

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação



Pedro Arthur de Sá Peixoto Cogliatti

Projeto de Controle e Comando de um Robô Paralelo para
Auxiliar na Reabilitação do Tornozelo

Blumenau
2019

Pedro Arthur de Sá Peixoto Cogliatti

**Projeto de Controle e Comando de um Robô
Paralelo para Auxiliar na Reabilitação do Tornozelo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Daniel Alejandro Ponce Saldias

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação

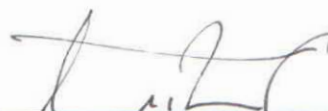
Blumenau
2019

Pedro Arthur de Sá Peixoto Cogliatti

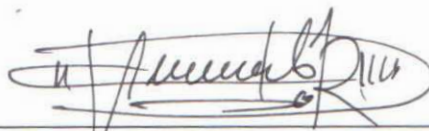
Projeto de Controle e Comando de um Robô Paralelo para Auxiliar na Reabilitação do Tornozelo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

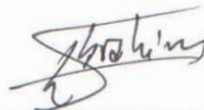
Comissão Examinadora



Prof. Daniel Alejandro Ponce Saldias
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador



Prof. Leonardo Mejia Rincón
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Ebrahim Samer El Youssef
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 7 de fevereiro de 2019

Dedico este trabalho a todos aqueles que, assim como eu,
querem fazer do mundo um lugar cada vez melhor.

Agradecimentos

Ao Prof. Daniel Ponce, pela orientação, incentivo, seu grande desprendimento em ajudar e a amizade sincera.

A minha noiva, Mariana Malvezzi, pelo companheirismo, paciência e incentivo que me dá sempre.

E aos meus pais que sempre me deram força e suporte para eu seguir meus sonhos.

*"It's the questions we can't answer that teach us the most. They teach us how to think.
If you give a man an answer, all he gains is a little fact. But give him a question and
he'll look for his own answers."
(Patrick Rothfuss, The Wise Man's Fear)*

Resumo

No Brasil existe uma carência de profissionais na área da saúde. Por se tratar de uma área de terapia e não emergencial, a fisioterapia é umas das áreas que mais sofre com a falta de investimento e, conseqüentemente, de profissionais. Por conta disso, é interessante buscar soluções para se contornar o problema. Artefatos tecnológicos poderiam auxiliar estes profissionais abrindo a possibilidade de atender vários pacientes ao mesmo tempo. Este trabalho propõe a construção e controle de um robô paralelo para auxílio no tratamento de fisioterapia do tornozelo, buscando uma solução que seja acessível, baixo custo, eficaz e de fabricação nacional. Para isso, será feito um levantamento dos robôs aplicados a fisioterapia e robôs paralelos. O estado da técnica será estudado e uma modelagem do sistema será proposto. Por fim, um protótipo é implementado com base neste estudo. No primeiro capítulo será feita uma introdução, onde será apresentado uma breve resenha da biomecânica, do mecanismo de lesão de tornozelo e o tratamento. Também é indicado o problema dos profissionais da fisioterapia e de como o sistema robótico pode ajudar a resolver este problema. Em seguida, será apresentado os estudos existentes de robótica assistiva na área de saúde e de fisioterapia. No capítulo seguinte será feito o fundamento teórico. Na sequência é realizada a proposta do projeto Robô Paralelo Esférico para Reabilitação do Tornozelo, seguindo a metodologia de projeto PRODIP até a fase de projeto preliminar, onde é construído o protótipo. Este trabalho termina apresentando o resultado e conclusões.

