesmo tipo e que se possa trocar o mecanismo para realizar diferentes métodos de inserção. Além disso, essa condição é importante por não exigir que modifiquemos o módulo do robô nem causar nenhum tipo de dano à garra.

Um dos requisitos da parte fixa é que ela deve ser capaz de determinar a orientação da agulha com precisão. Por causa disso, ela deve conter furos de diâmetro pouco maior do que o da agulha, pelos quais ela deve passar. Alternativamente poderia utilizar-se um tubo para orientar a agulha, mas como o seu diâmetro interno precisaria ser muito pequeno a fabricação deste seria complicada. Outro requisito é que parte da agulha deve estar acessível à parte móvel, para que esta consiga segurar a agulha.

Uma escolha importante no projeto da parte fixa é se a agulha estaria alinhada com o eixo de rotação do último elo do manipulador ou paralela a este, posicionada na lateral da garra. Ter a agulha alinhada ao elo do manipulador facilita muito o controle do dispositivo, pois a velocidade de rotação da agulha pode ser determinada por uma única junta, independente da posição das demais, porém dificulta muito a fixação da parte fixa, uma vez que esta deve ser posicionada à frente da garra. Encaixar a parte fixa na lateral da garra facilita muito o projeto mecânico, mas torna muito mais difícil girar a agulha em torno do próprio eixo, sendo esta tarefa possível somente em algumas configurações do robô. Além disso, o fato do diâmetro da agulha ser muito pequeno,

faz com que qualquer erro de cálculo no controle cinemático do robô provoque deslocamento lateral da agulha, quando se tenta rotacioná-la.

Optou-se portanto por alinhar a agulha com o último elo do manipulador, com o intuito de obter um sistema mais simples e versátil do ponto de vista do controle. Essa escolha, porém, acarreta em outra complicação além da dificuldade de se fixar a peça. Caso a agulha a ser utilizada seja longa a peça fixa deve ser posicionada muito distante da garra, de modo a evitar que esta colida com a parte de trás da agulha. Caso a distância entre a garra e a peça fixa seja menor do que o comprimento da agulha, a parte de trás da agulha deve curvar em torno da garra. Isto é possível, uma vez que as agulhas a serem utilizadas são flexíveis, mas provoca um aumento do atrito entre a agulha e o mecanismo, além de poder causar uma deformação plástica na agulha. Estas implicações serão novamente discutidas na seção 4.7.

Posicionando a agulha alinhada com o centro da garra, a parte móvel do efetuator pode ser apenas uma extensão dos dedos da garra, uma vez que o movimento de aproximar ou afastar os dedos se dá na direção radial da agulha. O contato entre tais extensões e a agulha deve ser feito por meio de um material elástico, de modo que seja possível comprimi-lo para aumentar a pressão aplicada sobre a agulha, sem danificar a superfície da mesma. Além disso este material deve ter uma superfície altamente aderente, para impedir que haja qualquer tipo de escorregamento, enquanto a agulha esteja sendo inserida.

3.3.2 Projeto Inicial

Conhecendo-se os requisitos do dispositivo, fez-se um primeiro projeto do mecanismo, visto na Figura 3.4, utilizando-se o programa SolidWorks. Neste projeto, a agulha passa por uma pequena armação metálica, com quatro furos concêntricos de 1,0 mm de diâmetro. Esta armação possui aberturas nas laterais para que as extensões da garra consigam acessar a agulha. Quatro abas metálicas são parafusadas na armação e na parte posterior da garra, fazendo com que a armação fique posicionada à frente da garra. Por fim, uma última peça é posicionada na parte superior da garra para guiar a parte de trás excedente da agulha.

As vantagens deste projeto são que ele atende os requisitos do dispositivo apenas com chapas e peças metálicas, que são de fácil fabricação. O uso de 4 abas metálicas para segurar a armação tem como objetivo dar mais rigidez à estrutura e garantir que os furos pelos quais a agulha passa fiquem alinhados com o centro da garra. O compartimento frontal da armação (o mais distante da garra) foi projetado para acomodar um pequeno bloco de borracha com um furo no centro, de modo que ao ser comprimido pelas extensões da garra, este bloco segure a agulha.

3.3.3 Primeira Fabricação

Inicialmente fabricou-se a parte fixa do mecanismo (a armação e as abas metálicas) na oficina do SG-9 (bloco anexo da Engenharia Mecânica na UnB), com o auxílio dos técnicos responsáveis pelo local. Para fabricar-se a armação, usinou-se cada uma das faces separadamente e soldou-se as quatro faces externas. As faces internas foram adicionadas por último, através de rasgos nas superfícies superior e inferior da peça, e coladas com Epoxy. As abas metálicas foram produzidas

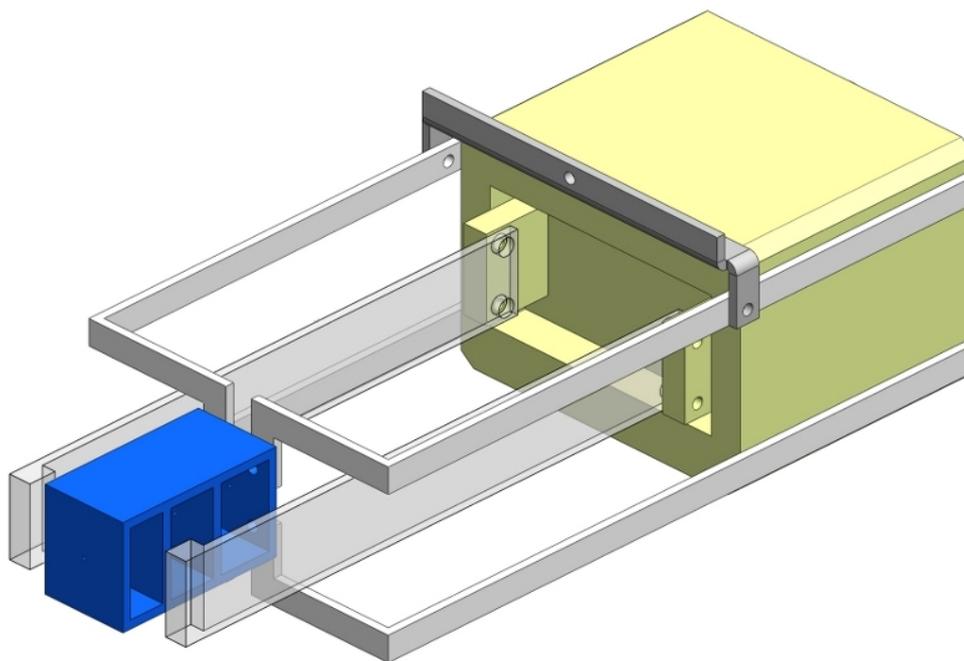


Figura 3.4: Projeto inicial do mecanismo de inserção por micropasso.

utilizando-se basicamente corte, furação e dobra. Por se tratar de um protótipo, todas as peças foram produzidas com chapas de alumínio de 3,0 mm de espessura, dada a disponibilidade que havia do material no LARA.

A Figura 3.5 mostra as peças fabricadas. Apesar do projeto parecer simples, diversos problemas foram identificados no momento da fabricação, o que resultou em um protótipo não-funcional. Em primeiro lugar, as abas metálicas se mostraram de difícil fabricação. Por terem o formato de 'L' não foi possível cortá-las usando a guilhotina e o uso da serra de policorte se mostrou inviável por causar grande deformação nas peças, uma vez que as chapas de alumínio eram finas e bastante maleáveis. Um resultado melhor poderia ser obtido com uma serra manual, apesar de tornar o processo mais trabalhoso.

Outro problema envolvendo as abas metálicas diz respeito às dobras, que foram feitas manualmente. Como a posição e o ângulo das dobras não foram precisos o bastante, as peças ficaram desalinhadas, tornando impossível fixar a armação metálica nas quatro abas simultaneamente. A armação metálica também apresentou alguns problemas de alinhamento, mas teve um resultado muito mais satisfatório, por ter sido soldada com o auxílio de um técnico experiente.

3.3.4 Adaptação do Projeto

Ao invés de se repetir a fabricação do mecanismo até obter-se peças com a precisão necessária, decidiu-se fazer adaptações no projeto, substituindo-se as abas metálicas por uma alternativa de mais fácil fabricação. O fato de existirem 4 peças fazendo a fixação da armação proporciona

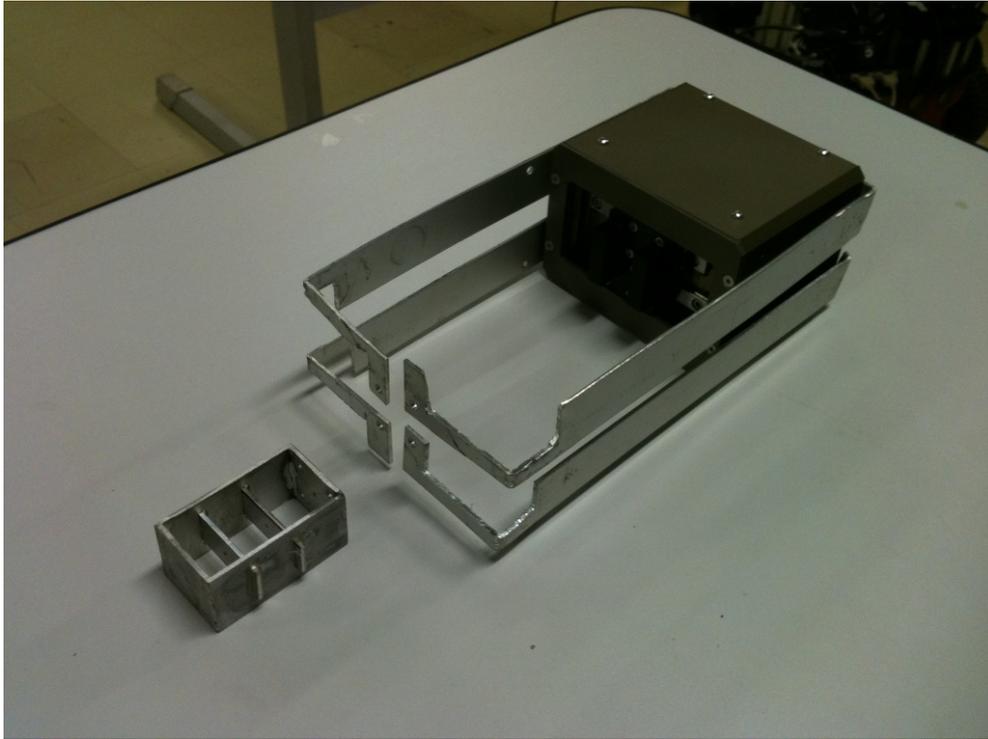


Figura 3.5: Primeira fabricação das peças fixas do mecanismo de inserção por micropasso.

maior estabilidade ao mecanismo, no entanto reduz muito as tolerâncias de fabricação, fazendo-se necessário que todas as peças tenham dimensões exatamente iguais. Tendo isso em vista, decidiu-se utilizar uma peça única que fosse encaixada na garra e fizesse a função das 4 abas. O projeto passou por 3 versões, procurando-se a melhor forma de produzir a tal peça, no entanto nenhuma dessas versões foi fabricada.

Outro problema na fabricação do projeto inicial diz respeito às dobras metálicas, feitas manualmente pela ausência de uma máquina de dobra, que não apresentaram a precisão necessária. Isto implica que mesmo que se produza uma peça única para a fixação da armação é possível que haja problemas de encaixe e alinhamento devido a erros de dobras do metal. Considerando isto, fez-se uma versão completamente nova do projeto descartando-se qualquer operação de dobra. O novo projeto, mostrado na Figura 3.6, utiliza eixos roscados paralelos para posicionar a armação à frente da garra.

O conceito deste projeto consiste em fixar à parte posterior da garra apenas uma chapa metálica com 4 furos simetricamente distribuídos. Por estes furos passam 4 eixos paralelos que são utilizados para sustentar outras peças, que podem ser posicionadas o quão distante for necessário da garra. Escolhendo-se eixos de um diâmetro apropriado, é possível manter o sistema estável, mesmo que a armação seja posicionada muito distante. Esta forma de encaixe torna muito mais fácil garantir que a armação esteja paralela à face da garra e alinhada com o centro da mesma.

Outra vantagem desta proposta é que como a posição das placas é completamente ajustável, eventuais defeitos de fabricação podem ser parcialmente compensados, aumentando as chances de que a agulha fique realmente alinhada com o centro da garra. Como pode-se ver na Figura 3.6, as únicas peças que não possuem tamanho ajustável são os extensores da garra. No entanto, como

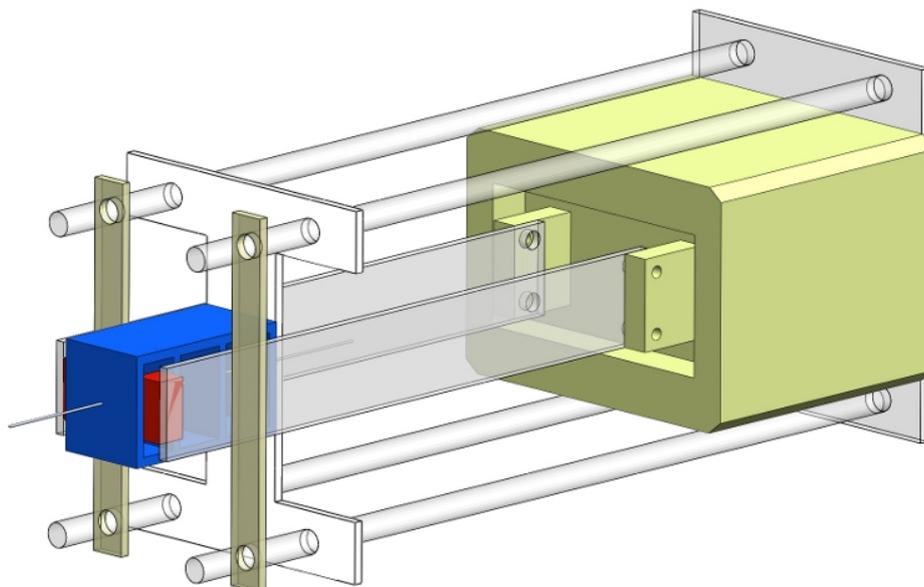


Figura 3.6: Projeto final do mecanismo de inserção por micropasso, utilizando eixos roscados.

estas peças são relativamente simples, pode-se fabricar extensores de diversos tamanhos.

Outra modificação feita no projeto foi a adição de dois fulcros, de modo a transformar os extensores da garra em alavancas. Essa alteração tem como objetivo multiplicar a força aplicada sobre a borracha, garantindo que a agulha seja apertada de forma firme. Este fator se torna necessário caso a armação seja posicionada longe da garra e o material utilizado para fabricar os extensores seja maleável, como é o caso do alumínio e do acrílico.

3.3.5 Fabricação Final do Mecanismo

A Figura 3.7 mostra o mecanismo fabricado, com todas as peças encaixadas à garra do manipulador. A única peça que não precisou ser fabricada novamente foi a armação metálica. Para produzir os extensores da garra optou-se pelo acrílico por ser um material menos rígido, reduzindo assim as chances de causar algum dano à armação metálica, caso ocorresse algum erro no acionamento da garra.

Diferentemente do projeto inicial, onde os extensores pressionavam uma borracha perfurada, desta vez colou-se dois blocos de borracha na ponta de cada extensor, de modo que ambos são pressionados contra agulha quando se deseja segurá-la. Esta abordagem se mostrou mais eficiente, pois a borracha com furo apresentava uma compressibilidade bastante limitada (em relação a força que a nossa garra é capaz de aplicar). A Figura 3.8 mostra todas as peças utilizadas na montagem do mecanismo, dispostas na ordem em que são encaixadas nos eixos roscados. Detalhes sobre o encaixe destas peças são dados na seção 4.2, onde é apresentado o setup experimental.

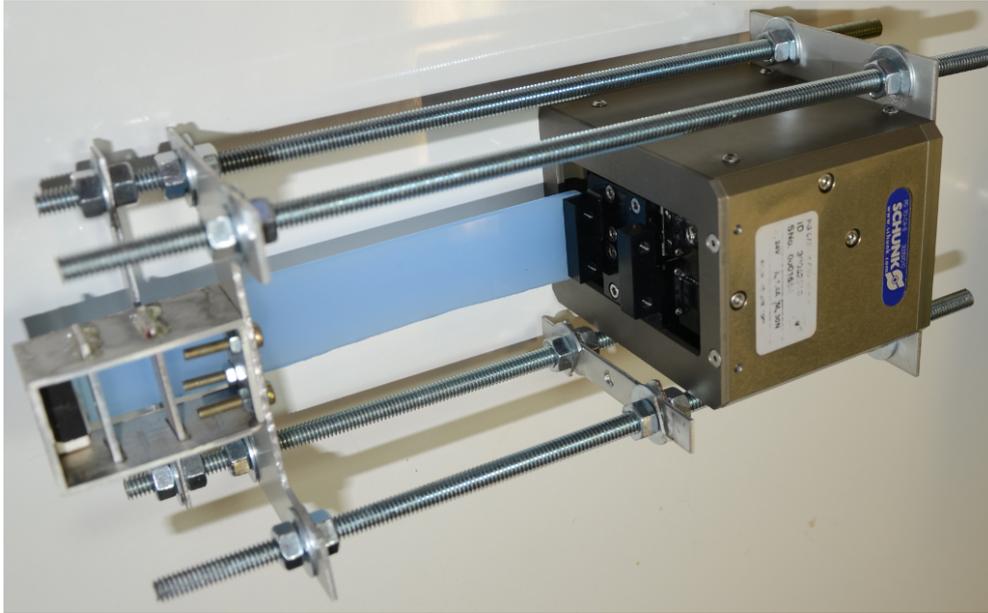


Figura 3.7: Mecanismo de inserção por micropasso fabricado após as alterações de projeto.

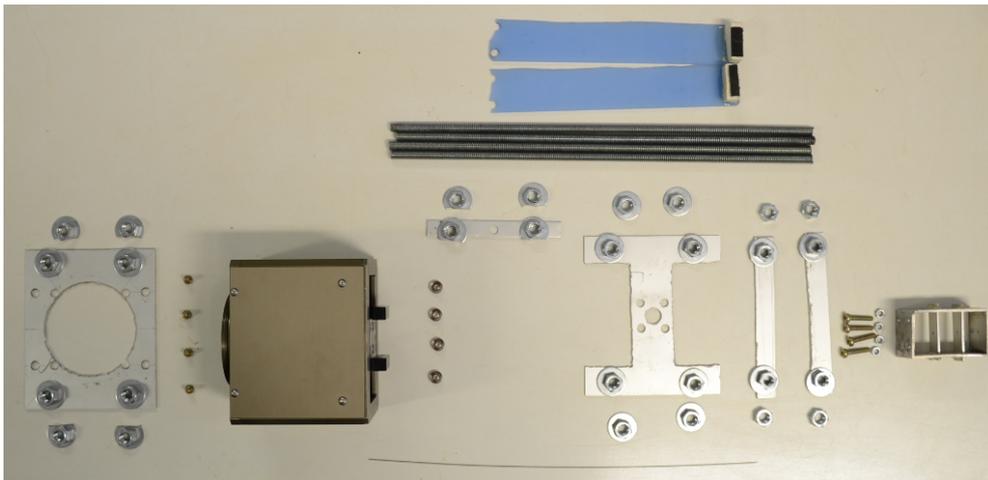


Figura 3.8: Vista das peças utilizadas na montagem do mecanismo de inserção por micropasso.

3.4 O Manipulador Utilizado

A escolha de se utilizar um manipulador como parte do dispositivo de inserção de agulha vem do interesse em se obter uma plataforma de pesquisa flexível, possibilitando que diferentes trabalhos sejam realizados utilizando-se a mesma plataforma base. Acoplando-se o dispositivo de inserção ao efetuador de robô ganha-se mais graus de movimento, tornando possível alterar a posição inicial de inserção com facilidade. Ademais, isto possibilita alterar o método de inserção apenas substituindo-se o dispositivo acoplado ao robô, sem que seja necessário construir uma plataforma inteiramente nova.

Outros trabalhos na área geralmente utilizam dispositivos dedicados (como mostrado na seção 2.2.3), com dois graus de liberdade, que visam controlar as velocidades de inserção v e rotação ω da agulha, diretamente. Muitas vezes estes dispositivos são grandes e de difícil manuseio, exigindo uma configuração fixa, como ocorre com o *Dispositivo de Antena Telescópica*. O uso de um manipulador torna possível alterar o ponto inicial e a direção da inserção sem muito esforço.

O manipulador utilizado neste trabalho foi um robô modular da Schunk do tipo Lightweight arm LWA3 (visto na Figura 3.9), composto por 7 módulos rotacionais da família PRL. Cada módulo contém um motor servo de corrente contínua sem escovas, com freio integrado, encoder incremental e um controlador PID embarcado. Em nossa montagem os módulos presentes, vistos à partir da base, são dois PRL 120, dois PRL 100, dois PRL 80 e um PRL 60. Conectada ao sétimo módulo, tem-se uma garra de ativação elétrica de dois dedos paralelos PG 070.

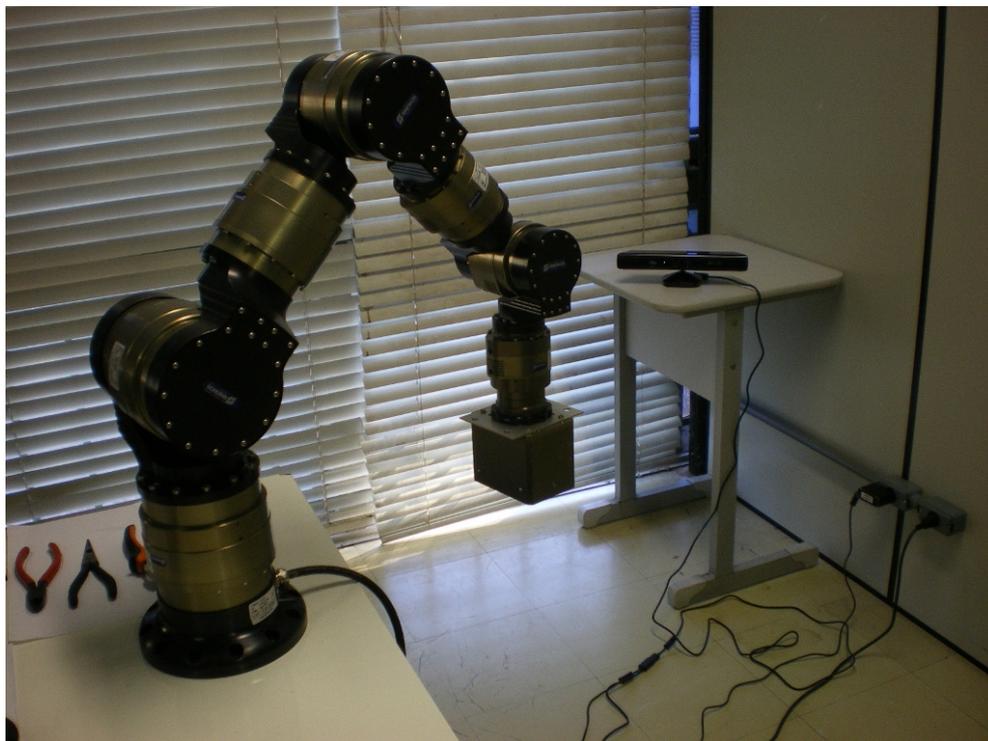


Figura 3.9: Manipulador modular Schunk LWA3, com 7 graus de liberdade.

A comunicação com cada um dos módulos do robô é feita através de um barramento CAN. Por meio deste é possível ler informações sobre o estado do módulo (posição, velocidade, tensão,

corrente, temperatura, código de erro, entre outras) e enviar referências, usando-se as funções da biblioteca `libm5api`¹, fornecida pela Schunk. O controlador PID embarcado se ocupa de seguir as referências fornecidas, indicando quando o módulo atinge a posição desejada. A alimentação do barramento é independente da alimentação de acionamento dos motores, o que permite comunicar com os módulos e ler informações, mesmo que os motores estejam desativados.

Para facilitar as conexões e proteger o hardware, o robô possui uma placa de interface, mostrada na Figura 3.10. Esta placa possui conectores de entrada e saída para as alimentações lógica e de acionamento (ambas 24V), que estão ligados por meio de fusíveis, para proteger o robô contra sobrecorrente. Ela também possui dois terminais NIN e NOUT, que desativam todos os terminais de saída placa se não estiverem conectados entre si. Normalmente estes terminais são usados para a instalação de um botão de parada de emergência. Os sinais do barramento CAN podem ser fornecidos por pinos de entrada (ao lado dos pinos NIN e NOUT) ou pelo conector para cabo CAN.

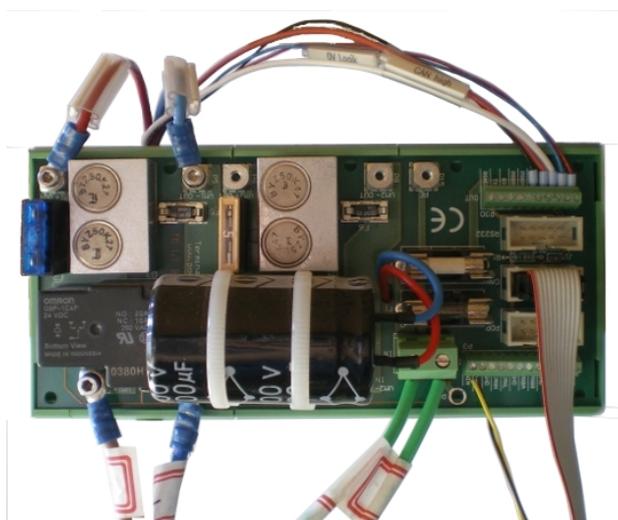


Figura 3.10: Placa de interface para alimentação e controle do robô.

3.4.1 Modelo Cinemático

Para se realizar uma tarefa de guiagem de agulha usando o manipulador é preciso controlar a posição e orientação de seu efetuator em 6 graus de liberdade, uma vez que a agulha não apresenta simetria radial. Para isso, é preciso obter a modelagem cinemática do manipulador. Tal modelagem foi realizada pelo Murilo [8], que utiliza a mesma plataforma robótica em seu projeto de mestrado. Seguindo as convenções DH, extraiu-se os parâmetros de cada junta e construiu-se a Tabela 3.1. A Figura 3.11 representa o esquemático mecânico do robô, à partir do qual os parâmetros foram obtidos.

Os parâmetros exibidos na Tabela 3.1 diferem um pouco dos parâmetros fornecidos pela página da Schunk na internet². Essa divergência se dá em função de escolhas feitas em relação à origem

¹http://mirror.umd.edu/roswiki/doc/unstable/api/libm5api/html/m5apiw32_8h.html

²<http://www.schunk-modular-robotics.com/left-navigation/service-robotics/components/manipulators/7dof-lwa-manipulator-10kg-payload.html>

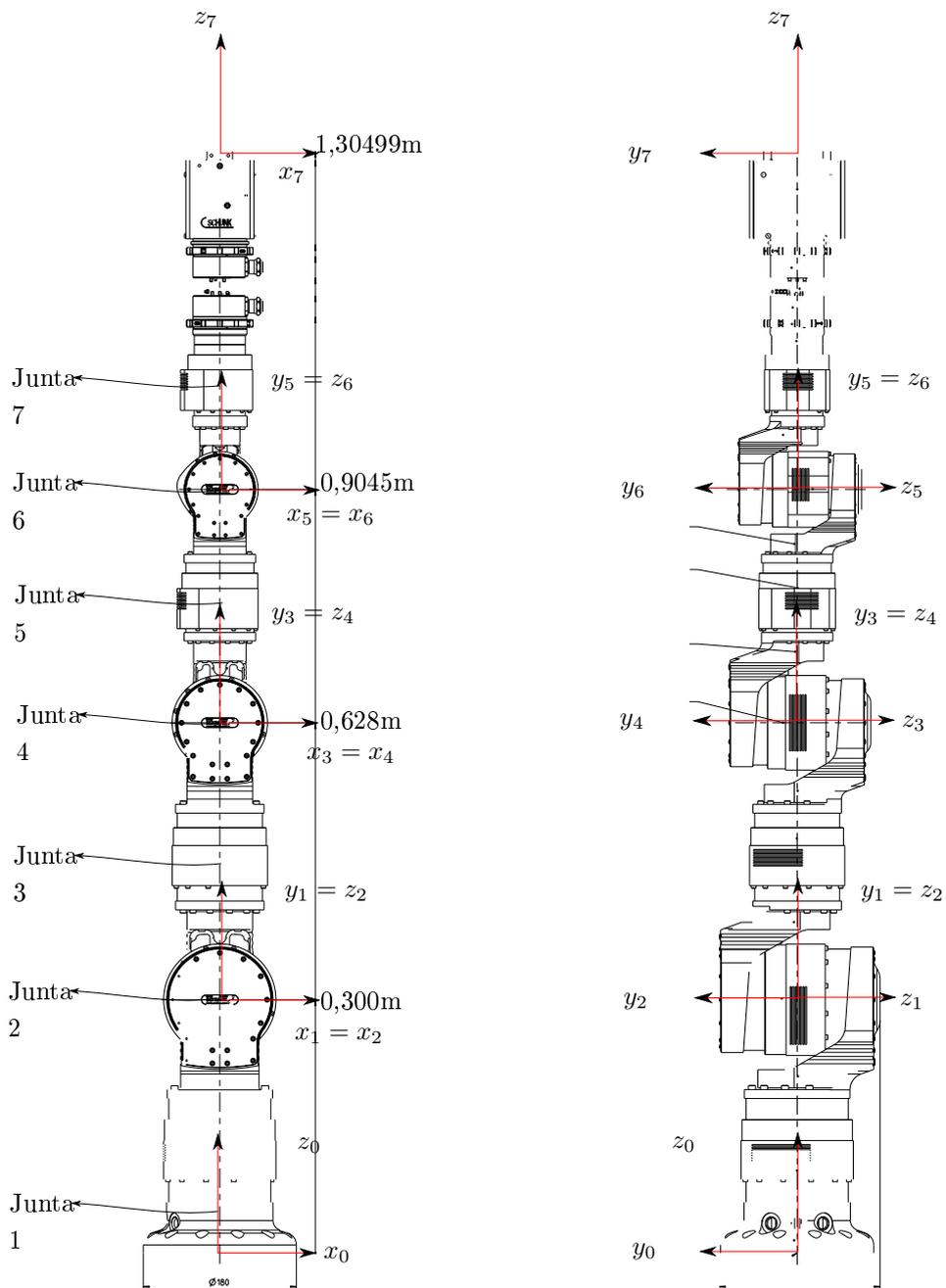


Figura 3.11: Esquemático mecânico do manipulador Schunk, mostrando os sistemas de coordenadas associados a cada uma das juntas. Fonte : [8]

| Junta | $\theta[rad]$ | $d[m]$ | $r[m]$ | $\alpha[rad]$ |
|-------|---------------|--------|--------|------------------|
| 1 | θ_1 | 0,3000 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 2 | θ_2 | 0 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |
| 3 | θ_3 | 0,3280 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 4 | θ_4 | 0 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |
| 5 | θ_5 | 0,2765 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 6 | θ_6 | 0 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |
| 7 | θ_7 | 0,3043 | 0 | 0 |

Tabela 3.1: Parâmetros DH do manipulador Schunk

do sistema de coordenadas global e dos sentidos escolhidos para os vetores x dos sistemas de coordenadas de cada junta. Enquanto a DH disponibilizada pela Schunk posiciona o sistema de coordenadas global no centro da junta 2, optou-se aqui por colocá-lo na base do robô por ser um melhor referencial de posição absoluta.

O modelo dinâmico do manipulador não foi levantado, pois a tarefa de guiagem de agulha ocorre a baixas velocidades e exige esforços muito pequenos de cada uma das juntas, uma vez que o manipulador suporta uma carga de até 10 kg.

3.4.2 Modelo Cinemático Alterado (6-DOF)

Apesar da robustez esperada do manipulador Schunk, dois de seus módulos apresentaram defeito (em momentos distintos) durante o progresso deste trabalho. No primeiro caso, a primeira junta do robô começou a emitir fortes ruídos sonoros, dando a impressão de que havia alguma falha mecânica. Sob orientação do suporte técnico da Schunk na Alemanha, realizaram-se diversos testes com o robô, alterando-se inclusive os parâmetros do controlador PID embarcado.

Como este problema não acontecia de forma constante não foi possível determinar a causa exata do problema, de modo que continuou-se a utilizar o manipulador até que o módulo parou de funcionar completamente. Medindo-se as tensões lógica e de acionamento através do barramento CAN, percebeu-se que um fusível do módulo havia queimado. Foi preciso então desmontar o robô, abrir o módulo e substituir o fusível queimado por um fio (esta foi a recomendação do suporte técnico), para que a junta voltasse a funcionar.

Em outro momento, um caso semelhante ocorreu com o quarto módulo do manipulador, porém desta vez após a substituição do fusível, o encoder da junta apresentou defeito. Este problema não pôde ser reparado no laboratório, entretanto, por se tratar de um robô modular, foi possível remover a quarta junta do robô e alterar a sua estrutura, obtendo assim um manipulador de apenas 6 graus de mobilidade, que foi carinhosamente apelidado de Schunkenstein (visto na Figura 3.12). Para fins de documentação, todo o processo de desmontagem do robô está descrito no anexo III.

Esta alteração reduziu drasticamente o espaço destro do robô, porém ainda foi possível utilizá-lo para realizar operações de guiagem de agulha. Da mesma forma que procedido para a configuração original, obteve-se os parâmetros DH da configuração modificada, mostrados na Tabela 3.2.

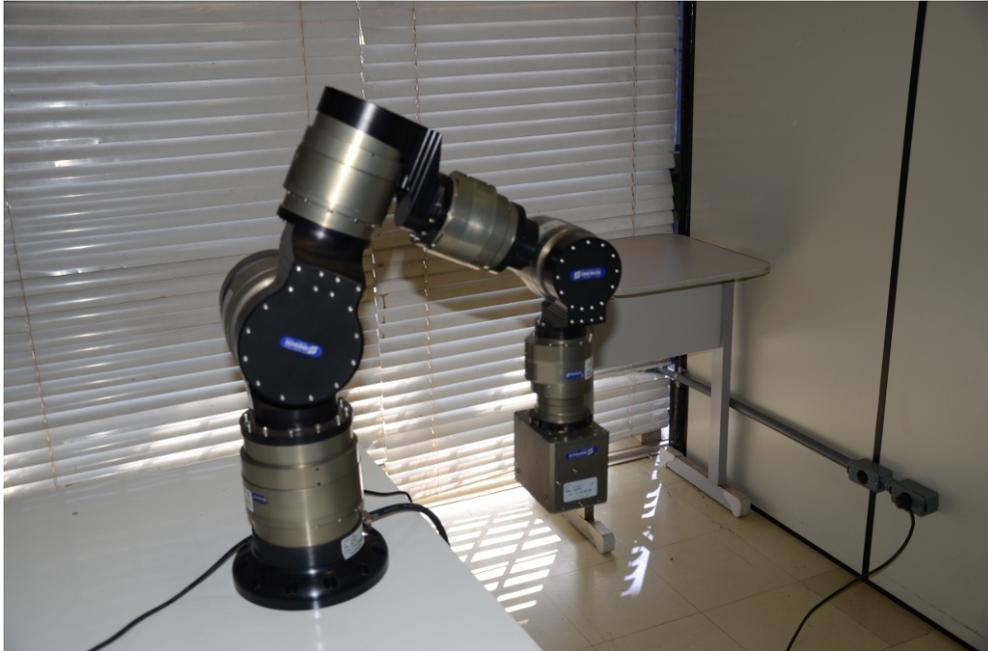


Figura 3.12: Manipulador Schunk em configuração modificada (6-DOF).

| Junta | $\theta[\text{rad}]$ | $d[\text{m}]$ | $r[\text{m}]$ | $\alpha[\text{rad}]$ |
|-------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|
| 1 | θ_1 | 0,3000 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 2 | θ_2 | 0,0 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |
| 3 | θ_3 | 0,1590 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 4 | θ_4 | 0,2565 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |
| 5 | θ_5 | 0,0 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 6 | θ_6 | 0,3043 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |

Tabela 3.2: Parâmetros DH do manipulador Schunk em configuração modificada (6-DOF).

3.5 O Controle do Manipulador

Para se controlar o manipulador, utilizou-se uma placa PCI CAN conectada à placa de interface do robô. A Schunk fornece junto com o manipulador uma interface de controle, porém esta não é customizável, só funciona em ambiente Windows e apenas com uma placa CAN do fabricante ESD Microelectronics. Ela também fornece uma biblioteca em C++, `libm5api`, que permite enviar comandos a cada um dos módulos separadamente. Como deseja-se desenvolver uma plataforma aberta, tendo a opção de customizá-la como for necessário, optou-se aqui por utilizar a biblioteca em C++.

O mecanismo de inserção por micropasso desenvolvido possui 3 graus de liberdade, v , ω e segurar/soltar a agulha, no entanto para se controlar o manipulador é preciso utilizar o seu modelo cinemático, uma vez que a biblioteca disponível só fornece funções à níveis de junta. Desta forma o desenvolvimento do software se deu em duas etapas. Primeiramente desenvolveram-se as funcionalidades básicas de movimentação do manipulador, em seguida implementaram-se as estratégias de movimentação em alto nível para se controlar os 3 graus de liberdade relevantes à

tarefa de guiagem de agulha.

Na primeira etapa, optou-se por desenvolver o sistema de forma modular, não só com o intuito de torná-lo mais robusto, mas também para que as funções desenvolvidas permitam o uso do manipulador em diferentes trabalhos. Em função disso, decidiu-se implementar o controle do manipulador da forma mais ampla possível, permitindo até mesmo compartilhar o código criado com outros desenvolvedores que utilizem manipuladores Schunk. Por este motivo, toda a programação foi feita, utilizando-se um meta sistema operacional chamado ROS (Robot Operating System).

3.5.1 ROS³

ROS é um meta sistema operacional que pode ser instalado em um computador com sistema Linux, fornecendo uma série de funcionalidades importantes para se trabalhar com robôs, tais como abstração do hardware, controle de dispositivos em baixo nível e sistema de mensagens entre processos. Por ser um sistema de código aberto altamente modular, ROS facilita compartilhamento de código entre desenvolvedores que utilizem plataformas robóticas parecidas. Graças a isso, muitos robôs e sensores já possuem drivers implementados no ROS, que podem ser facilmente conectados à aplicação desejada.

Internamente, ROS funciona como um grafo, onde cada nó corresponde a um processo e os caminhos entre eles a interfaces gerais de comunicação que podem ser tópicos ou serviços. Tópicos são canais de comunicação unidirecional semelhantes a filas de mensagens, enquanto serviços são comunicações bidirecionais compostas de solicitação e resposta. No ROS os arquivos são organizados em pacotes, que carregam além dos códigos fonte e dos binários, serviços, mensagens e relações de dependência associadas. Pacotes, por sua vez, são agrupados em *stacks*, que correspondem ao mais alto nível de organização hierárquica.

Quando começou-se a desenvolver o software havia um pacote disponível na wiki do ROS, chamado *schunk_powercube_chain*, que fornecia funções para comunicar com módulos Schunk da família PRL, porém ele não continha todas as funcionalidades necessárias para este trabalho. Por isso, decidiu-se criar uma nova *stack schunk* para armazenar todos os pacotes desenvolvidos para o nosso manipulador. Nesta *stack*, criaram-se diferentes pacotes, como mostra a Figura 3.13.

No pacote *schunk_low* implementou-se as funções de mais baixo nível do manipulador, referentes à inicialização e comunicação básica com os módulos, encapsulando as funções da biblioteca `libm5api`. Este pacote possui o nó *schunk_low_control* que recebe referências em coordenadas de juntas dos controladores de alto nível. O pacote *schunk_high* agrupa uma série de controladores cartesianos capazes de receber referências em coordenadas cartesianas e gerar as coordenadas de juntas a serem enviadas ao pacote *schunk_low*. Cada controlador recebe diferentes tipos de referências, permitindo controlar o manipulador de diferentes modos, sendo assim capaz de realizar diferentes tarefas.

Tanto o pacote *schunk_joy* quanto o *schunk_needle* geram referências para o pacote *schunk_high*, permitindo-se realizar inserções de agulha com o manipulador. Os nós do pacote *schunk_joy* possibilitam ler comandos de um joystick USB convencional e enviar comandos ao robô de modo a re-

³<http://www.ros.org/wiki/>

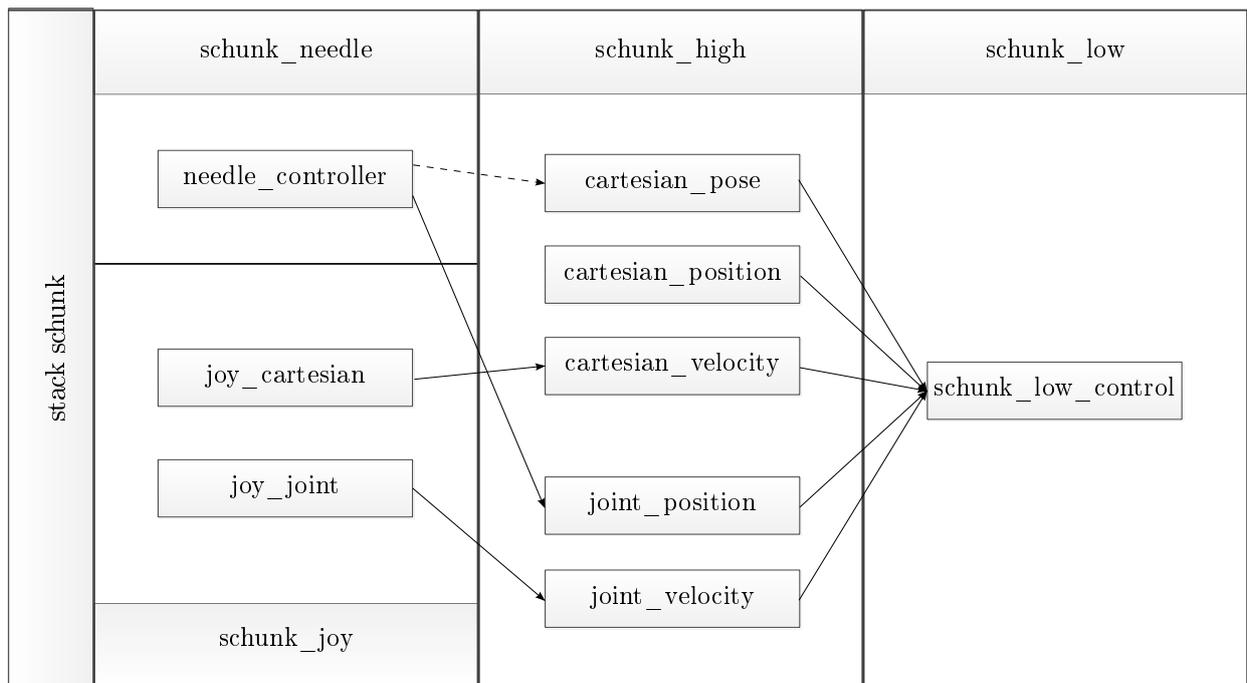


Figura 3.13: Organização dos pacotes presentes na stack *schunk*.

alizer inserções de forma manual. Já o pacote *schunk_needle*, possui um único nó *needle_controller*, responsável por realizar a inserção de forma automática, executando uma trajetória pré-definida. As subseções a seguir descrevem cada um desses pacotes em mais detalhes.

3.5.2 Pacote *schunk_low*

O pacote *schunk_low* foi o primeiro a ser desenvolvido neste trabalho e fornece as funcionalidades básicas de controle do manipulador. Ele funciona principalmente como um encapsulamento para as funções da biblioteca *libm5api* para o ROS de modo que ele possa se comunicar com outros pacotes. As funcionalidades básicas de um módulo PRL consistem em acionar o motor, ler posição e velocidade, ler e definir parâmetros do controlador interno, ler características elétricas como corrente e tensão no motor, entre outras. Uma lista completa das funções disponíveis pode ser vista online⁴.

Cada módulo do manipulador possui um controlador PID embarcado, fazendo com que seja necessário apenas fornecer as referências desejadas para que os motores sejam acionados. Existem 5 formas diferentes de fornecer referências para os motores, como mostra a Tabela 3.3. Uma vez acionados os motores, é possível monitorar a posição, a velocidade e a corrente do módulo caso se deseje implementar algum controle adicional, integrado no software. Todos os parâmetros do controlador embarcado são acessíveis via software e podem ser configurados. Além dos parâmetros PID, é possível definir valores limite e padrão para velocidades, posições e acelerações, definir a posição zero do módulo, entre outros. A Tabela 3.4 mostra alguns dos parâmetros que podem ser configurados.