Palavras-Chave: 1. Robô paralelo. 2. Robótica assistiva 3. Reabilitação do tornozelo

Abstract

In Brazil there is a shortage of professionals in the health area. Because it is a therapy area and not an emergency, physiotherapy is one of the areas that suffers most from the lack of investment and, consequently, from professionals. Because of this, it is interesting to look for solutions to get around the problem. Technological artifacts could help these professionals open the possibility of attending several patients at the same time. This work proposes the construction and control of a parallel robot to aid in the treatment of ankle physiotherapy, seeking a solution that is accessible, low cost, cheap, effective and of national manufacture. For this, a survey of robots applied to physiotherapy and parallel robots will be done. The state of the art and a modeling of the proposed system will be studied. Finally, a prototype is implemented based on this study. In the first chapter an introduction will be made, where a brief review of biomechanics, ankle injury mechanism and treatment will be presented. It also indicates the problem of physiotherapy professionals and how the robotic system can help solve this problem. Next, the present studies of assistive robotics in the area of health and physical therapy will be presented. In the following chapter the theoretical foundation will be made. Following is the proposal of the Parallel Spherical Robot for Ankle Rehabilitation project, followed by the PRODIP project methodology until the preliminary design phase, where the prototype is built. This paper ends by presenting the results and conclusions.

Keywords: 1. Parallel Robot 2. Assistive robotics 3. Rehabilitation of Ankle

Lista de figuras

Figura 1 – Produtores no mercado mundial de Tecnologias assistivas [1].	15
Figura 2 – Detalhamento ligamentos tornozelo.[2]	16
Figura 3 – Lokomat da empresa Hocoma.[3]	22
Figura 4 – Plataforma robótica para reabilitação do tornozelo.[4]	23
Figura 5 – Workstation robótica para reabilitação do tornozelo [5].	24
Figura 6 – Robô Cartesiano da Faculdade de Engenharia da Universidade de Pequim.[6]	25
Figura 7 – Robô Cartesiano da Escola de Engenharia da Universidade de Antioquia.	26
Figura 8 – ELLTIO:Exoesqueleto para Treino de Membro Inferior com Órtese Instrumentada.	27
Figura 9 – Órteses tornozelo-pé para reabilitação e redução de energia ao caminhar.	28
Figura 10 – Projeto mecânico e avaliação de um robô portátil compacto de joelho-tornozelo-pé para reabilitação do andar.	28
Figura 11 – Exoesqueleto robótico do joelho, controlado pela intenção de movimento baseado em sinais miográficos. [7]	29
Figura 12 – Robô paralelo de reabilitação de tornozelo desenvolvido (a:plataforma de conexão de tornozelo; b:sensores de força; c:plataforma móvel; d:suporte central; e:atuadores lineares; f:plataforma de base).[8]	31
Figura 13 – Protótipo impresso em 3D: a) um braço humano protético; b) mecanismo de ombro.[9]	32
Figura 14 – Macrofases e fases de processo de desenvolvimento de produtos, adaptado de [10]	35
Figura 15 – Etapas do projeto informacional e do projeto conceitual.	37
Figura 16 – Movimentos que podem ser realizador por um tornozelo saudável [11]. .	40
Figura 17 – Requisitos de Projeto.	41
Figura 18 – Matriz Morfológica para escolha da Concepção de Projeto de Produto. Si = Princípios de solução. Fi= Funções. A concepção de Projeto de Produto está indicada pelos Princípios de Solução selecionados pela seta vermelha	47
Figura 19 – Mecanismos paralelo montado com três pernas do tipo RRS. [11] . . .	58
Figura 20 – Modelagem do Sistema: Diagrama de Fluxo de Sinais	59
Figura 21 – Detalhamento dos elos.	60
Figura 22 – Detalhamento dos base.	61
Figura 23 – Detalhamento da mesa.	61
Figura 24 – Peças desenhadas em CAD para impressão 3D	62
Figura 25 – Montagem de uma das penas: elos entre si e um deles com o motor. . .	63