⁴<http://www.golems.org/files/Programmers%20guide%20for%20PowerCube.pdf>

| Função | Descrição |
|----------------------|---|
| PCube_movePos | Realiza um perfil de movimento do tipo rampa até atingir a posição alvo, utilizando velocidade e aceleração padrão |
| PCube_moveRamp | Realiza um perfil de movimento do tipo rampa até atingir a posição alvo, utilizando velocidade e aceleração escolhidas |
| PCube_moveVel | Realiza um movimento de velocidade constante |
| PCube_moveCur | Realiza um movimento de corrente constante |
| PCube_moveStep | Realiza um movimento até atingir a posição alvo, com duração determinada |
| PCube_startMotionAll | Permite o acionamento de todos os módulos ao mesmo tempo, caso o modo de acionamento tenha sido alterado para síncrono (neste caso, as demais funções apenas definem as referências sem de fato mover o módulo) |

Tabela 3.3: Funções de acionamento dos módulos Schunk PRL

| Parâmetro | Descrição |
|------------|--|
| A0 | Aceleração nominal (usado no cálculo dos parâmetros PID) |
| C0 | Fator de amplificação (usado no cálculo dos parâmetros PID) |
| Damp | Fator de amortecimento (usado no cálculo dos parâmetros PID) |
| HomeOffset | Posição zero do módulo |
| HomeVel | Velocidade com que o módulo retorna à posição zero |
| MinPos | Limite inferior para a posição do módulo |
| MaxPos | Limite superior para a posição do módulo |
| MaxVel | Máxima velocidade que o módulo pode assumir |
| MaxAcc | Máxima aceleração que o módulo pode realizar |
| MaxCur | Máxima corrente que o módulo permite |
| RampVel | Velocidade padrão usada para realizar movimento em perfil de rampa |
| RampAcc | Aceleração padrão usada para realizar movimento em perfil de rampa |

Tabela 3.4: Parâmetros configuráveis do controlador embarcado dos módulos Schunk PRL

Utilizando-se de tais funções construiu-se o nó principal do pacote, *schunk_low_control*, contendo três funcionalidades principais. A primeira consiste em inicializar o robô e configurar os parâmetros de todos os módulos, utilizando um recurso do ROS chamado Parameter Server. Este recurso possibilita ler uma série de parâmetros de um arquivo *.yaml* com apenas um comando e disponibilizar estes parâmetros para qualquer processo ativo dentro do ROS. Desta forma, foi possível alterar os parâmetros de cada módulo de forma prática e eficiente. A segunda consiste em monitorar periodicamente o estado dos módulos e publicá-los em tópicos de forma que o estado completo do robô esteja disponível para outros processos ou para fins de depuração. A terceira consiste em uma série de serviços por meio dos quais o nó é realmente controlado.

A Tabela 3.5 lista os serviços criados para o nó *schunk_low_control*. O primeiro serviço a ser chamado é o *Init*, que inicializa a comunicação com o hardware. Caso algum módulo apresente erro de comunicação o serviço retorna um erro e o manipulador não é inicializado. Isso permite aos outros nós saberem se o nó *schunk_low_control* está funcionando adequadamente ou repetir o processo de inicialização até que o manipulador possa ser inicializado. Os serviços *Stop* e *Recover* permitem, respectivamente, parar o manipulador imediatamente, caso ocorra um problema e reiniciá-lo quando o problema for solucionado.

| Serviço | Descrição |
|-----------------------|---|
| <i>Init</i> | Faz a inicialização completa do manipulador, enviando todos os parâmetros escolhidos aos módulos. Habilita todos os demais serviços. |
| <i>Home</i> | Move todos os módulos para a posição zero. |
| <i>Stop</i> | Para todos os módulos imediatamente. |
| <i>Recover</i> | Reinicializa todos os módulos após uma parada emergencial. |
| <i>SetControlMode</i> | Seleciona o modo de controle (posição ou velocidade) |
| <i>GetPosVel</i> | Retorna as posições e velocidades de todos os módulos |
| <i>Connect</i> | Conecta o processo ao nó <i>schunk_low_control</i> . Um processo conectado ganha permissão para publicar referências de posição ou velocidade em tópicos. |
| <i>Disconnect</i> | Desconecta o processo do nó <i>schunk_low_control</i> , liberando-o para novas conexões (apenas um processo pode estar conectado por vez). |
| <i>GripperOpen</i> | Abre a garra. |
| <i>GripperClose</i> | Fecha a garra. |
| <i>GripperSetVel</i> | Move a garra com velocidade constante. |

Tabela 3.5: Serviços disponíveis no nó *schunk_low_control*

O serviço *Home* move todos os módulos para a posição zero. Para mover o manipulador para outras posições é possível publicar referências de velocidade ou posição em dois tópicos criados para isso. Apenas um dos tópicos é lido por vez dependendo se o manipulador está em modo de controle de posição ou velocidade. Antes de começar a publicar referências, porém, é preciso se conectar ao nó *schunk_low_control*, caso o contrário as referências são ignoradas. Apenas um processo pode estar conectado ao *schunk_low_control* por vez, o que impede que múltiplos processos tentem controlar o robô ao mesmo tempo. Por fim, o serviço *GetPosVel* lê e retorna as posições e velocidades de todos os módulos. Este serviço permite aos controladores de alto nível obterem tais valores de forma rápida, sem ter que esperar pelas mensagens publicadas periodicamente, o que

ocorre a uma frequência mais baixa.

Além de publicar o estado do manipulador, outras tarefas são executadas de forma periódica na rotina principal do *schunk_low_control*. Uma delas é o monitoramento das posições dos módulos, caso o robô esteja em modo de controle de velocidade, para impedir que uma junta atinja um sensor de fim de curso. Quando isso ocorre, o freio da junta é acionado, e é preciso realizar uma operação de Recover antes que ela possa se mover novamente. Caso fosse desejável, tensões e correntes também poderiam ser monitoradas aqui para sinalizar momentos em que um módulo se encontra em sobrecarga.

3.5.3 Pacote *schunk_high*

O pacote *schunk_high* contém controladores cartesianos, que recebem referências de movimentação para o efetuador do robô e calculam as referências de juntas correspondentes, que devem ser enviadas ao *schunk_low*. Ele funciona como uma ponte entre o pacote *schunk_low* e a aplicação a ser desenvolvida, sendo esta normalmente descrita em relações de posições ou velocidades do efetuador. Enquanto o pacote *schunk_low* possui uma estrutura geral, permitindo-se controlar um conjunto de juntas qualquer, o pacote *schunk_high* faz o uso da matriz DH do robô, para resolver o problema da cinemática inversa.

Como o problema da cinemática inversa muitas vezes não possui solução fechada é comum resolver primeiramente o problema de cinemática inversa diferencial, representado na forma

$$(J_{tar})^\dagger . u(k) = \dot{\theta},$$

onde u é o vetor de sinais de controle fornecidos pelo controlador, $\dot{\theta}$ é o vetor das velocidades angulares das juntas e $(J_{tar})^\dagger$ é a pseudo-inversa amortecida da matriz jacobiana da tarefa. O sinal de controle u é gerado por um controlador PID discreto, dado por

$$u(k) = K_p . e(k) + K_i \sum_{\lambda=0}^k e(\lambda) + \frac{K_d . (e(k) - e(k-1))}{T},$$

onde $e(k) = x(k) - x_{ref}(k)$, T é o período de amostragem e K_p , K_d e K_i são matrizes diagonais contendo os ganhos do controlador PID para cada elemento de $u(k)$. $x(k)$ é o vetor que contém os valores atuais das variáveis de estado e $x_{ref}(k)$ os valores desejados.

A Figura 3.14 apresenta um diagrama desta lógica de controle. Dependendo do tipo de tarefa a ser realizada, o vetor de referências pode conter diferentes elementos. Por isso desenvolveu-se neste pacote diferentes controladores, entre eles um controlador de pose, um de posição e um de velocidade, todos seguindo a mesma estrutura de controle. Além do vetor de referências, estes controladores se diferem no vetor das variáveis de estado, na matriz jacobiana utilizada e nos ganhos do controlador PID.

O controlador de pose controla a posição e a orientação do efetuador simultaneamente. Tanto a pose do efetuador como a referência são dadas em quatérnions duais, de modo que $x(k) = \underline{\mathbf{x}}(k)$ e $x_{ref}(k) = \underline{\mathbf{x}}_{ref}(k)$ e a jacobiana utilizada é a jacobiana analítica em quatérnions duais. A implementação destas operações foi feita utilizando-se a biblioteca de quatérnions duais em C++ desenvolvida pelo Murilo.

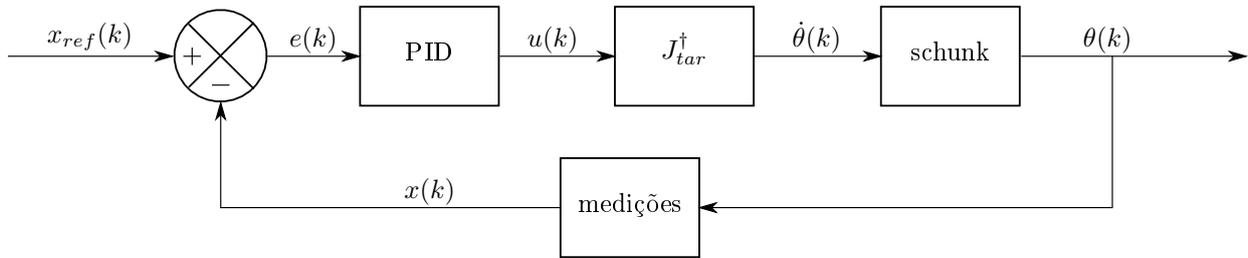


Figura 3.14: Diagrama simplificado da lógica utilizada pelos controladores cartesianos. Fonte: [9]

Em alguns tarefas no entanto apenas a posição é importante. Em casos como este, remover a restrição de orientação do efetuador torna o sistema mais livre para realizar movimentos mais naturais, além de exigir menos computacionalmente do controlador. Por isso, fez-se o controlador de posição. Ele recebe como referências a posição desejada do efetuador em x , y , z e utiliza parte da Jacobiana Geométrica.

O controlador de velocidade recebe referências de velocidades lineares e angulares em 6 graus de liberdade, da forma

$$x_{ref}(k) = v_{ref}(k) = \begin{pmatrix} v_{xref} \\ v_{yref} \\ v_{zref} \\ \omega_{xref} \\ \omega_{yref} \\ \omega_{zref} \end{pmatrix}$$

e realiza o controle das velocidades do efetuador. A jacobiana utilizada é a Jacobiana Geométrica completa.

Além destes três controladores cartesianos, o pacote *schunk_high* possui dois controladores adicionais que atuam à nível de junta. Estes módulos apenas encaminham as mensagens recebidas diretamente ao *schunk_low*, sem realizar efetivamente nenhum controle. Eles foram criados por questão de simetria na arquitetura do projeto de modo a estabelecer que apenas os nós do pacote *schunk_high* possam se comunicar com o *schunk_low*.

O fato de existirem vários controladores diferentes permite-se escolher o controlador que mais se adéqua para cada tarefa. Algumas tarefas podem utilizar mais de um controlador de forma alternada, uma vez que o *schunk_low* só aceita referências de um único nó por vez.

3.5.4 Pacote *schunk_joy*

Uma das vantagens do ROS é a facilidade de se integrar sensores e dispositivos comuns ao código desenvolvido. Seguindo este princípio, utilizamos o pacote *joy* já existente no ROS para interfacear nosso programa com um joystick USB (como visto na Figura 3.15). Este pacote é capaz de perceber quando um joystick USB está presente e reconhecer qualquer comando realizado com ele, publicando mensagens em um tópico específico. Criou-se então o pacote *schunk_joy*,



Figura 3.15: Joystick USB utilizado para se teleoperar o manipulador Schunk.

contendo nós capazes de interpretar estas mensagens, gerando referências para os controladores do *schunk_high*.

O primeiro nó criado foi o *joy_joint* responsável por converter os comandos do joystick em referências de juntas para o manipulador. Com ele uma deflexão ou torção do manche central são convertidas em velocidades angulares para duas juntas do robô. Os botões na parte inferior são usados para selecionar qual par de juntas deve ser atuado. O objetivo deste nó foi o de realizar os primeiros testes com o robô, além de possibilitar mover-se cada uma de suas juntas separadamente, colocando o manipulador em qualquer configuração possível.

O segundo nó criado, *joy_cartesian*, utiliza o controlador de velocidade para realizar uma inserção de agulha de forma manual. Com ele os comandos realizados no manche são usados para se determinar as velocidades v_z e ω_z do efetuador, sendo as demais velocidades mantidas sempre zero. Os botões do manche são utilizados para abrir ou fechar a garra, permitindo assim realizar todas as operações necessárias para se obter um micropasso. Esta forma de inserção é bastante demorada no entanto nos permitiu fazer alguns testes preliminares da estrutura mecânica, antes de se implementar o algoritmo de inserção automática, no pacote *schunk_needle*.

3.5.5 Pacote *schunk_needle*

O pacote *schunk_needle* apresenta um único nó, *needle_controller*, responsável por realizar uma inserção de agulha de forma automática, em malha aberta, uma vez que neste trabalho não dispõe-se do sistema de rastreamento da agulha. Inicialmente planejou-se utilizar o *needle_controller* para enviar referências ao controlador de pose, possibilitando aproximar o dispositivo de inserção do tecido, mantendo-se a orientação da agulha fixa. Com o intuito de simplificar a montagem do setup experimental, todas as inserções ocorreriam na direção vertical.

No entanto, o uso do manipulador sem um grau de liberdade impactou o problema de forma significativa. Ao aplicar-se a cinemática inversa, partindo de uma posição inicial como a da Figura 3.12, para se realizar uma inserção na vertical, percebe-se que apenas duas juntas do manipulador são utilizadas (as juntas 2 e 5 contando-se à partir da base). A junta 6 é utilizada para rotacionar

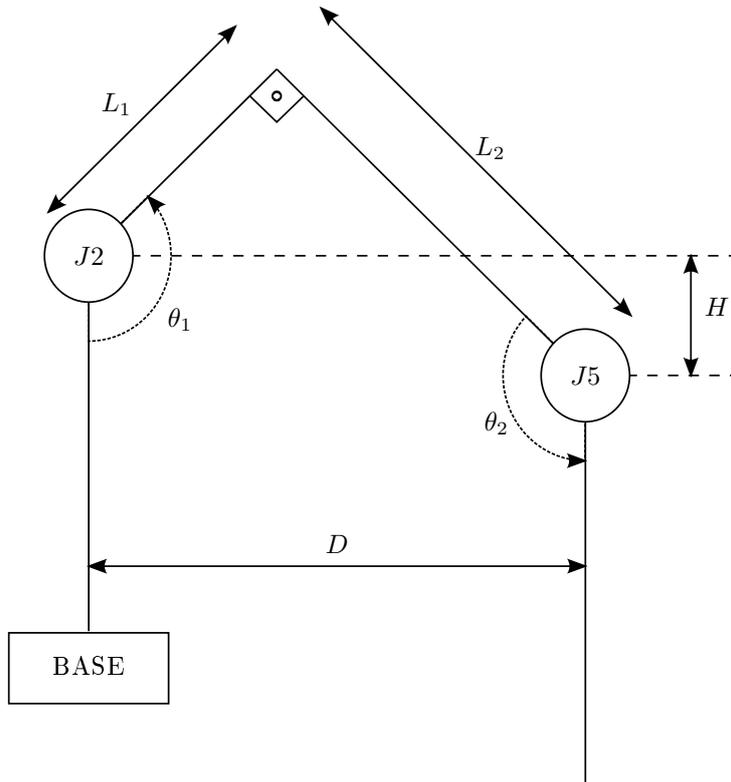


Figura 3.16: Representação do movimento do manipulador através de um modelo planar de 2-DOF.

a agulha em torno do próprio eixo e as juntas 1, 3 e 4 não podem ser utilizadas sem deslocar a agulha da orientação vertical. Por causa disso, o controle cartesiano pode ser simplificado pelo manipulador planar de dois graus de mobilidade, representado na Figura 3.16.

Analisando-se a disposição destes elementos percebe-se que para que a agulha permaneça na orientação vertical deve-se ter

$$\theta_1 + \theta_2 = 270^\circ \quad (3.1)$$

o que reduz o problema de inserção de agulha a um único grau de liberdade. Esta implicação, ao mesmo tempo que simplifica o problema, traz uma consequência muito séria, pois com um único grau de liberdade não se pode controlar H e D separadamente. Mais ainda, pode-se escrever H e D em função de θ_1 na forma

$$D = L_1 \sin \theta_1 - L_2 \cos \theta_1 \quad (3.2)$$

$$H = -L_1 \cos \theta_1 - L_2 \sin \theta_1 \quad (3.3)$$

Portanto, partindo-se de uma posição inicial $\theta_1 = \theta_i$ e aplicando-se um movimento, $\theta_1 = \theta_i + \delta$ suficientemente pequeno para que se possa utilizar as aproximações $\cos \delta = 1$ e $\sin \delta = \delta$ tem-se

$$\Delta D = \delta(L_1 \cos \theta_i + L_2 \sin \theta_i) \quad (3.4)$$

$$\Delta H = \delta(L_1 \sin \theta_i - L_2 \cos \theta_i) \quad (3.5)$$

Dessa forma, conclui-se que o manipulador em configuração modificada não é capaz de realizar inserção vertical sem causar deslocamento transversal na base da agulha. Entretanto, caso escolhasse um θ_i que minimize ΔD , é possível que os deslocamentos transversais sejam muito pequenos, uma vez que na inserção por micropasso o manipulador não se afasta muito do ponto de operação. Por estes motivos, implementou-se o *needle_controller* para fornecer referências de posição ao controlador de junta, descartando-se a necessidade de se utilizar a modelagem cinemática completa, uma vez que o movimento de inserção pode ser realizado atuando-se apenas um par de juntas.

O método de inserção por micropassos exige que a agulha seja inserida de forma discreta, no entanto ambas estratégias de inserção descritas em 2.2.2 poderiam ser adotadas. Optou-se aqui por utilizar o método que realiza inserção e rotação separadamente por ser de mais fácil adaptação ao caso discreto. Dessa forma, implementou-se o procedimento de inserção, de acordo com o Algoritmo 1.

No início do programa, faz-se o uso do recurso Parameter Server do ROS para ler os parâmetros relevantes à inserção, tais como a posição inicial do manipulador, o tamanho do passo e a trajetória em malha aberta a ser realizada. Por utilizar-se o método que realiza inserção e rotação separadamente, pode-se descrever a trajetória desejada indicando-se apenas a quantidade total de micropassos e em quais micropassos a agulha deve ser rotacionada em 180° .

Em seguida move-se o manipulador para a posição inicial e aguarda-se a chamada do serviço de início do procedimento. A inserção é realizada por meio de um laço que verifica se a agulha deve ser rotacionada ou não de acordo com o caminho estipulado e realiza um micropasso. Alguns contadores são utilizados para se identificar o ponto da trajetória em que o programa se encontra e o final da inserção.

Algoritmo 1 inserção de agulha automática

caminho ← {leitura do parâmetro}
total_de_passos ← {leitura do parâmetro}
mover_para_posição_inicial()

enquanto não começa
 {aguarda o início da inserção}
fim enquanto

passos ← 0
giros ← 0
passo_giro ← *caminho*[*giros*]

enquanto *passos* < *total_de_passos*

se *passos* = *passo_giro* **então**
 gira_180()
 giros ← *giros* + 1
 passo_giro ← *caminho*[*giros*]
 fim se

 insere_a_agulha()
 abre_a_garra()
 sobe()
 fecha_a_garra()
 passos ← *passos* + 1

fim enquanto

Capítulo 4

Resultados Experimentais

*When I have fully decided that a result is
worth getting I go ahead of it and make
trial after trial until it comes
Thomas A. Edison*

4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever os experimentos que foram realizados para se validar o dispositivo de inserção por micropasso desenvolvido e os algoritmos de controle implementados para guiagem de agulha. Inicialmente apresenta-se o setup experimental utilizado, na seção 4.2, fornecendo-se detalhes sobre a agulha, o tecido e a montagem do dispositivo de inserção. Em seguida, a seção 4.3 apresenta experimentos preliminares realizados para avaliar qualitativamente a capacidade da plataforma desenvolvida de inserir a agulha, bem como a adequação entre agulha e tecido escolhidos.

Em sequência, realizam-se três tipos de experimentos para se avaliar quantitativamente a eficiência da plataforma desenvolvida em relação a três fatores escolhidos. A seção 4.4 apresenta experimentos de análise da flambagem da agulha durante o início da inserção. A seção 4.5 descreve os experimentos que avaliam o efeito da rigidez torcional e a seção 4.6 apresenta experimentos de repetibilidade em malha aberta. Por fim, faz-se uma análise dos resultados na seção 4.7, avaliando-se a performance geral do sistema.

4.2 Setup Experimental

Conforme relatado na seção 3.1, experimentos de guiagem de agulhas requerem o seguinte setup experimental: a agulha a ser inserida em algum tecido real ou artificial, o dispositivo de inserção e um sistema de câmeras para registro dos resultados. Em relação à agulha, utilizou-se um fio de Nitinol (liga metálica de composição 55,5% Níquel e 44,5% Titânio), de 0,61 mm de diâmetro com um chanfro de aproximadamente 5° na ponta, como mostra a Figura 4.1. O chanfro foi feito manualmente, utilizando-se um esmeril e um transferidor permitindo-se ajustar do ângulo desejado. Após chanfrada, uma pequena dobra foi feita na ponta da agulha, na direção do chanfro, para aumentar a sua curvatura natural. Este tipo de agulha vem sendo muito utilizado, devido à



Figura 4.1: Agulha de Nitinol com chanfro de 5° e dobra na ponta

alta elasticidade do Nitinol.

A escolha do material utilizado para simular o tecido é mais ampla, pois existem diferentes opções no mercado. Idealmente ele deve ter as mesmas propriedades do interior do corpo humano, para melhor representar o caso real. No entanto sua escolha deve também estar intimamente ligada à escolha da agulha, uma vez que a rigidez relativa entre a agulha e o tecido tem grande impacto na curvatura obtida. Em função disso tem-se priorizado escolher tecidos que proporcionem boas curvaturas, de modo a possibilitar os experimentos para validar as técnicas estudadas.

Empresas como a Corbin¹ e a Smooth-on² produzem materiais para experimentos deste tipo, no entanto optou-se aqui por uma solução simples e de baixo custo. Além disso, foi necessário escolher um material transparente, de modo a permitir a visualização da agulha dentro do tecido. Por isso utilizou-se uma receita caseira de gelatina balística, composta de gelatina e glicerina, dada a sua facilidade de produção e a possibilidade de se alterar a rigidez do tecido modificando-se a concentração dos ingredientes. A composição de gelatina utilizada nos experimentos foi de 1l de água, 400ml de glicerina e 72g de gelatina em pó sem sabor. Tal receita de gelatina foi encontrada pela aluna Marcella Cortat, que participou do projeto durante o período inicial.

O bloco de gelatina produzido, de dimensões aproximadas de 25 cm x 15 cm x 5 cm, foi acomodado entre duas placas de acrílico de dimensões 30 cm x 20 cm. As placas de acrílico, por sua vez, foram fixadas na posição vertical em um suporte preso a uma mesa com trilhos, de modo que fosse possível deslocar a gelatina lateralmente. Essa montagem permitiu alterar facilmente o ponto de inserção entre um experimento e o outro, uma vez que não se pode realizar duas inserções no mesmo ponto, pois o caminho aberto na primeira inserção afetaria o movimento da agulha.

Em frente à mesa com trilhos, posicionou-se uma câmera Nikon D7000, cerca de 1 m de distância, apontando para o centro da gelatina. A distância da câmera foi ajustada de modo que pequenos deslocamentos laterais na gelatina, não a tirassem da região central da imagem, evitando assim efeitos causados pela distorção da lente. Para possibilitar a obtenção precisa da escala das imagens, um papel milimetrado foi fixado à placa de acrílico posterior.

As inserções foram realizadas na direção vertical, de cima para baixo, posicionando-se o suporte para gelatina abaixo do robô. Escolheu-se esta direção de inserção, por ser a direção de mais fácil movimentação, dada a configuração do robô e por ser mais fácil posicionar o suporte para a gelatina. A Figura 4.2 mostra este setup completo.

¹<http://www.corbins.com/sim-test.htm>

²<http://www.smooth-on.com/Ecoflex%3D-Superso/c1130/index.html>

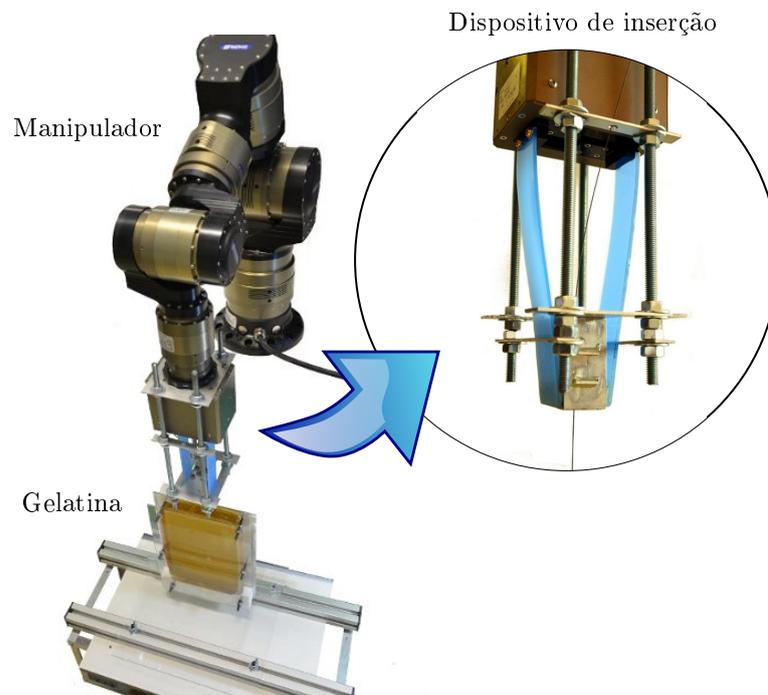


Figura 4.2: Setup experimental utilizado

A montagem do dispositivo de inserção por micropasso na garra do manipulador foi feita nas seguintes etapas. Primeiramente fixou-se os extensores fabricados, de cerca de 20 cm, nos dedos da garra. Em seguida posicionou-se a armação metálica de modo que os blocos de borracha pudessem entrar no compartimento frontal sem causar muito atrito com a armação. Fez-se então o ajuste fino da posição da armação, movendo os 4 parafusos que a fixam, de modo a garantir o alinhamento da agulha com o último elo do manipulador. Tal ajuste foi feito utilizando-se folhas de papel milimetrado fixas à garra, como mostra a Figura 4.3. Por fim, posicionou-se os fulcros em posição que proporcionasse pressão suficiente para segurar a agulha com firmeza. Tal posição, determinada experimentalmente, produziu um fator de alavanca de 4 para 1 nos extensores da garra.



Figura 4.3: Ajuste fino da posição da armação metálica do dispositivo de inserção por micropasso

4.3 Experimentos Preliminares

Todos os experimentos aqui descritos foram realizados utilizando-se o manipulador Schunk em configuração modificada (6-DOF). Desta forma, fez-se o controle do robô a nível de junta, sem utilizar-se os controladores cartesianos desenvolvidos no pacote *schunk_high*, pelos motivos apresentados em 3.5.5. Apesar disso, estes controladores puderam ser validados por meio de um trabalho de interação homem-robô realizado com o manipulador, em paralelo a este projeto. Em tal trabalho, descrito no anexo V, fez-se a teleoperação do manipulador, em sua configuração original (7-DOF), utilizando-se o sensor Kinect.

Assim que foi possível controlar o manipulador e o mecanismo de inserção por micropasso ficou pronto, realizaram-se experimentos preliminares para avaliar o sistema de forma qualitativa. Estes experimentos não tem como objetivo medir a performance do sistema de inserção por micropasso para compará-lo aos demais sistemas, mas sim apenas verificar que o trabalho desenvolvido possibilitava a inserção da agulha na gelatina.

Com o intuito de realizar inserções na direção vertical, encontrou-se o ponto de operação no qual o deslocamento transversal da base da agulha é mínimo. Para isso, minimizou-se o quadrado de ΔD , cuja expressão é dada por 3.4. O valor obtido foi

$$\arg \min_{\theta_i} (\Delta D)^2 = 152,8^\circ.$$

Com isso, decidiu-se realizar os experimentos próximos ao ponto de operação

$$\theta_1 = 152,8 \text{ e } \theta_2 = 117,2.$$

A Figura 4.4, mostra um gráfico de $\Delta D \times \Delta H$ para movimentos realizados nestas condições. A partir dela pode-se ver que realizando-se micropassos inferiores a 60 mm, o deslocamento transversal da agulha é menor do que 1,0 mm.

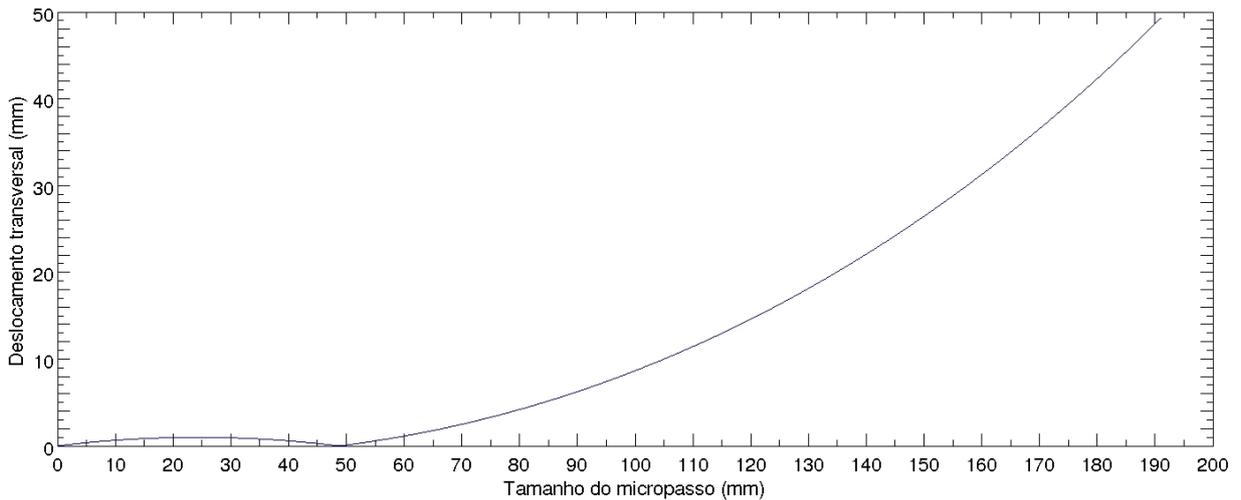


Figura 4.4: Relação $\Delta D \times \Delta H$ para movimentos realizados perto do ponto de operação $\theta_i = 152,8^\circ$

Antes de iniciar qualquer experimento é preciso realizar o ajuste da posição angular inicial da agulha. Para que o movimento da agulha ocorra em um plano paralelo às placas de acrílico, evitando assim que a agulha saia da gelatina, é preciso garantir que o chanfro aponte nesta direção.

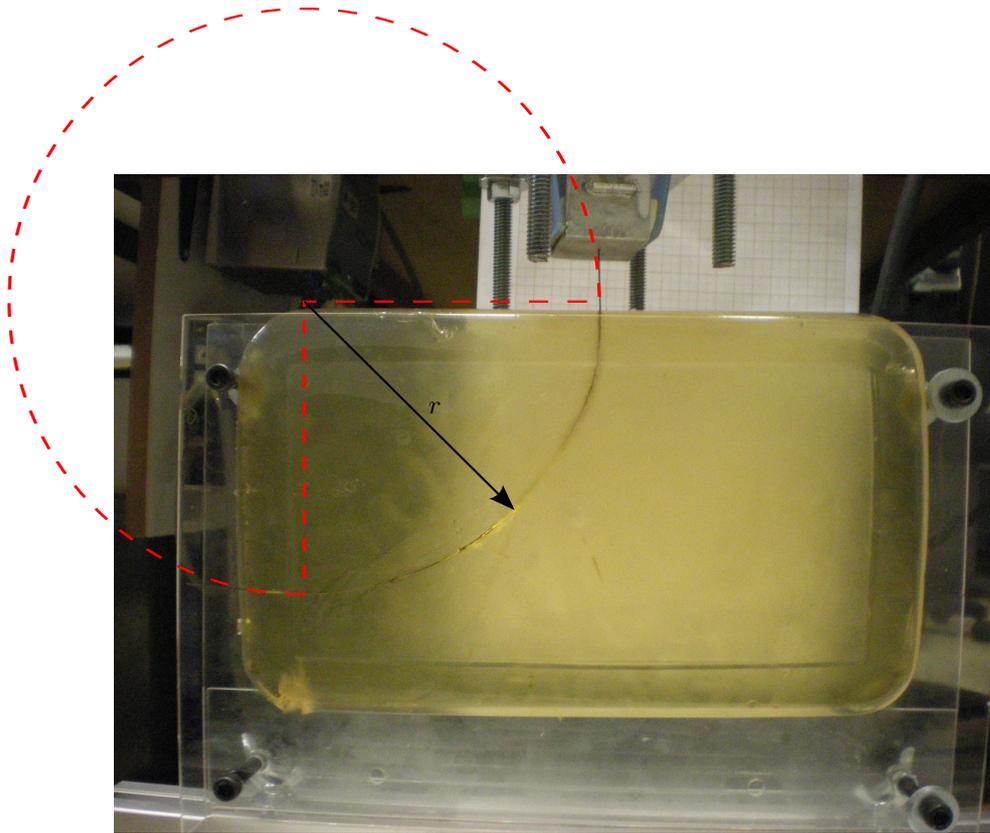


Figura 4.5: Inserção simples, realizada por sucessivos micropassos sem rotação

Tal ajuste foi feito a olho nu, utilizando-se uma fonte de luz direcionada para auxiliar, e testado por meio de pequenas inserções realizadas na gelatina. Caso houvesse um erro significativo, removia-se a agulha e aplicava-se uma rotação com o manipulador de modo a compensar o erro. Em alguns casos, foram necessárias diversas pequenas inserções para se calibrar o ângulo inicial da agulha.

O primeiro experimento realizado consistiu apenas em uma inserção sem rotação, composta de muitos micropasso até a saída da agulha pela lateral da gelatina. A Figura 4.5 representa este experimento. À partir deste teste foi possível ver que a escolha de agulha e tecido estava adequada pois obteve-se um raio de curvatura de aproximadamente 16 cm , o que é pequeno o bastante para permitir trajetórias complexas em que a agulha tenha que desviar de muitos obstáculos.

Infelizmente nem todos os experimentos deste trabalho puderam ser realizados exatamente nas mesmas condições. A ponta da agulha, por exemplo, precisava ser constantemente refeita, uma vez que a dobra realizada após o chanfro, desfazia-se com o tempo, dada a elasticidade do Nitinol. Apesar do procedimento de produção da ponta da agulha ser sempre o mesmo, o resultado era pouco determinístico, uma vez que todo o processo era feito manualmente e as dimensões da agulha eram muito pequenas. Ocasionalmente precisou-se repetir o processo várias vezes até obter-se uma ponta utilizável. Infelizmente, nenhuma outra ponta obtida apresentou uma curvatura tão elevada quanto esta. A gelatina utilizada foi sempre a mesma, mas a sua consistência alterava-se levemente dependendo do seu tempo de vida e da quantidade de furos que já haviam sido realizados na mesma.

O segundo experimento realizado nesta etapa preliminar, foi um teste de trajetória. Antes do início do experimento marcou-se na placa frontal de acrílico uma posição alvo e algumas regiões



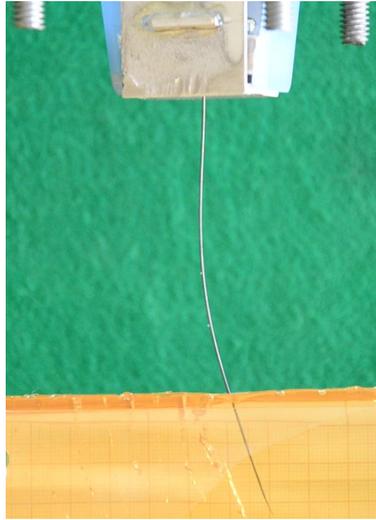
Figura 4.6: Inserção desviando de obstáculos, alternando-se entre micropassos e rotações de 180°

a serem evitadas. Em seguida realizou-se uma inserção manual através do joystick alternando-se entre micropassos e rotações da agulha em 180° . O resultado obtido pode ser visto na Figura 4.6. Como percebe-se o alvo não foi atingido, o que se deu em consequência de um erro de planejamento de rota, pois é difícil saber o momento certo de rotacionar agulha. Isto justifica a necessidade de um sistema robótico que realize a inserção de forma autônoma, sem que o médico tenha que tomar tais decisões. Apesar disso, pode-se ver neste experimento que é possível fazer a agulha desviar de obstáculos.

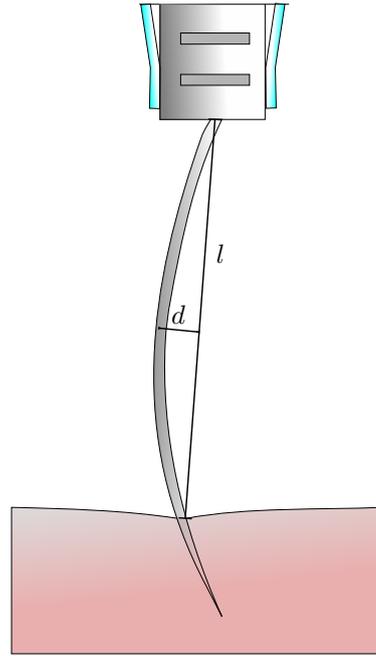
Encerrados os experimentos preliminares procurou-se formas de quantificar a eficiência do mecanismo de inserção por micropasso em comparação aos mecanismos convencionais. As principais vantagens proporcionadas por se controlar a agulha próxima do ponto de inserção são a redução da flambagem da agulha e a redução do problema devido à rigidez torcional. Para se verificar tais vantagens, elaborou-se um experimento para cada um destes fatores. Além disso, decidiu-se avaliar a repetibilidade do mecanismo, o que verificou-se à partir de uma sequência de inserções feitas em malha aberta.

4.4 Experimento de Flambagem

O experimento de flambagem tem como objetivo verificar que quando a agulha é atuada próxima do ponto de inserção o fenômeno de flambagem é drasticamente reduzido. Para isso decidiu-se medir a flambagem da agulha para diferentes comprimentos de passo. Para cada comprimento escolhido, realizou-se 5 inserções, em diferentes pontos da gelatina, medindo-se a máxima flambagem a cada inserção. A medição da flambagem foi feita gravando-se o experimento e analisando-se posteriormente o vídeo quadro a quadro, para se encontrar o instante de máxima flambagem. Para acelerar o experimento e possibilitar que se realizasse 5 medições para cada comprimento de passo, apenas o primeiro passo foi analisado. Isto não garante que a flambagem medida seja a máxima flambagem esperada para um experimento que utilize muitos passos, mas já é suficiente para se



(a) Flambagem obtida para um micropasso de 100mm



(b) Medidas extraídas da imagem para se calcular a máxima flambagem (d) e a flambagem relativa (d/l)

Figura 4.7: Flambagem da agulha durante o primeiro micropasso de uma inserção

comparar a influência do tamanho do passo na flambagem.

A máxima flambagem medida, para cada um dos 25 vídeos obtidos, corresponde ao máximo deslocamento lateral (d) da agulha em relação ao eixo de inserção, durante todo o micropasso. De forma a proporcionar uma melhor comparação entre os experimentos, calculou-se também a flambagem relativa (d/l), normalizando-se a máxima flambagem medida pela distância entre o ponto de inserção e o ponto de atuação da agulha no instante de máxima flambagem (l). A Figura 4.7(a) mostra uma flambagem observada ao utilizar-se um tamanho de micropasso de 100 mm, à partir da qual são medidas as flambagens máxima e relativa, como exemplificado na Figura 4.7(b).

A Tabela 4.1 apresenta os resultados extraídos dos vídeos. Cada resultado está expresso em termos de média e incerteza, sendo essa calculada como 3 vezes o desvio padrão. Como pode-se observar só foi possível observar flambagem para micropassos superiores a 60 mm. Analisando os valores de flambagem relativa, vê-se que não só a flambagem média aumenta com o tamanho do micropasso como também aumenta a sua incerteza associada, tornando o sistema menos determinístico.

4.5 Experimento de Torção

O experimento de torção tem como objetivo confirmar os resultados de Swensen [36,37] de que atuar a agulha próximo do ponto de inserção reduz o problema de rigidez torcional. Para verificar isto decidiu-se realizar inserções contendo muitas rotações de 180° e medir o ângulo da ponta da agulha ao final do experimento. Considerando-se que a rotação aplicada na base da agulha é

| Tamanho do passo (mm) | Máxima Flambagem (mm) | Flambagem relativa (%) |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 20 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| 40 | ≈ 0 | ≈ 0 |
| 60 | $0,8 \pm 0,2$ | $0,18 \pm 0,05$ |
| 80 | $1,3 \pm 0,8$ | $0,21 \pm 0,18$ |
| 100 | $2,4 \pm 0,8$ | $0,40 \pm 0,65$ |

Tabela 4.1: Resultados do experimento de flambagem

sempre de 180° , devido à alta repetibilidade do manipulador, é possível calcular a defasagem entre o valor medido e a posição esperada da ponta da agulha. Repetindo-se este procedimento para diferentes comprimentos de passo é possível quantificar a vantagem de se utilizar passos pequenos.

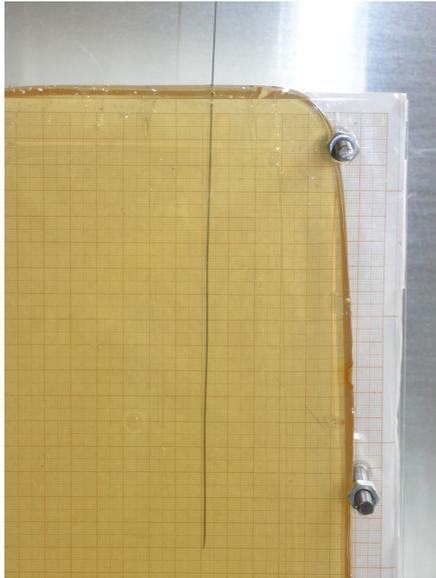
A maior dificuldade deste experimento é a medição do ângulo da ponta. Como a agulha é muito pequena é difícil extrair essa informação de uma imagem, inclusive pelo fato da gelatina não proporcionar uma visualização tão precisa. Alguns trabalhos na área utilizam um sensor de pose magnético acoplado à ponta da agulha que fornece a orientação da mesma durante toda a inserção, porém este projeto não dispunha de um sensor como este.

A estratégia adotada foi realizar uma medida indireta da pose da ponta por meio de uma medição de sua posição no plano das placas de acrílico. Sabe-se que caso a ponta da agulha não esteja perfeitamente alinhada com este plano, o movimento da agulha se dá também na direção de profundidade, fazendo com que a projeção do movimento observada em 2D seja levemente menor do que o esperado. Desta forma espera-se que o posicionamento final da agulha seja menos preciso nos casos em que a defasagem entre a ponta e a base da agulha for maior.

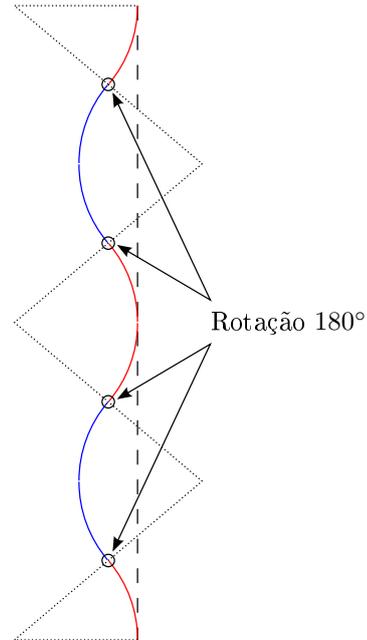
Assim realizaram-se inserções aplicando-se rotações de 180° após cada passo ímpar, para diferentes comprimentos de passo. A trajetória esperada para um procedimento como esse, mostrada na Figura 4.8(b), é um movimento oscilatório da agulha em torno da reta vertical, terminando a inserção perfeitamente alinhada com o ponto inicial. Ao final de cada inserção tirou-se uma foto da trajetória obtida, para comparação com a esperada.