Figura 26 – Montagem Final, diversas vistas.	63
Figura 27 – Montagem do sistema em CAD	64
Figura 28 – Foto do prótoto ROPERT	65
Figura 29 – Posicionamento do encoder no protótipo.	66
Figura 30 – Ligação Encoder	67
Figura 31 – Ligação do Motor de Passo	69
Figura 32 – Circuito completo para um motor	69
Figura 33 – Algoritmo	71
Figura 34 – Simulador de Voo da Cia Aérea Azul, robô paralelo Stewart.[12]	75
Figura 35 – Manipulador paralelo planar de 3 DOF.	78
Figura 36 – Outra visão do manipulador paralelo planar de 3 DOF.	78
Figura 37 – manipulador Esférico Paralelo de 3 DOF [13].	79
Figura 38 – Modelo cinemático de um manipulador paralelo esférico.[14]	79
Figura 39 – As oito configurações possíveis do membro.[13]	83
Figura 40 – Mecanismo de cadeia fechada para análise de D-H.[13]	84
Figura 41 – Sistema de coordenadas da orientação do mecanismo.[13]	86
Figura 42 – manipulador paralelo 6 DOF, 6 SPS.[13]	87

Lista de tabelas

Tabela 1	– Estudos selecionados utilizando robôs para reabilitação, parte 1. [15]	. 19
Tabela 2	– Estudos selecionados utilizando robôs para reabilitação, parte 2. [15]	. 20
Tabela 3	– Atributos de produto típicos para sistemas técnicos. [1] 37
Tabela 4	– Amplitude articular ideal dos movimentos de um tornozelo saudável [11].	41
Tabela 5	– Classificação dos manipuladores paralelos. [13] 82
Tabela 6	– Tabela com funções em Python[16] 92

Lista de Siglas e Abreviaturas

AVC	<i>Acidente Vascular Cerebral</i>
CIS	<i>Complexo Industrial da Saúde</i>
DOF	<i>Degrees of freedom</i>
ELLTIO	<i>Exoskeleton for Lower Limb Training with Instrumented Orthosis</i>
IHM	<i>Interface Homem Máquina</i>
PLA	<i>Poliácido Láctico</i>
PRODIP	<i>Processo de desenvolvimento de produto</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
SPS	<i>Spherical Prismatic Spherical</i>
SPU	<i>Spherical Prismatic Universal</i>
TCC	<i>Trabalho de Conclusão de Curso</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	ESTADO DA ARTE	19
2.1	Avaliação da Robótica na Fisioterapia	19
2.1.1	Robótica na Reabilitação de Lesões no Tornozelo	23
2.1.2	Robô paralelos na Reabilitação do tornozelo	30
3	PROPOSTA DO PROJETO PARA O COMANDO E CONTROLE DE UM ROBÔ PARA FISIO- TERAPIA DO TORNOZELO ROPERT	34
3.1	Breve descrição da Metodologia de Processo de Desenvolvi- mento de Produto PRODIP	34
3.1.0.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	35
3.1.0.2	PROJETO INFORMACIONAL	35
3.1.0.3	PROJETO CONCEITUAL	37
3.1.0.4	PROJETO PRELIMINAR	38
3.2	Implementação da metodologia PRODIP para desenvolvimento do ROPERT	38
3.2.1	Projeto Informacional: Requisitos de Usuário	39
3.2.2	Projeto Informacional: Requisitos de projeto	41
3.2.3	Projeto Informacional: Especificações de projeto	43
3.2.4	Projeto Conceitual: Síntese funcional	43
3.2.5	Projeto Conceitual: Matriz Morfológica	46
3.2.5.1	Justificativa dos princípios de solução da Concepção de Projeto de Produto ROPERT	48
4	RESULTADOS	58
4.0.1	Modelagem do sistema	59
4.0.2	Desenho Técnico e Planos para Fabricação	59
4.0.3	Montagem	62
4.0.4	Algoritmos e programação	70
5	CONCLUSÕES	72
6	TRABALHOS FUTUROS	73
7	APÊNDICE	74