A Figura 4.8(a) mostra o resultado de um experimento de torção. Como se pode observar, a oscilação da agulha é mínima, uma vez que o deslocamento da ponta em dois passos é muito pequeno. Isto impossibilitou extrair as informações de posição desejadas, impedindo estimar-se a orientação da ponta. Caso a frequência das rotações fosse reduzida, o experimento teria uma quantidade total de inversões de sentido muito pequena, dado que neste caso ocorreram apenas 4. Dessa forma seria difícil ter uma medida clara do efeito da rigidez torcional isoladamente, pois o erro de posicionamento da agulha depende também de outros fatores incluindo o próprio erro de repetibilidade em malha aberta do sistema.

Por causa disso, não foi possível obter-se resultados significativos para este experimento. Concluiu-se que para medir a posição angular da ponta da agulha é necessário utilizar um sensor específico para isso, já que o método de medição indireta proposto apresenta uma sensibilidade muito baixa.



(a) Trajetória realizada pela agulha em um experimento de torção



(b) Trajetória esperada da agulha ao aplicar-se rotações após os passos ímpares

Figura 4.8: Trajetórias real e esperada da agulha no experimento de torção

4.6 Experimento de Repetibilidade

Em um sistema de guiagem de agulha a precisão do posicionamento final depende claramente do controlador e do método de inserção utilizado. Entretanto ela depende também da própria capacidade do mecanismo de comandar a agulha efetivamente. Mesmo que o sistema de guiagem faça a inserção em malha fechada, quanto melhor for o desempenho em malha aberta, menor será o erro que o controlador terá que compensar.

A precisão do manipulador Schunk, fornecida pelo fabricante, é de cerca de $5\mu\text{rad}$ em cada junta, no entanto existem diversas outras fontes de erro no sistema fazendo com que a precisão final seja muito maior. Primeiramente, existem erros de alinhamento associados ao dispositivo de inserção produzido, por se tratar de ser um protótipo que foi fabricado manualmente. Em seguida existem os erros associados aos algoritmos de controle, ao fato do robô deslocar a agulha na direção transversal e possíveis erros decorrentes do atrito entre a agulha e o mecanismo de inserção no momento em que o manipulador recua. Por fim, as próprias incertezas associadas ao modelo da agulha e do tecido contribuem para aumentar a incerteza total.

Com o objetivo de quantificar a precisão do sistema como um todo, realizou-se um experimento de repetibilidade em malha aberta. Para isto, estabeleceu-se a seguinte trajetória: 4 micropassos; rotação de 180° ; 12 micropassos; rotação de 180° ; 3 micropassos; sendo o tamanho de cada micropasso igual a 10 mm. Utilizando-se o modo de inserção automática do pacote *schunk_needle*, executou-se esta trajetória repetidas vezes, alterando-se a cada vez apenas o ponto de inserção, para evitar que a inserção ocorra em uma região já perfurada da gelatina. Ao final de cada ensaio tirou-se uma foto frontal da gelatina e recolheu-se a agulha, também por micropasso, de modo

| Inserção | Módulo do vetor deslocamento (mm) | Ângulo do vetor deslocamento (radianos) |
|---------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 195,8 | 1,56 |
| 2 | 193,8 | 1,59 |
| 3 | 193,3 | 1,57 |
| 4 | 192,7 | 1,55 |
| 5 | 193,6 | 1,55 |
| 6 | 181,1 | 1,53 |
| média | 191,7 | 1,56 |
| desvio padrão | 5,3 | 0,02 |

Tabela 4.2: Resultados do experimento de repetibilidade

que ao final do ciclo a agulha se encontrava na posição certa para se realizar uma nova inserção. Em cada foto obtida mediu-se o vetor deslocamento total, entre o ponto de inserção e a ponta da agulha.

Nas primeiras inserções realizadas, observou-se problemas durante os primeiros micropassos. Como o comprimento do micropasso utilizado era muito pequeno, fazendo com que apenas uma pequena porção da agulha estivesse em contato com a gelatina após o primeiro micropasso, a força de atrito entre a agulha e a gelatina não foi suficiente para vencer o atrito interno entre a agulha e o dispositivo. Por este motivo a agulha sofreu pequenos deslocamentos para cima enquanto o manipulador recuava, implicando que o micropasso ocorresse de forma parcial.

Este efeito pôde ser observado até os primeiros 5 passos da inserção, de forma pouco determinística. Em consequência disso obteve-se uma alta variabilidade entre as trajetórias realizadas sobretudo no ângulo do vetor deslocamento. Para compensar tal problema, utilizou-se um alicate para segurar a agulha e impedir que ela recuasse junto com o manipulador nos primeiros passos. Fazendo isto viu-se que bastava segurar a agulha nos dois primeiros micropassos, pois com um comprimento de agulha inserido superior a 20 mm a própria gelatina é capaz de segurar a agulha. Desta forma, realizaram-se 6 novas inserções na porção da gelatina que ainda não havia sido perfurada.

As 6 inserções apresentaram resultados muito semelhantes, mostrados na Tabela 4.2. Pode-se ver que os vetores deslocamento calculados apresentaram um pequeno desvio padrão tanto em relação à magnitude quanto ao ângulo. Para se comparar as trajetórias graficamente, utilizou-se um programa de edição de imagens como o GIMP para sobrepor as 6 imagens obtidas. Neste processo de sobreposição, recortou-se de cada uma das fotos apenas o retângulo definido pela placa de acrílico e definiu-se as opções de modo que a agulha sempre sobrepusesse a gelatina. Como em todas as fotos o ângulo e a distância em relação à câmera foram praticamente os mesmos, não foi necessário realizar uma transforção da perspectiva. A Figura 4.9 mostra o resultado desta sobreposição, o que permite ver que as trajetórias foram realmente muito parecidas.

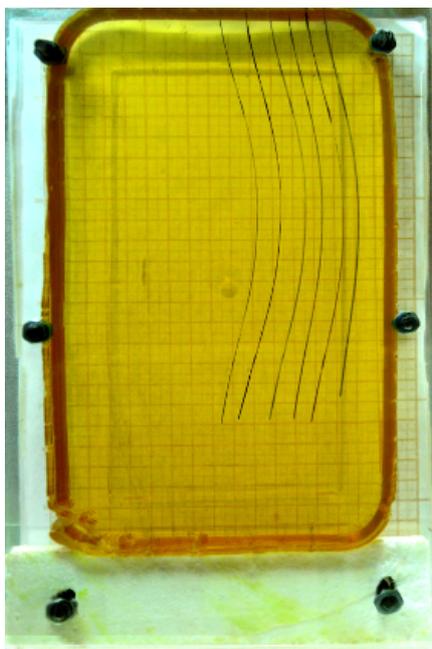


Figura 4.9: Sobreposição das trajetórias obtidas no experimento de repetibilidade

4.7 Análise dos Dados

A partir dos experimentos realizados, pôde-se verificar que o método de inserção por micropasso efetivamente funciona. Os experimentos qualitativos mostraram que o setup experimental construído permite realizar a inserção de forma simples, embora apresente alguns problemas, principalmente em relação à usinagem da ponta da agulha. A gelatina utilizada possibilitou medir a posição da ponta da agulha com facilidade por ser bastante transparente, no entanto não proporcionou curvaturas muito acentuadas. Excetuando-se o experimento da Figura 4.5, os ensaios realizados apresentaram curvaturas inferiores ao esperado. É provável, no entanto, que se possa obter curvaturas melhores alterando-se a composição da gelatina para aumentar a sua rigidez.

Os experimentos quantitativos mostraram que o dispositivo de micropasso é capaz de resolver o problema da flambagem sem causar escorregamento. Infelizmente não se pôde medir o efeito da rigidez torcional, porém pode-se afirmar que o dispositivo proporciona um bom controle sobre o ângulo da agulha com base no experimento de repetibilidade, que mostrou bons resultados em malha aberta. O fato de ter-se obtido bons resultados utilizando um protótipo sugere que se possa obter um sistema com repetibilidade ainda melhor fabricando-se uma peça mais precisa, com o auxílio de uma máquina CNC.

O dispositivo de micropasso conseguiu resolver os problemas do *Dispositivo de Roletes* e do *Dispositivo de Antena Telescópica* ao mesmo tempo, porém gerou um novo problema associado aos momentos em que o manipulador retrocede. O princípio do método de inserção por micropasso assume que a agulha permaneça imóvel enquanto o manipulador recua, o que nem sempre ocorre. Por mais que se tente reduzir o atrito interno, qualquer força de interação entre a agulha e o dispositivo pode ser suficiente para deslocar a agulha quando o comprimento inserido ainda é pequeno.

Uma forma de se contornar este problema é aumentando-se o comprimento do primeiro micropasso. A partir dos experimentos realizados percebeu-se que com um comprimento de agulha inserido superior a 20 mm o atrito com a gelatina já é suficiente para superar o atrito com o dispositivo. Essa solução, porém, não é ideal, uma vez que a necessidade de se aumentar o tamanho do micropasso (mesmo que apenas no início da inserção) aumenta as chances de que ocorra flambagem. A solução utilizada nestes experimentos, de se utilizar um dispositivo externo para segurar a agulha funcionou bem e poderia estar presente no caso clínico, no qual o médico ou um enfermeiro seguraria a agulha durante os primeiros micropassos. Caso se deseje produzir um sistema 100% autônomo, esta implementação pode ser um pouco mais complicada.

Outra solução para o problema seria reduzir o atrito interno, utilizando-se rolamentos. Infelizmente não existem comercialmente rolamentos lineares de diâmetro interno inferior a 1 mm, de modo que seria necessário produzir algo específico para se utilizar no dispositivo de micropasso. O atrito também poderia ser reduzido caso se pudesse evitar que a parte de trás da agulha curve ao redor da garra do manipulador. Quando essa curva não está presente o atrito é tão pequeno que o próprio peso da agulha é suficiente para impedir que ela seja deslocada para cima, de modo que o problema estaria resolvido. Isso pode ser obtido utilizando-se agulhas mais curtas ou com um manipulador que permitisse a passagem da agulha por dentro do seu último elo.

Apesar de ter grande impacto nas inserções de malha aberta, uma vez que a perda de passos iniciais afeta o comprimento de inserção e sobretudo o ângulo da trajetória, este problema não é tão grave quando se faz a inserção em malha fechada. Utilizando-se um rastreador da ponta da agulha seria possível detectar os casos em que os micropassos não estejam sendo realizados por completo e realizar micropassos adicionais até atingir um comprimento de inserção superior a 20 mm à partir do qual a trajetória estipulada poderia ser seguida.

Além dos fatores já citados, o método de micropasso apresenta outra vantagem referente ao espaço de movimentação do manipulador. Como os micropassos são realizados em torno de um ponto de operação o espaço de trabalho necessário para se realizar a inserção é pequeno, independente do comprimento total da inserção. Isso permite escolher-se um ponto de operação adequado no qual o robô esteja longe de pontos de singularidade. No caso dos experimentos aqui realizados este fato permitiu a realização de inserções verticais utilizando-se apenas duas juntas, quando normalmente seriam necessárias pelo menos três.

Capítulo 5

Conclusões

*Now this is not the end. It is not even
the beginning of the end. But it is,
perhaps, the end of the beginning*
Winston Churchill

Neste trabalho, projetou-se e produziu-se um protótipo do *Dispositivo de Inserção por Micropasso*, capaz de realizar guiagem de agulhas flexíveis de forma discretizada. Implementou-se o controle de um manipulador, de modo a proporcionar o controle dos três graus de liberdade do sistema, desenvolvendo-se assim uma plataforma robótica para guiagem de agulhas. Validou-se o sistema desenvolvido por meio de experimentos qualitativos e quantitativos, estudando-se a sua capacidade de superar as desvantagens dos outros dispositivos. Os resultados obtidos mostram que o método de inserção por micropasso funciona e pode apresentar grandes vantagens em relação a outros métodos de guiagem de agulhas flexíveis, uma vez que mesmo experimentos realizados com um protótipo proporcionaram resultados satisfatórios.

5.1 Principais Resultados Obtidos

Os experimentos realizados, mostram que o método de inserção por micropasso pode ser uma boa alternativa para os métodos tradicionais de guiagem de agulha. Apesar de não se ter realizado um número muito grande de experimentos nem ter sido possível fazer uma comparação direta deste método com os dispositivos de roletes e antena telescópica, o resultados mostraram que o dispositivo de micropasso reduz o problema da flambagem e apresenta uma repetibilidade razoável em malha aberta.

Apesar de não terem sido utilizados nos experimentos de guiagem de agulha, os controladores cartesianos puderam ser validados por meio de experimentos de teleoperação no contexto de interação homem-robô, como descreve o anexo V. Utilizou-se neste trabalho o meta sistema operacional ROS, que se mostrou uma ferramenta poderosa para se trabalhar com robótica. Devido a modularidade do software desenvolvido, o que foi possível graças à estrutura modular do ROS, pôde-se alterar a configuração do manipulador utilizado durante o projeto sem a necessidade de se alterar nada no código fonte.

5.2 Principais Problemas Encontrados

Os principais problemas obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho se deram em função de defeitos apresentados pelo manipulador. Em duas situações o robô parou de funcionar, sendo necessário desmontá-lo (o anexo III traz instruções referentes ao processo de montagem e desmontagem), interrompendo o ritmo de trabalho por várias semanas. Na segunda ocorrência do problema o módulo não pôde ser reparado o que nos forçou a alterar a configuração do manipulador. Em consequência da grande quantidade de tempo gasto com os problemas do robô, desenvolveu-se scripts de documentação automática, utilizando-se recursos disponíveis no ROS, para se registrar o áudio e vídeo dos experimentos juntamente com todas as variáveis de controle durante a operação do manipulador. O anexo IV apresenta este desenvolvimento e ensina a utilizar o ROS para se implementar um *data* logger de forma fácil e eficiente.

Outros problemas encontrados dizem respeito à produção do mecanismo de inserção, uma vez que antes deste projeto o autor não tinha nenhuma experiência com fabricação. Por meio deste projeto foi possível aprender na prática como fazer um projeto mais eficiente levando-se em consideração o processo de fabricação a ser utilizado. Aprendeu-se a importância de se adicionar tolerâncias ao projeto quando os métodos de fabricação disponíveis não apresentam uma precisão tão elevada.

5.3 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros propõe-se primeiramente produzir um novo mecanismo de inserção, utilizando-se uma máquina CNC com o objetivo de reduzir os erros de origem mecânica do sistema. Propõe-se também o reprojetado do dispositivo incorporando-se um sistema de rolamentos no orifício central de modo a reduzir ainda mais o atrito interno com a agulha. Tal reprojetado também deve prever o uso de extensômetros nas superfícies de contato com a agulha possibilitando a medição de forças e torques. Caso não seja possível realizar esta medição em 6-DOF, deve-se buscar medir ao menos a torção na agulha e o atrito interno com o dispositivo.

Do ponto de vista de controle pode-se continuar o processo de caracterização do mecanismo de micropasso, buscando-se realizar mais experimentos que permitam compará-lo aos outros mecanismos existentes. Construindo-se um dispositivo de antena telescópica que se possa acoplar à garra do manipulador utilizado, seria possível realizar comparações mais diretas da eficiência do micropasso em relação aos métodos tradicionais. Outra proposta interessante seria implementar-se o método de inserção por ciclo de trabalho utilizando-se micropassos muito pequenos e adaptando-se a lógica de controle deste método ao caso discreto.

Por fim, espera-se que trabalhos futuros aprimorem a plataforma construída adicionando um sistema de rastreamento da ponta da agulha e um planejador de trajetória permitindo-se realizar o controle em malha fechada. Tal sistema de rastreamento inicialmente pode ser composto por câmeras, mas futuramente deve utilizar sistemas de imagens médicas como ultrassom ou um fluoroscópio.

PUBLICAÇÕES

Os trabalhos desenvolvidos neste projeto resultaram em 2 artigos, sendo o primeiro aceito em uma conferência nacional e o segundo estando ainda sob revisão. Os detalhes de cada um dos artigos se encontram abaixo.

Título: Manipulator control based on the dual quaternion framework for intuitive teleoperation using Kinect [9]

Autores: Murilo M. Marinho, André A. Geraldés, Antônio P. L. Bó, Geovany A. Borges

Aceito no: LARS/SBR¹ 2012

Resumo/Abstract: This paper proposes a control system for intuitive operation of robotic manipulators based on the dual quaternion framework. The system is entirely developed using the Robotic Operating System (ROS). It contains both low level interface and end effector controllers for a Schunk Lightweight Arm and simple communication with sensor devices like Kinect. For validation of the system we perform a pick and place teleoperation with the robot's gripper using the position of the operator's hands as obtained from Kinect.

Título: A Novel Method for Needle Steering Based on Microstepping [2]

Autores: André A. Geraldés, Murilo M. Marinho, Mariana C. Bernardes, Antonio P. L. Bó, Geovany A. Borges

Submetido ao: ICRA² 2013

Resumo/Abstract: Needle steering devices present great potential for improving the safety and accuracy of medical interventions with percutaneous access. Despite significant advances in the field, needle steerability remains an issue to be solved by the scientific community. In this paper, we propose a novel method for needle insertion inspired by the manual procedure performed by physicians. Conceptually, the method relies in inserting the needle in discrete microsteps, alternating between two motions: grasp-push and release-retreat. For experimental evaluation, a modified gripper is used along with a 6DOF robotic manipulator to control needle insertion velocity, rotation and grasping. Preliminary results indicate that microstepping minimizes some negative effects observed on alternative methods, while preserving their functional advantages.

¹<http://www.sbr2012.org/>

²<http://www.icra2013.org/>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABOLHASSANI, N.; PATEL, R. V.; MOALLEM, M. Needle insertion into soft tissue: A survey. *Medical Engineering & Physics*, Elsevier, v. 29, n. 4, p. 413–431, 2007.
- [2] GERALDES, A. A. et al. A Novel Method for Needle Steering Based on Microstepping. *Under Review*, p. 1–7.
- [3] Cowan, N. J. et al. Robotic needle steering: design, modeling, planning, and image guidance. In: Rosen, J.; Hannaford, B.; Satava, R. M. (Ed.). *Surgical Robotics - Systems, Applications, and Visions*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 557–582.
- [4] REED, K. et al. Robot-assisted needle steering. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, v. 18, n. 4, p. 35 –46, dec. 2011. ISSN 1070-9932.
- [5] WEBSTER R.J., I.; MEMISEVIC, J.; OKAMURA, A. Design considerations for robotic needle steering. In: *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 3588 – 3594.
- [6] WEDLICK, T.; OKAMURA, A. Characterization of pre-curved needles for steering in tissue. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1200 –1203. ISSN 1557-170X.
- [7] SICILIANO, B. et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. [S.l.]: Springer, 2011. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 9781846286414.
- [8] MARINHO, M. M. *Desenvolvimento de plataformas de trabalho para guiagem de agulha em procedimentos médicos usando quatérnions duais*. Dissertação (Trabalho de Graduação) — Universidade de Brasília, 2011.
- [9] MARINHO, M. M. et al. Manipulator control based on the dual quaternion framework for intuitive teleoperation using Kinect. *Simpósio Brasileiro de Robotica*, p. 1–6.
- [10] Schunk GmbH & Co. KG. *Universal Rotary Actuator*. Lauffen, Germany.
- [11] Schunk GmbH & Co. KG. *Universal Rotary Actuator PRL*. Lauffen, Germany, 2008.
- [12] FERRAZ, E. Estado Atual da Cirurgia Híbrida Colo-Retal. *Rev Bras Videocir*, v. 1, p. 29–37, 2003.

- [13] DU, Q. Study on medical robot system of minimally invasive surgery. In: *Complex Medical Engineering, 2007. CME 2007. IEEE/ICME International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 76 –81.
- [14] PAHLAVAN, P. et al. A small, 4-degree-of-planar freedom robot for artery cross clamping during minimally invasive aorta repair surgery. In: *Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 –4. ISSN 2151-7614.
- [15] SUGITA, N. et al. Bone cutting robot with soft tissue collision avoidance capability by a redundant axis for minimally invasive orthopedic surgery. In: *Complex Medical Engineering, 2007. CME 2007. IEEE/ICME International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 48 –51.
- [16] MIROIR, M. et al. Design of a robotic system for minimally invasive surgery of the middle ear. In: *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 747 –752.
- [17] DIMAIO, S.; SALCUDEAN, S. Needle steering and motion planning in soft tissues. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, v. 52, n. 6, p. 965 –974, june 2005. ISSN 0018-9294.
- [18] GLOZMAN, D.; SHOHAM, M. Flexible needle steering and optimal trajectory planning for percutaneous therapies. In: BARILLOT, C.; HAYNOR, D.; HELLIER, P. (Ed.). *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2004, (Lecture Notes in Computer Science, v. 3217). p. 137–144. ISBN 978-3-540-22977-3.
- [19] WEBSTER III, R. J. et al. Nonholonomic modeling of needle steering. *Int. J. Rob. Res.*, Sage Publications, Inc., Thousand Oaks, CA, USA, v. 25, n. 5-6, p. 509–525, maio 2006. ISSN 0278-3649.
- [20] MISRA, S. et al. Mechanics of flexible needles robotically steered through soft tissue. *The International Journal of Robotics Research*, 2010.
- [21] GLOZMAN, D.; SHOHAM, M. Image-guided robotic flexible needle steering. *Robotics, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 3, p. 459 –467, june 2007. ISSN 1552-3098.
- [22] BERNARDES, M. et al. Semi-automatic needle steering system with robotic manipulator. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1595 –1600. ISSN 1050-4729.
- [23] ENGH, J. et al. Toward effective needle steering in brain tissue. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 559 –562. ISSN 1557-170X.
- [24] REED, K. Compensating for torsion windup in steerable needles. In: *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 936 –941.
- [25] REED, K. et al. Integrated planning and image-guided control for planar needle steering. In: *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 819 –824.

- [26] ROMANO, J.; WEBSTER, R.; OKAMURA, A. Teleoperation of steerable needles. In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 934–939. ISSN 1050-4729.
- [27] WOOD, N. A. et al. Closed-Loop Control of Needle Steering for Percutaneous Kidney Access. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 48–50.
- [28] MAJEWICZ, A. et al. Evaluation of robotic needle steering in ex vivo tissue. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2068–2073. ISSN 1050-4729.
- [29] BERNARDES, M. et al. Adaptive path planning for steerable needles using duty-cycling. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2545–2550. ISSN 2153-0858.
- [30] ADORNO, B. V. *Two-arm manipulation: from manipulators to enhanced human-robot collaboration*. Tese (Doutorado) — Université de Montpellier 2, 2011.
- [31] REED, K.; OKAMURA, A.; COWAN, N. Modeling and control of needles with torsional friction. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, v. 56, n. 12, p. 2905–2916, dec. 2009. ISSN 0018-9294.
- [32]
- [33] ENGH, J. et al. Flexible needle steering system for percutaneous access to deep zones of the brain. In: *Bioengineering Conference, 2006. Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 103–104.
- [34] MINHAS, D. et al. Modeling of needle steering via duty-cycled spinning. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 2756–2759. ISSN 1557-170X.
- [35] MALLAPRAGADA, V.; SARKAR, N.; PODDER, T. Robot assisted real-time tumor manipulation for breast biopsy. In: *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2515–2520. ISSN 1050-4729.
- [36] SWENSEN, J.; COWAN, N. Torsional dynamics compensation enhances robotic control of tip-steerable needles. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1601–1606. ISSN 1050-4729.
- [37] SWENSEN, J. P. *Torsional dynamics and rotational estimation of tip-steerable needles*. Tese (Doutorado) — The Johns Hopkins University, 2011.
- [38] MISRA, S. et al. Needle-tissue interaction forces for bevel-tip steerable needles. In: *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 224–231.