7.1	Fundamentos Teóricos	74
7.1.1	Robôs Paralelos	74
7.1.1.1	Estrutura dos Manipuladores paralelos	76
7.1.1.2	Manipuladores Paralelos Planares	77
7.1.1.3	Manipuladores Esféricos Paralelos	78
7.1.1.4	Manipuladores Espaciais Paralelos	81
7.1.1.5	Análise geométrica dos robôs paralelos: Diferenças entre o método de Denavit-Hartenberg e o Método Geométrico	82
7.1.1.6	Análise de posição de um mecanismo de orientação espacial	84
7.1.2	Manipulador Stewart	87
7.2	Código Python	89
	 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 95

1 Introdução

Neste capítulo serão abordados o âmbito e a problemática que motivaram este trabalho. Será feita uma breve revisão da biomecânica dos mecanismos de lesão e do tratamento para entorse do tornozelo. Na sequência é indicado a proposta do trabalho e a organização do texto.

- Âmbito e Problemática

Atualmente, no Brasil, existem ao redor de 45 milhões de pessoas que precisam de tecnologias assistivas, dentre elas: idosas, com deficiências físicas e mobilidade reduzida. Além disso, hoje existe vulnerabilidade no Complexo Industrial da Saúde (CIS). Esta vulnerabilidade está caracterizada por [1]:

1. Um deficit de 5,3 Bilhões de dólares em 2012, por conceito de Indústria, Materiais e Equipamentos
2. Alta Concentração da Produção mundial, as 20 maiores empresas respondem por 70% da produção mundial
3. Uma alta concentradas da importações em poucos países (48% em 3 países)
4. EUA + Japão + Alemanha = 56% do mercado mundial
5. Uma forte dependência de insumos importados
6. Uma pequena participação das exportações (0,3% do total)
7. Uma reduzida capacidade inventiva
8. Baixa qualidade do produto nacional
9. O conhecimento relacionado aos cuidados e controles pré-mercado particulares que garantem a segurança das tecnologias assistivas, não está sistematizado. Os sistemas mecatrônicos utilizados em tecnologias assistivas apresentam alto risco por estar em permanente contato com o corpo humano, portanto o desenvolvimento destes requer cuidados e controles pré-mercado particulares para garantir a segurança e eficácia clínica dos mesmos e atender integralmente os requisitos regulatórios que devem ser cumpridos para uma possível comercialização.

Na Figura 1, pode ser visto a participação mundial na produção de tecnologias assistivas.