ANEXOS

I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO DVD

Este anexo descreve o conteúdo do DVD a ser entregue junto com o trabalho, e explica a estrutura de organização dos arquivos.

[Infelizmente não foi possível completar este anexo até o presente momento. Ele será incluso na versão final deste relatório.]

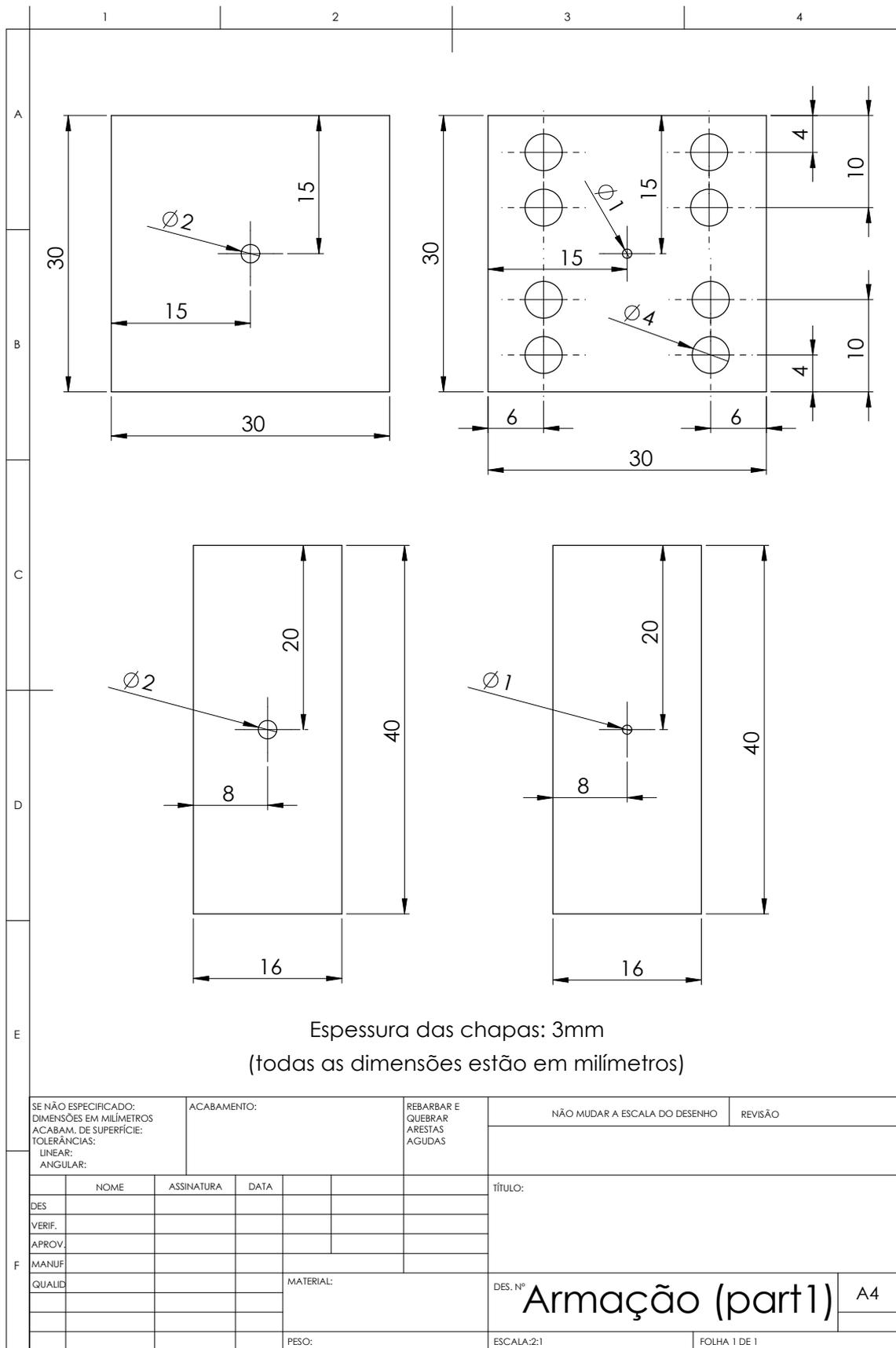


Figura II.2: Esquemático da armação metálica - peças anterior, posterior e interiores

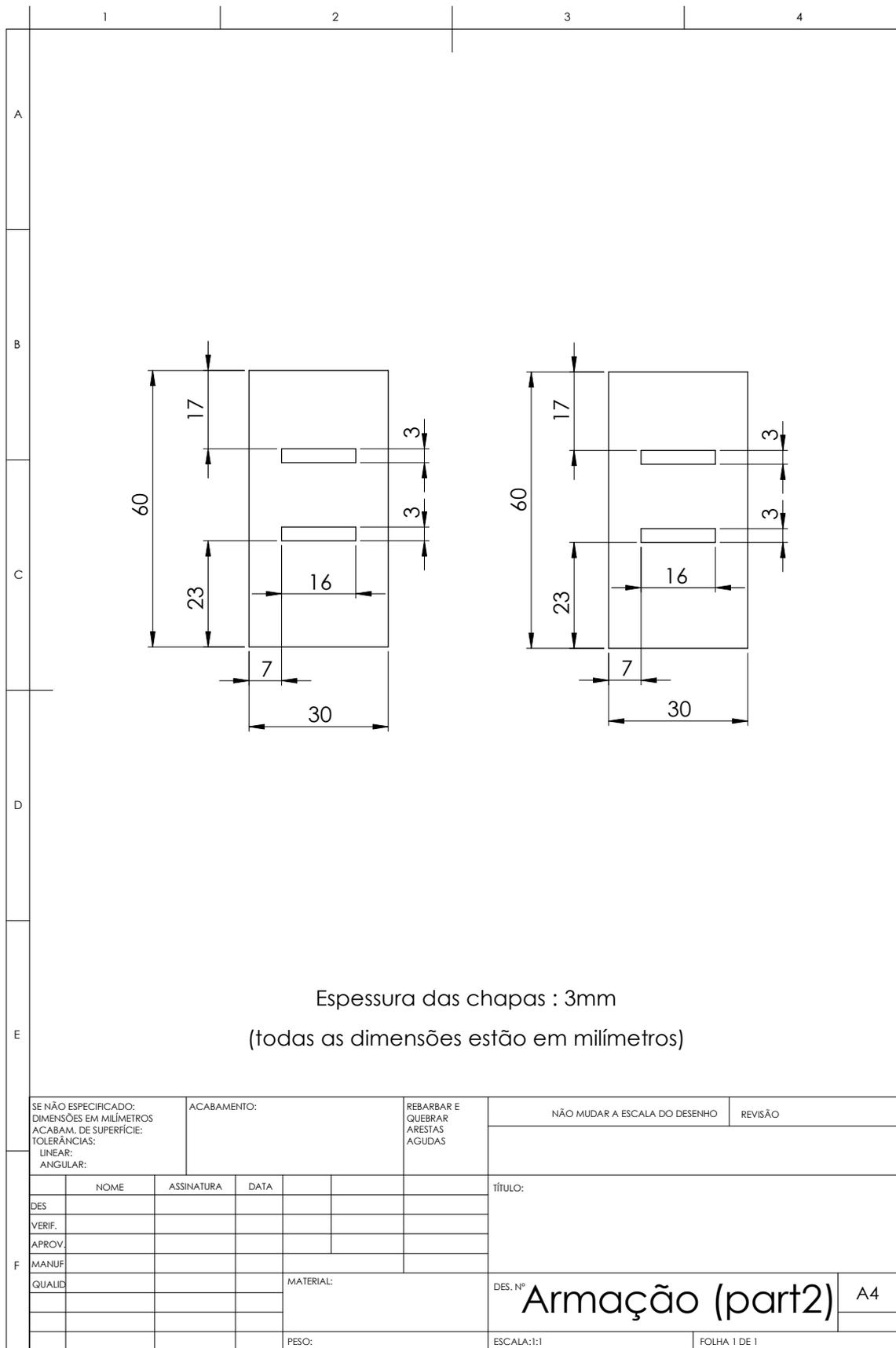


Figura II.3: Esquemático da armação metálica - peças superior e inferior

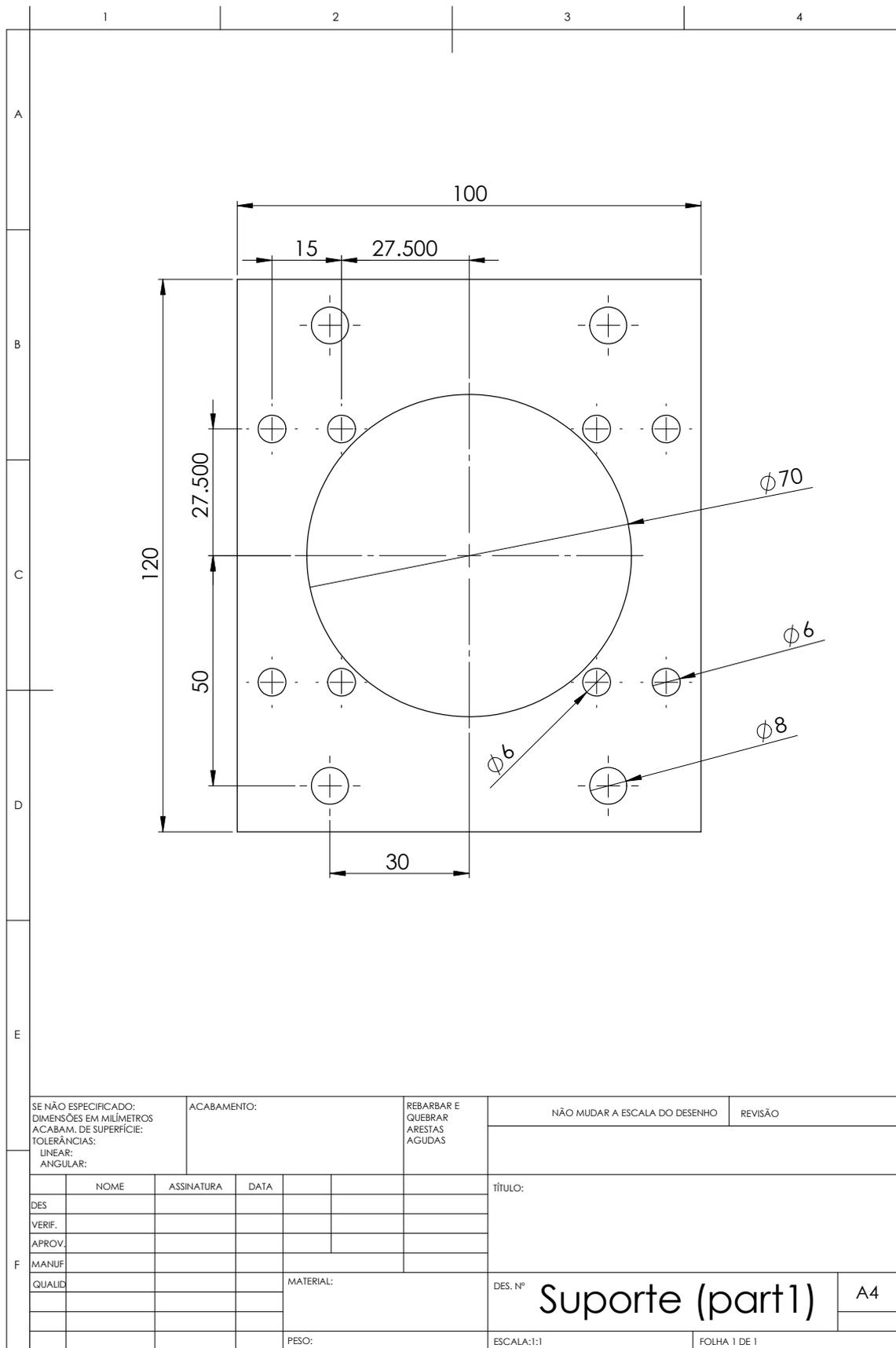


Figura II.4: Esquemático do suporte de fixação da armação - peça posterior (fixada à garra)

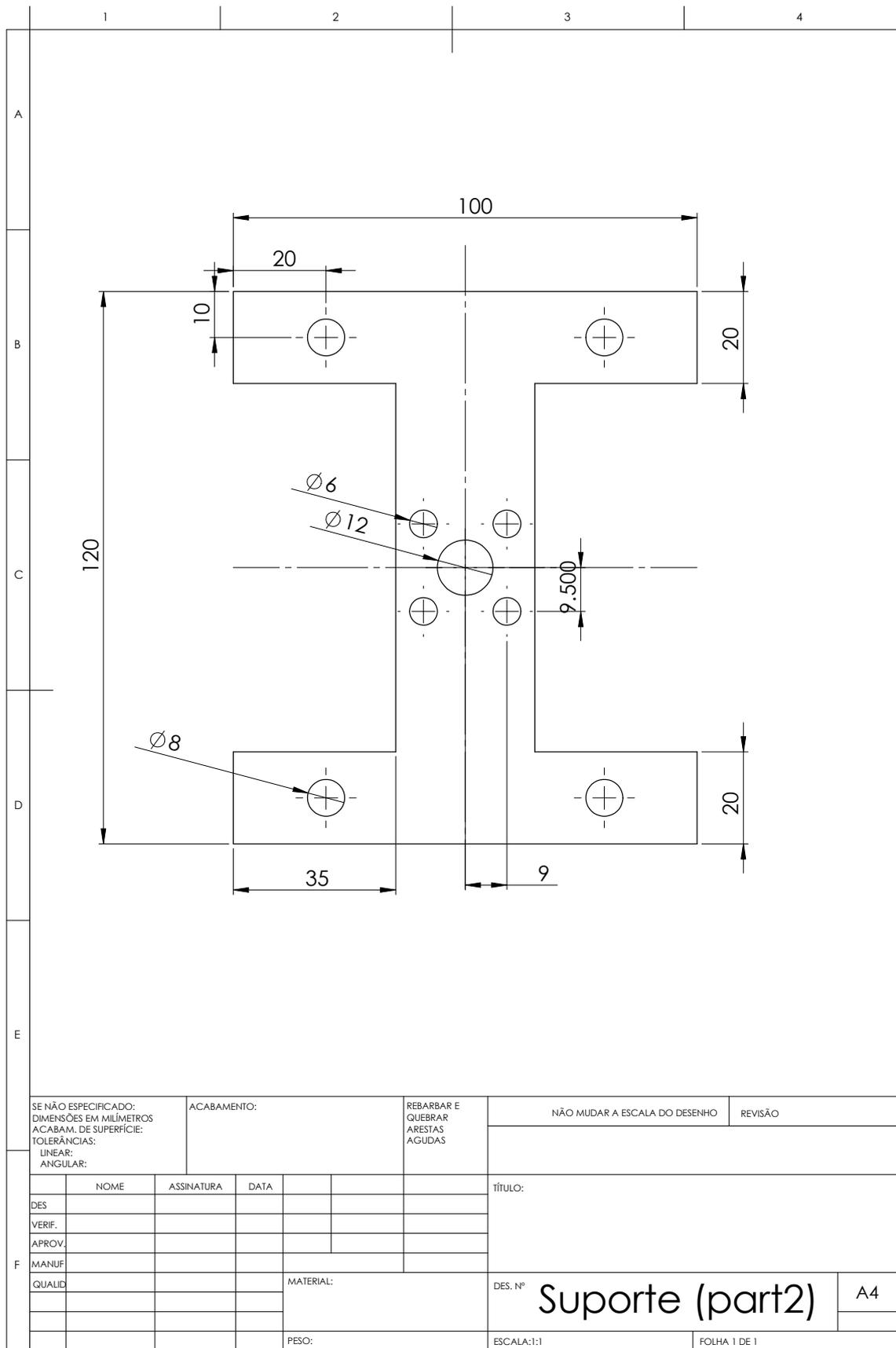


Figura II.5: Esquemático do suporte de fixação da armação - peça anterior (fixada à armação)

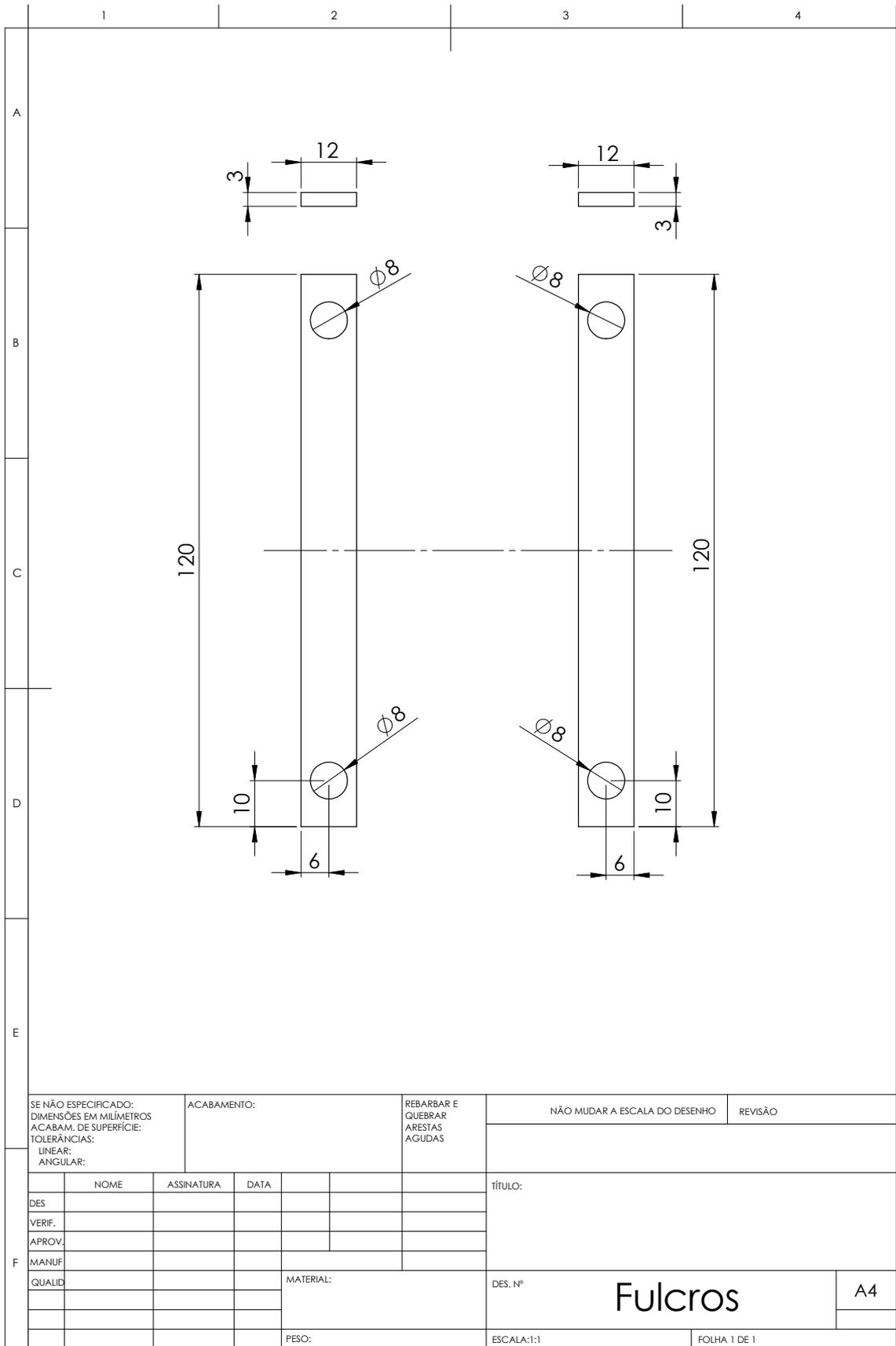


Figura II.7: Esquemático dos fulcros

III. MONTAGEM E DESMONTAGEM DO MANIPULADOR SCHUNK

Este anexo tem como objetivo apresentar as conexões mecânicas e elétricas entre os módulos do manipulador Schunk LWA3 e descrever o processo de montagem e desmontagem do robô. Para auxiliar a descrição, apresentam-se trechos do manual de operação da família PRL [11], assim como imagens do manipulador em processo de desmontagem.

Ao longo deste trabalho foi necessário desmontar o manipulador em três situações, sendo em duas delas para realizar manutenção na placa de controle de um dos módulos e em outra para alterar a configuração do manipulador. Espera-se que de posse deste material, este processo possa ser realizado mais facilmente, caso seja necessário.

III.1 Conexões Mecânicas e Elétricas dos Módulos PRL

Cada junta do manipulador consiste em um módulo rotacional da família PRL, como visto na Figura III.1(a), cujos modelos diferem apenas em tamanho e potência. Os módulos mais próximos da base são mais potentes, pois precisam suportar o peso dos demais. Internamente, cada módulo possui uma placa de controle, um motor servo, freio integrado e uma redução por engrenagens, como mostra a Figura III.1(b).



(a) Vista lateral



(b) Esquemático interno mostrando a placa de controle

Figura III.1: Esquemático mecânico de um módulo PRL. Fonte: [10]

Para se acoplar os módulos em série, utilizam-se elementos de conexão feitos sob medida para cada par de módulos a ser conectado. Tais elementos, como mostra a Figura III.2, são peças de plástico cujos diâmetros dos encaixes correspondem aos diâmetros dos módulos. Isso significa que para se alterar a configuração do manipulador é preciso ter o conjunto de elementos de conexão adequado, que permita a montagem dos módulos em uma dada sequência.

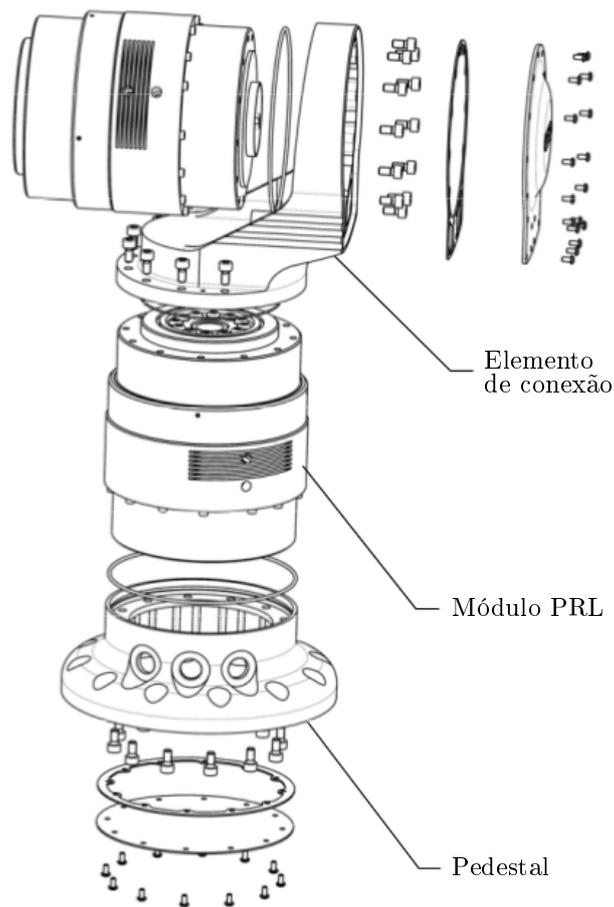


Figura III.2: Encaixes mecânicos de um módulo PRL. Fonte: [11]

As conexões elétricas, tanto lógicas quanto de alimentação, também são feitas de forma serial. Os cabos que saem da placa de interface são conectados à placa de controle do primeiro módulo (base do manipulador). Em seguida, os mesmos sinais são transmitidos à placa de controle do segundo módulo por meio de cabos que passam por dentro da junta e dos elementos de conexão. Isso faz com que as juntas não possam girar livremente, uma vez que estes cabos torcem a cada rotação.

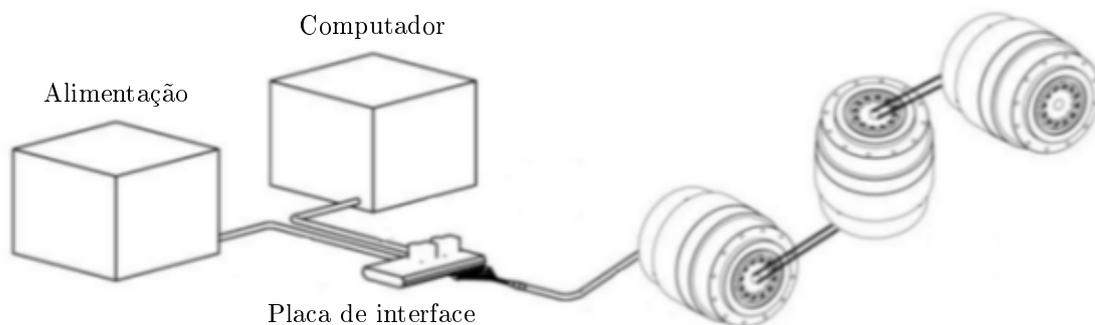


Figura III.3: Esquemático elétrico de montagem dos módulos PRL em série. Fonte: [11]

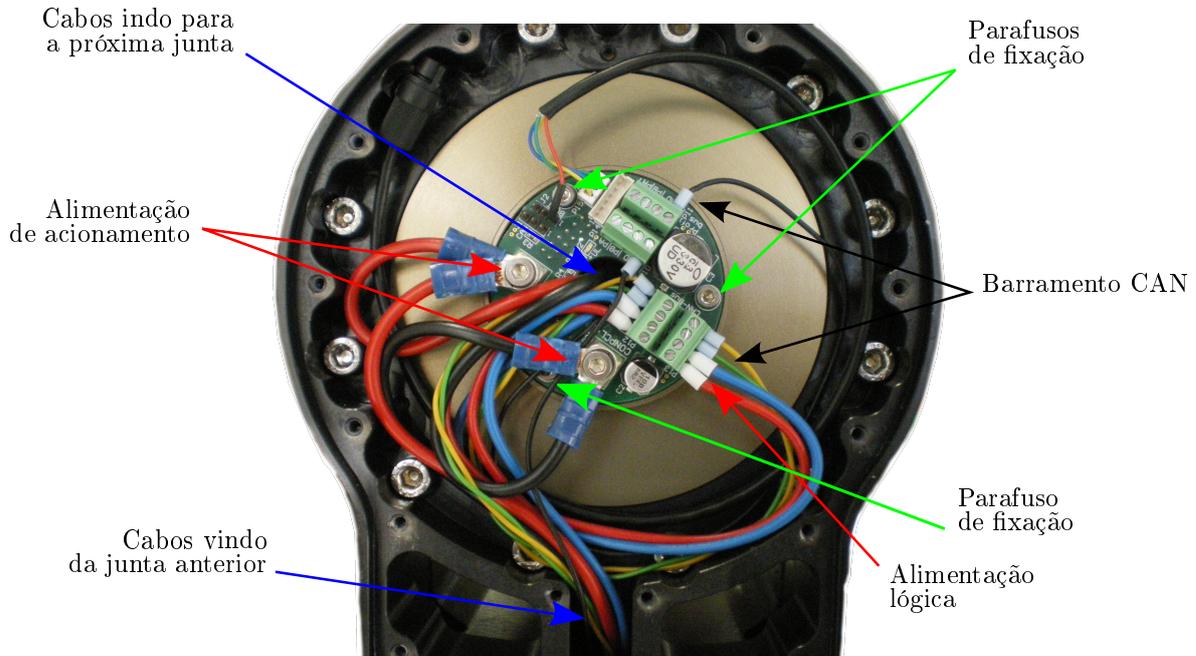


Figura III.4: Conexões elétricas de um módulo PRL

O barramento elétrico é composto por 7 sinais, que são passados de um módulo a outro. Os cabos que passam por dentro dos módulos são:

- 2 cabos para a alimentação de acionamento (V^+ e V^-)
- 2 cabos para a alimentação lógica (V^+ e V^-)
- 3 cabos para o barramento CAN (CAN_HI, CAN_LOW, e SHIELD)

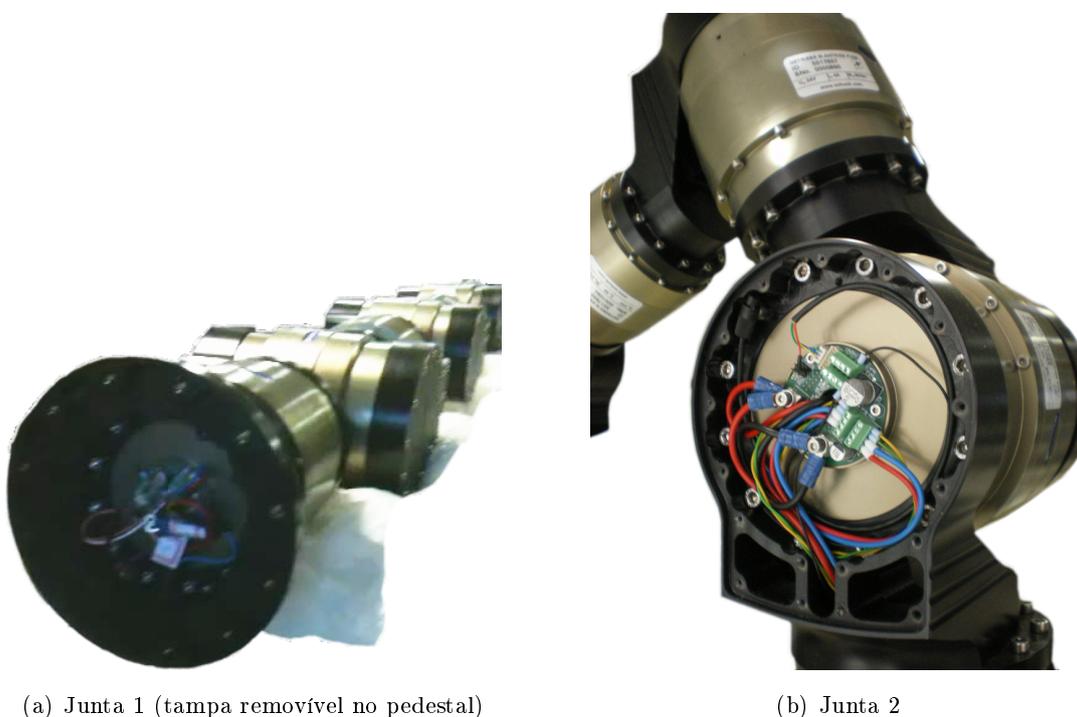
A Figura III.4 mostra a placa de controle de um módulo PRL, onde pode-se ver os cabos que vêm da junta anterior e os que passam para a próxima junta.

III.2 Acesso à Placa de Controle

Caso seja necessário acessar a placa de controle de um dos módulos, para fins de depuração ou manutenção, pode não ser necessário desfazer todas as conexões mecânicas. Todos os elementos de conexão possuem tampas removíveis, como mostra a Figura III.5, que permitem acessar um dos módulos da conexão. Dependendo da configuração do robô a face acessível pode ser a que contém a placa de controle. No caso do manipulador Schunk em configuração original (7-DOF) todas as juntas pares têm as placas de controle acessíveis desta forma. Para acessar as placas das juntas ímpares é necessário desconectar o módulo todo do elemento de conexão. A junta 1 (base) também possui a placa acessível (visto na Figura III.6(a)), removendo-se a tampa que fica no pedestal. Em configuração modificada (6-DOF), apenas as juntas 2 (visto na Figura III.6(b)) e 5 tem a placa de controle acessível por meio desta tampa.



Figura III.5: Tampa removível no elemento de conexão, que permite acesso direto ao módulo PRL



(a) Junta 1 (tampa removível no pedestal)

(b) Junta 2

Figura III.6: Placas de controle acessíveis por meio das tampas removíveis dos elementos de conexão

Acessando a placa de controle, pode-se removê-la do módulo PRL. Para isso deve-se primeiramente desconectar todos os 14 cabos da placa (7 cabos de entrada e 7 de saída) e em seguida remover os 3 parafusos indicados na Figura III.4. Feito isso pode-se remover a placa, tomando o cuidado de passar os cabos de saída pelo seu orifício central. No caso deste trabalho, foi necessário remover as placas das juntas 1 e 4 para a troca de um fusível, que havia queimado.

III.3 Desmontagem dos Módulos para Alterar a Configuração do Robô

Como o manipulador Schunk é formado pela conexão em série de 7 módulos totalmente independentes, é possível, à princípio, alterar a sua configuração removendo-se, adicionando-se ou alterando-se qualquer um dos seus módulos. A escolha da configuração deve apenas respeitar os limites de torques das juntas (cada módulo deve ter potência suficiente para suportar todos os módulos posteriores).

No entanto, qualquer que seja a configuração a ser montada, é preciso ter o conjunto de elementos de conexão adequado. No caso deste trabalho, a junta que apresentou defeito foi a junta 4, que consistia em um módulo PRL 100. Como a junta 3 também é do tipo PRL 100, foi possível conectar a junta 5 (PRL 80) à junta 3, uma vez que possui-se um elemento de conexão do tipo PRL100-PRL80. Esta adaptação resultou em uma configuração atípica para um manipulador de 6 DOF, que poderia ser melhorada caso a geometria do elemento de conexão utilizado fosse diferente. Este processo de montagem e desmontagem foi realizado simplesmente removendo-se os parafusos que prendem o módulo ao elemento de conexão e desconectando-se os fios da placa de controle do módulo.

Outro fator importante a ser considerado na montagem do manipulador é o comprimento dos cabos do barramento elétrico. Todos os cabos que vieram com o manipulador foram dimensionados para a configuração original. Ao alterar a configuração, encontrou-se o problema dos cabos serem muito curtos para se realizar a nova montagem (lembrando que os cabos precisam de folgas para serem torcidos quando a junta rotaciona). A solução encontrada neste caso foi estender alguns cabos, como mostra a Figura III.7.

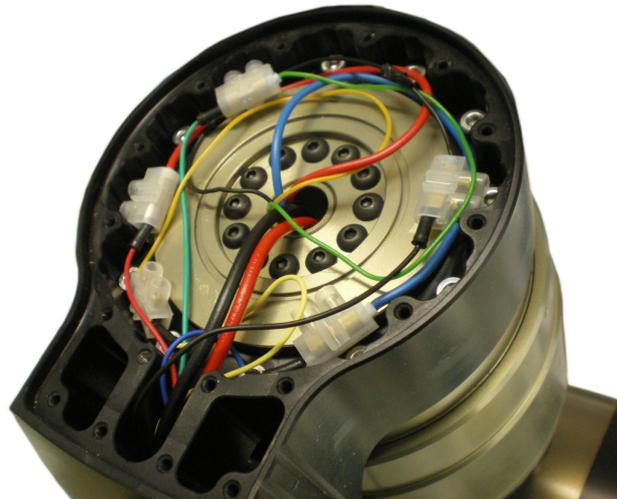


Figura III.7: Extensores dos cabos do barramento elétrico, necessários na configuração modificada do manipulador

IV. DOCUMENTAÇÃO AUTOMÁTICA USANDO ROS

Este anexo tem como objetivo apresentar uma ferramenta do ROS chamada *rosvbag* e descrever os *scripts* desenvolvidos com base nela, com o intuito de auxiliar na depuração de código e de produzir documentação automática. *Rosbag* é um comando nativo do ROS que possui dois modos principais, *record* e *play*, permitindo gravar ou reproduzir mensagens publicadas em tópicos, de forma altamente eficiente. Ele é executado como um nó independente, que, portanto, pode ler ou escrever mensagens em qualquer tópico do ROS.

Em modo *record*, ele permite gravar as mensagens trocadas entre processos durante a execução de um programa e analisar estas mensagens de forma prática após o experimento. Em modo *play*, ele permite reproduzir uma sequência gravada de mensagens, repetindo assim um experimento. Isto certamente é muito útil para depurar problemas de execução uma vez que é possível visualizar todas as mensagens trocadas entre os nós. Além disso, é possível produzir relatórios técnicos com uma certa facilidade, uma vez que as mensagens armazenadas pelo *rosvbag* podem ser plotadas em gráficos, desde que elas contenham *timestamps*.

Neste trabalho desenvolveram-se *scripts* para executar o *rosvbag* automaticamente ao início de cada experimento, de modo a ter todas as informações relevantes registradas caso algo inesperado ocorresse. Graças a isso foi possível identificar qual junta do manipulador apresentava defeito, quando este parou de funcionar de forma adequada. Utilizando-se de tais dados, produziu-se um relatório técnico detalhado, enviado ao suporte da Schunk, o que também ajudou a diagnosticar o problema com o manipulador.

A seção IV.1 descreve o comando *rosvbag* em modo *record*, explicando o seu princípio de funcionamento e como visualizar os dados armazenados. A seção IV.2 descreve o comando *rosvbag* em modo *play*, mostrando como essa ferramenta possibilita trabalhar com *datasets* e realizar experimentos *offline*. A seção IV.3 descreve os *scripts* criados para documentação automática.

IV.1 Comando *rosvbag record*

Em modo *record*, o nó do *rosvbag* monitora todos os tópicos (ou apenas os tópicos selecionados pelo usuário) e registra todas as mensagens publicadas neles, gerando um arquivo *bag*. Caso as mensagens possuam um cabeçalho que contenha uma *timestamp*, o que é uma prática bastante comum em pacotes do ROS, este *bag* pode ser interpretado com um log de dados completo do experimento.

A Figura IV.1 mostra um exemplo do comando *rosvbag* utilizado em modo *record*. Em IV.1(a) vê-se 4 nós em execução simultânea para realizar o controle cartesiano da pose do efetuador do robô pelo joystick. O primeiro nó, do pacote *joy*, reconhece os comandos realizados pelo joystick e os envia ao nó do pacote *schunk_joy*, que converte estes comandos em referências de pose para

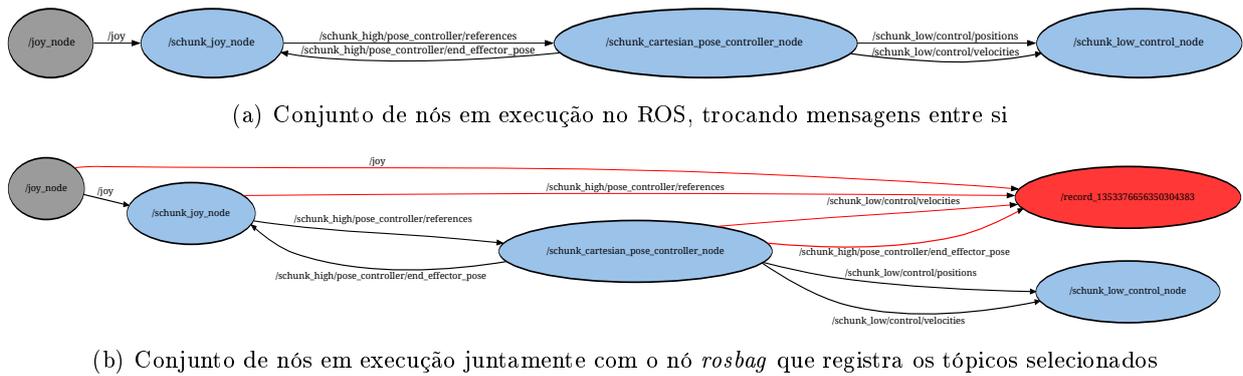


Figura IV.1: Utilização do comando *rosvag* em modo *record* (Figura gerada à partir do comando *rxgraph*)

o efetuador do robô. Estas referências são passadas ao nó do pacote *schunk_high*, que converte as referências cartesianas em referências de juntas, enviadas ao nó do pacote *schunk_low*, que controla o robô enviando comandos a cada uma das juntas. Em IV.1(b) vê-se um nó adicional, correspondente ao *rosvag*, que recebe mensagens de todos os tópicos selecionados (neste caso todos exceto o */schunk_low/control/positions*). Uma vez que este nó não publica nenhuma mensagem, ele não afeta no comportamento dos demais.

Tendo todas estas mensagens armazenadas é possível verificar qual dos nós precisa ser alterado, caso o manipulador não realize o movimento esperado. Além disso, outros tópicos poderiam ser adicionados ao *rosvag*, como tópicos com informações do estado elétrico do manipulador (tensões e correntes em cada uma das juntas). Do ponto de vista do programador, basta uma variável ser publicada periodicamente para que ela seja acessível ao *rosvag*.

Para visualizar o conteúdo de um arquivo *bag*, ROS fornece outro comando nativo chamado *rxbag*. Este comando cria uma interface gráfica, vista na Figura IV.2¹, que contém uma linha do tempo indicando o momento em que cada mensagem foi recebida. O conteúdo das mensagens pode ser visualizado na forma de dados numéricos ou em um gráfico, no qual o usuário pode plotar diferentes variáveis simultaneamente. No caso de mensagens de imagens de câmera é possível reproduzir o vídeo do experimento, ou mesmo visualizar *thumbnails* das imagens na própria linha do tempo, o que ajuda a identificar uma parte específica dos dados, no caso de experimentos muito longos.

IV.2 Comando *rosvag play*

Em modo *play*, o nó do *rosvag* publica todas as mensagens armazenadas no arquivo *bag*, nos mesmos tópicos e no momento exato em que elas foram originalmente publicadas. Isso permite que os arquivos *bag* previamente gerados sejam usados no lugar do hardware real, possibilitando realizar experimentos *offline* com facilidade. No ROS, quando um nó lê mensagens em um tópico o autor da mensagem não é conhecido, pois isto geralmente não é relevante. Isto permite que diferentes fontes publiquem em um mesmo tópico. A Figura IV.3 ilustra este princípio.

¹Figura IV.2 extraída de <http://www.ros.org/wiki/rxbag>

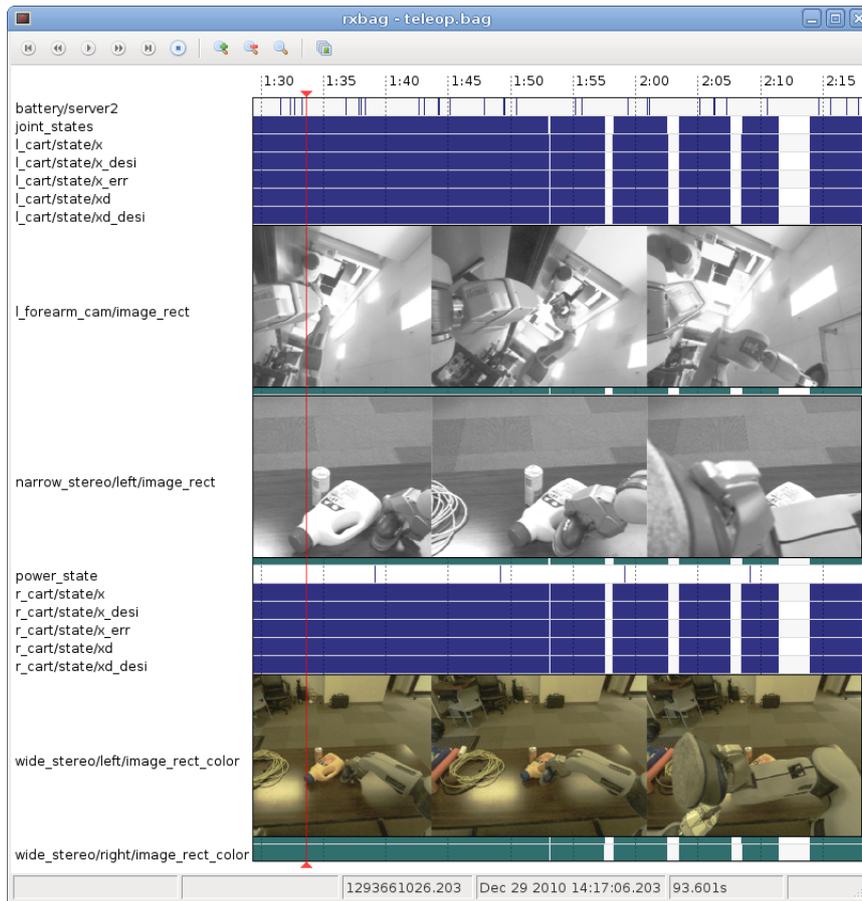


Figura IV.2: Interface gráfica do comando *rxbag* para visualização dos dados armazenados em um arquivo *bag*

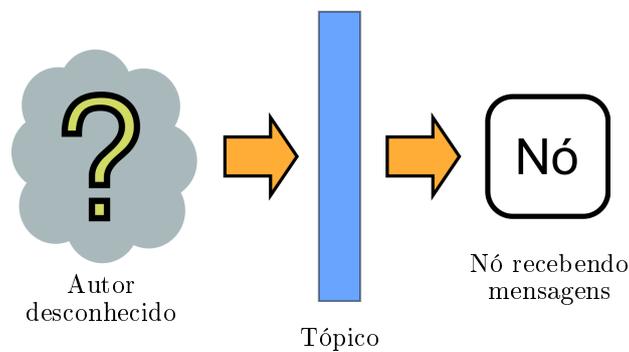


Figura IV.3: Recebimento de uma mensagem da perspectiva do nó receptor

Por este motivo é possível utilizar o *roslaunch* para separar duas etapas de um processo que normalmente ocorrem simultaneamente. A Figura IV.4 mostra um sistema de guiagem de agulha que contém o bloco rastreador, permitindo realizar o controle em malha fechada. Neste exemplo o bloco controlador agrupa desde o planejador até o sistema de câmeras, vistos na Figura 3.1. Dessa forma o controlador publica as imagens obtidas pela câmera em um tópico e espera receber a posição XY da agulha em outro, como realimentação. Já da perspectiva do rastreador, ele deve apenas receber as imagens da câmera de um tópico e publicar a posição da agulha em outro.

Nesse caso, é possível separar as duas etapas utilizando o *rosvbag*, hora em modo *record*, hora em modo *play*. A Figura IV.5 mostra como isso é possível. Em IV.5(a) o bloco controlador publica as imagens da câmera, que são registradas pelo *rosvbag*. Como o rastreador não está presente, não há realimentação e a inserção se dá em malha aberta. Em seguida, os arquivos *bag* são reproduzidos, como visto em IV.5(b) fornecendo as referências para o rastreador que identifica a posição da agulha como se estivesse recebendo as imagens direto da câmera. Isso permite testar o rastreador com vários arquivos *bag*, sem a necessidade de trabalhar diretamente com as câmeras. Uma vez que o rastreador esteja funcionando, pode-se alternar para o caso *online* simplesmente removendo-se o *rosvbag*, uma vez que tanto da perspectiva do controlador como do rastreador, não há diferença entre os dois casos.

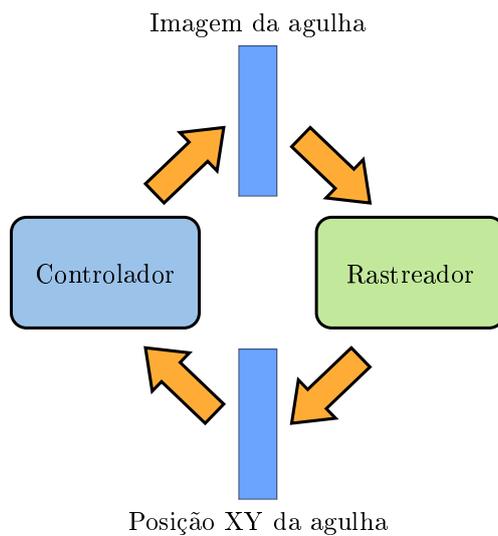


Figura IV.4: Experimento de guiagem de agulha com rastreamento online

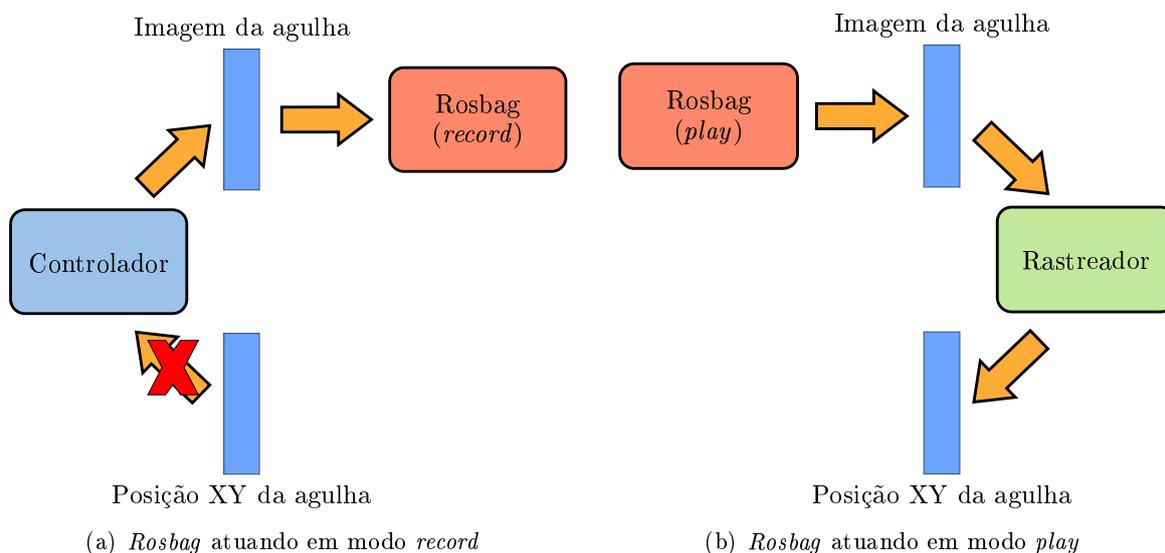


Figura IV.5: Experimento de guiagem de agulha com rastreamento offline

IV.3 Pacote *schunk_bags*

No caso deste trabalho, o comando *rosvbag* foi utilizado essencialmente em modo *record*, uma vez que não trabalhou-se com conjuntos de dados externos. A sua maior utilidade foi ajudar a diagnosticar problemas de funcionamento no manipulador. Ao longo do desenvolvimento o robô apresentou problemas intermitentes de origem inicialmente desconhecida, como ruídos sonoros e instabilidade em uma das juntas. Para identificar a causa de tais anomalias foi necessário uma metodologia de depuração bastante sistemática.

Sendo os problemas intermitentes, optou-se por registrar todos os experimentos, no entanto não bastava gravar apenas as variáveis internas do programa. Como algumas juntas oscilavam ou emitiam ruídos sonoros fez-se necessário registrar o experimento em imagem e som. Para isso utilizou os pacotes disponíveis no ROS *usb_cam*² e *audio_capture*³ que fornecem drivers para comunicação com uma webcam USB e um microfone respectivamente. Desta forma, antes de iniciar cada experimento era necessário iniciar os nós da câmera, do microfone e o *rosvbag* (selecioneando quais tópicos devem ser registrados, de modo a poupar memória) em modo *record*.

Com o objetivo de automatizar esse processo criaram-se *scripts* no ROS. Estes *scripts* foram agrupados em um pacote chamado *schunk_bags* que também serviu como diretório padrão para armazenar arquivos *bag* e arquivos externos de áudio e vídeo dos experimentos. Por estarem dentro de um pacote, o ROS reconhece os *scripts* como arquivos executáveis, possibilitando usar o comando *rosvrun* à partir de qualquer diretório. Isso facilitou muito o processo, uma vez que organizar os arquivos *bag* manualmente é uma tarefa bastante tediosa. Os principais *scripts* presentes no pacote *schunk_bags* são: *record.sh*, *playback.sh* e *generate_video.sh*.

O *record.sh* recebe como parâmetros um rótulo a ser incluído no nome do arquivo *bag* (este rótulo é concatenado com a data de execução do *script*), o nome do pacote e o nome do arquivo *launch* a ser executado, sendo que os dois últimos parâmetros podem ser omitidos se ambos forem iguais ao rótulo. Quando executado ele inicializa, além dos nós da câmera, do microfone e o arquivo *launch* especificado, o *rosvbag record* selecionando para gravação o áudio, as imagens da câmera em formato comprimido e todos os tópicos de pacotes da stack *schunk*. Caso ocorresse algum comportamento atípico durante o experimento o arquivo *bag* gerado permitia rever o experimento e nos instantes de erro observar todas as referências enviadas a cada um dos nós e o estado interno de cada uma das juntas.

O *playback.sh* executa o comando *play* em um arquivo *bag* com o objetivo de replicar uma situação de erro e verificar o comportamento do robô. Ele também foi utilizado para replicar as mensagens registradas em um simulador do robô, de modo a verificar se o erro foi originário do hardware ou do controle. Por fim, o *script* *generate_video.sh*, simplesmente extrai as mensagens que contém as imagens e o áudio do arquivo *bag* e gera um arquivo *.avi* para que o vídeo do experimento possa ser transmitido a terceiros sem a necessidade de usar o *rvbag* para a visualização.

²http://www.ros.org/wiki/usb_cam

³http://www.ros.org/wiki/audio_capture

V. TELEOPERAÇÃO DO MANIPULADOR UTILIZANDO O KINECT

Este anexo tem como objetivo descrever um trabalho de interação homem-robô realizado em paralelo a este projeto. Em tal trabalho faz-se a teleoperação do manipulador, utilizando o sensor Kinect para gerar as referências de pose para o efetuador do robô. Utiliza-se aqui o manipulador em configuração original (7-DOF), uma vez que este trabalho se deu antes da junta do robô apresentar defeito.

A ideia principal do trabalho foi utilizar o Kinect para rastrear a posição da mão do operador e fazer o efetuador do robô imitar qualquer movimento realizado, funcionando como se fosse uma extensão do corpo do operador. As aplicações deste tipo de teleoperação são muitas, por exemplo, utilizar o robô para manipular um objeto que pode ser muito pesado ou perigoso para a pessoa, ou mesmo que pode estar muito distante no caso em que o controle do manipulador ocorre via rede.

Apesar de não ter relação direta com o problema de guiagem de agulha, este trabalho serviu para validar os pacotes *schunk_high* e *schunk_low* antes de concluir a fabricação do dispositivo de micropasso. Além disso, este trabalho serviu para explorar as possibilidades do ROS de se utilizar diferentes nós para fornecer as referências ao manipulador e produziu um artigo [9] aceito no LARS/SBR 2012. Todo o trabalho aqui descrito foi realizado em parceria com estudante de mestrado Murilo Marinho.

V.1 Interface com o Sensor Kinect

Uma das grandes vantagens do ROS é a disponibilidade de drivers para sensores e dispositivos comuns e a facilidade de integrá-los em outros programas. Na seção 3.5.4, utilizou-se um joystick USB convencional para gerar as referências de posição ao manipulador, possibilitando realizar a inserção de agulha de forma manual. Analogamente, utiliza-se aqui um sensor Kinect, visto na Figura V.1, para rastrear a posição das mãos do operador e fornecer referências de pose para controlar o efetuador do robô.



Figura V.1: Sensor Kinect utilizado para rastrear a posição da mão do operador

Para isto utilizou-se o pacote *openni_tracker*¹ da stack *openni_kinect*², que identifica a pessoa usando a câmera do Kinect e rastreia posições características formando um esqueleto geométrico

¹http://www.ros.org/wiki/openni_tracker

²http://www.ros.org/wiki/openni_kinect

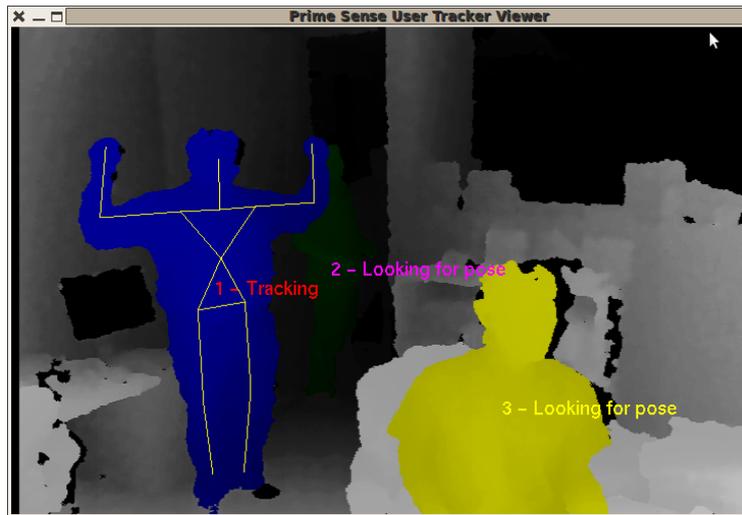


Figura V.2: Pontos característicos do corpo da pessoa detectados pelo nó *do pacote* `openni_tracker`

do corpo da pessoa, como mostra a Figura V.2³. Entre os pontos característicos rastreados estão a cabeça, a mão, o ombro e o cotovelo. Todas as posições rastreadas são publicadas em um mesmo tópico. Da mesma forma que foi feito para o joystick, criou-se um pacote `schunk_kinect` para ler estas mensagens e convertê-las em referências de pose para o efetuador do manipulador.

A Figura V.3 mostra como o pacote `schunk_kinect` é utilizado em conjunto com os demais pacotes da stack `schunk`. Ele fornece referências tanto para o controlador de pose quanto para o de posição, no entanto os dois nunca estão ativos ao mesmo tempo, uma vez que o nó do pacote `schunk_low` não recebe mensagens de múltiplos nós. Apenas os controladores cartesianos foram utilizados, pois o objetivo deste trabalho era o de fazer o efetuador do robô imitar os movimentos realizados com a mão do operador, no entanto seria possível utilizar também os controladores de junta, de modo a forçar o manipulador a imitar a configuração exata do braço do operador, caso isso seja possível.

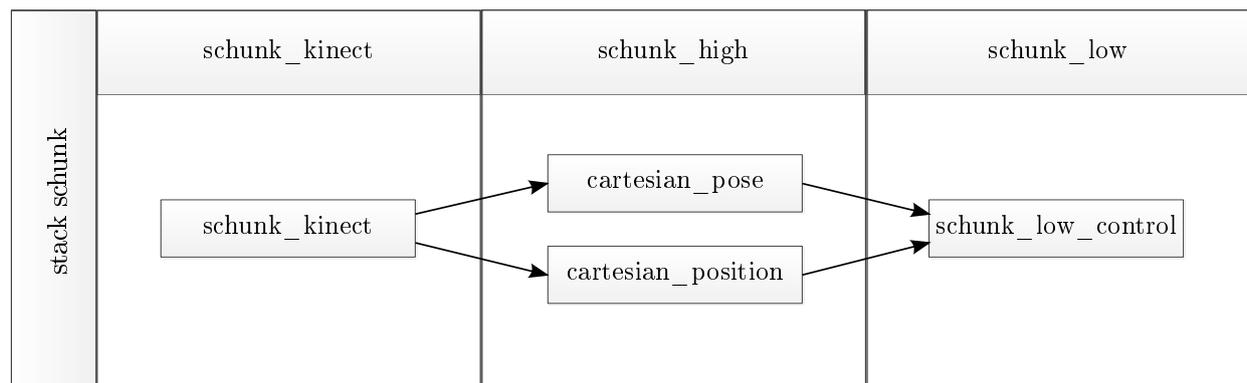


Figura V.3: Pacote `schunk_kinect` utilizado para o controle cartesiano do efetuador do robô

³Figura V.2 extraída de http://www.ros.org/wiki/openni_tracker#How_to_Use

V.2 Teleoperação Intuitiva usando as Mãos

Como os módulos disponíveis para o Kinect não permitem rastrear a orientação da mão, apenas a sua posição, não se pode controlar completamente o efetuador do robô com uma única mão. Por isso, utilizou-se uma abordagem alternativa rastreando-se a posição de ambas mãos do operador para controlar a pose do manipulador, bem como controlar a sua garra. Na estratégia realizada a mão direita controla a posição enquanto a mão esquerda é usada para fornecer comandos ao robô tais como abrir e fechar a garra ou alterar a sua orientação.

Dessa forma, implementou-se a seguinte rotina de teleoperação. Inicialmente o operador posiciona ambas mãos em posições confortáveis, que são armazenadas pelo programa como posições iniciais. Em seguida o manipulador se move para a sua posição inicial, definida previamente. Após isso, o programa entra em um laço no qual medem-se as posições das mãos e calculam-se os deslocamentos de cada mão em relação à sua posição inicial. Isso permite capturar apenas deslocamentos relativos das mãos, fazendo com que as suas posições absolutas no espaço 3D sejam irrelevantes (exceto no caso em que uma das mãos sai do campo de visão do Kinect).

O deslocamento da mão direita é multiplicado por um fator de escala e enviado ao manipulador, que imita o movimento. Assim, ao mover a mão direita para frente o efetuador do robô também se move na mesma direção, sem haver a necessidade, no entanto, de estar próximo do robô. O deslocamento da mão esquerda poderia ser utilizado para controlar a orientação do efetuador do robô, produzindo rotações em torno dos eixos x, y, z proporcionais a deslocamentos lineares nessas direções. Porém esta abordagem seria pouco intuitiva, uma vez que não é fácil visualizar os eixos de rotação do efetuador do robô por meio de deslocamentos lineares. Decidiu-se portanto utilizar os deslocamentos da mão esquerda apenas para reconhecer três comandos básicos: abrir a garra, fechar a garra, alternar entre os controladores *cartesian_pose* e *cartesian_position*.

O algoritmo 2 representa esta rotina. Como se pode ver, ao estender a mão esquerda para cima ou para baixo é possível abrir ou fechar a garra respectivamente. Estendendo a mão esquerda para a esquerda o controlador de posição é desativado e o robô passa a receber comandos do controlador de pose. Quando isso ocorre, a orientação do efetuador do robô é fixa apontando para baixo, o que restringe os movimentos do robô, mas permite pegar um objeto com mais facilidade. Retornando a mão esquerda para a posição inicial, o controlador de pose é desativado e o controlador de posição volta a atuar. Dessa forma o manipulador acompanha os movimentos do operador mantendo, porém, a orientação da garra livre, o que proporciona movimentos mais fluidos. Além disso, os ganhos do controlador de posição foram ajustados a valores mais elevados, de modo a tornar o sistema mais reativo, enquanto os do controlador de pose são menores possibilitando um ajuste fino da posição do efetuador, antes de segurar o objeto desejado com a garra.

Algoritmo 2 teleoperação intuitiva usando o Kinect

$md_posi \leftarrow$ posição_inicial_da_mão_direita
 $me_posi \leftarrow$ posição_inicial_da_mão_esquerda
 $er_posi \leftarrow$ posição_inicial_do_efetuador_do_robô

enquanto não encerrar

$md_pos \leftarrow$ posição_da_mão_direita
 $me_pos \leftarrow$ posição_da_mão_esquerda

$dif_md_pos \leftarrow (md_pos - md_posi) * escala$
 $dif_me_pos \leftarrow me_pos - me_posi$

se mão esquerda para a esquerda **então**

ativa_o_cartesian_pose()
pose.orientação \leftarrow apontando_para_baixo
pose.translação $\leftarrow dif_md_pos + er_posi$
envia_pose()

senão se mão esquerda para cima **então**

abre_a_garra()

senão se mão esquerda para baixo **então**

fecha_a_garra()

senão

ativa_o_cartesian_position()
translação $\leftarrow dif_md_pos + er_posi$
envia_translação()

fim se

fim enquanto

V.3 Validação Experimental

Para validar o método de controle desenvolvido, realizou-se uma tarefa de pegar um objeto do chão (no caso uma garrafa de água de 5L), usando o manipulador, e colocá-lo sobre a mesa. A Figura V.4 mostra uma seqüência de imagens do experimento realizado. Primeiramente o operador move a mão direita para deslocar o robô da posição inicial V.4(a) para uma região próxima do objeto a ser pego V.4(b). Em seguida, ativa-se o controlador de pose, movendo-se a mão esquerda para a esquerda V.4(c). Usando o controlador de pose pode-se fazer o ajuste fino da posição da garra antes de fechá-la V.4(d) para segurar o objeto, movendo-se a mão esquerda para baixo.

Feito isso, move-se o objeto para a posição alvo V.4(e), sem ainda abrir a garra. Como anteriormente, alterna-se para o controlador de pose para ajustar a orientação da garra e fazer o ajuste fino da posição V.4(f). Atingindo a pose correta para soltar o objeto, abre-se a garra V.4(g), movendo-se a mão esquerda para cima. Por fim, o robô retorna à posição inicial V.4(h). O vídeo deste experimento pode ser visto online⁴

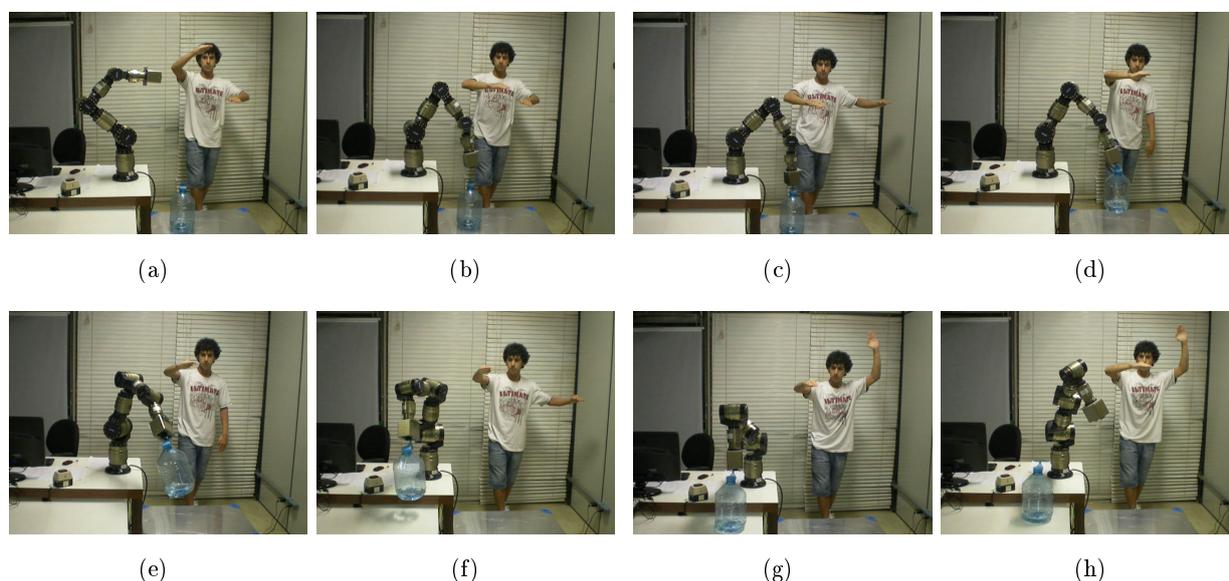


Figura V.4: Experimento de teleoperação controlando o manipulador com o movimento das mãos. Fonte: [9]

⁴<http://www.youtube.com/watch?v=ccbJcLHZfnI>