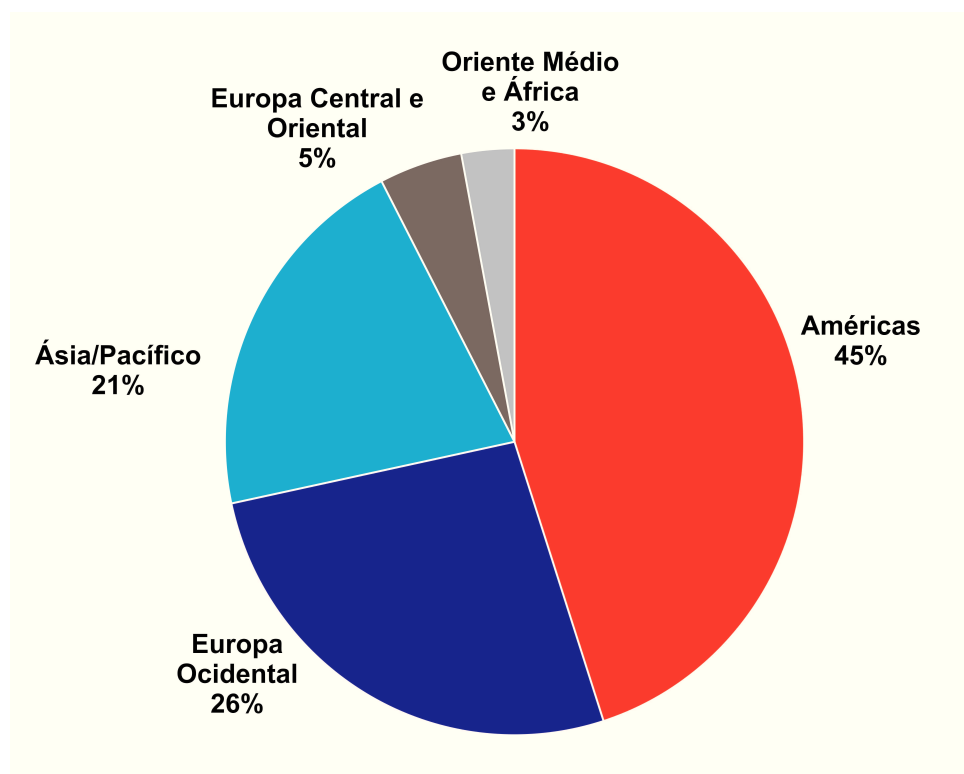


Figura 1 – Produtores no mercado mundial de Tecnologias assistivas [1].

Além destes problemas, no Brasil, o programa de fisioterapia ainda está passando por muitos desafios. A necessidade e aplicação da fisioterapia no SUS e em outros hospitais populares ainda é assunto em discussão. Uma vez que a fisioterapia está vinculada à reabilitação de pacientes e não a tratamentos emergenciais. Para isso, o profissional da fisioterapia necessita de novas possibilidades de atuação e ferramentas.

A falta de profissionais da saúde exige uma solução de implementação de tecnologias para apoio dos profissionais da saúde e/ou para os pacientes, para que se possa resolver esse gargalo.

- Biomecânica, Mecanismos de Lesão e Tratamento da Entorse de Tornozelo

A entorse de tornozelo é uma das lesões musculoesqueléticas frequentemente encontradas na população ativa e que geralmente envolve lesão dos ligamentos laterais. Esse tipo de lesão, também é muito comum em atletas. A maioria delas ocorre durante a atividade esportiva com indivíduos de 15 a 35 anos. Um levantamento publicado em [17], indica que ocorre com maior frequência nos atletas de futebol, basquete e vôlei, correspondendo a cerca de 10% a 15% de todas as lesões do esporte. No Reino Unido, ela acontece em uma a cada 10.000 pessoas da população geral, isto é, cerca de 5.000 lesões por dia. Quando

não tratada, a entorse do tornozelo pode evoluir com complicações, com vários graus de limitações funcionais[17].

A entorse é um movimento violento, com estiramento ou ruptura de ligamentos de uma articulação. Este tipo de lesão pode ocasionar um rompimento ligamentar lateral, tipicamente, durante a flexão plantar e inversão, que é a posição de máximo estresse no ligamento talofibular anterior, mostrado na figura 2. Por essa razão, o ligamento talofibular anterior é mais comumente lesado durante o traumatismo e inversão. Em lesões por inversão de maior gravidade os ligamentos calcâneo-fibular, o talofibular posterior e o subtalar também podem ser lesados[18].

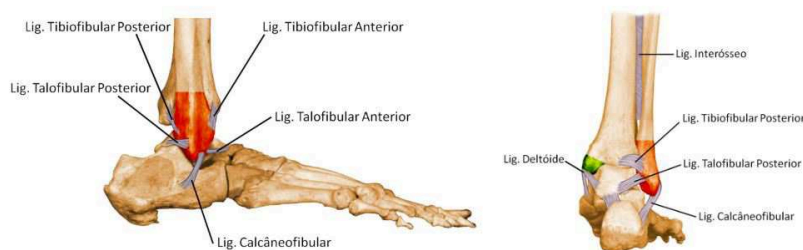


Figura 2 – Detalhamento ligamentos tornozelo.[2]

A maioria das lesões ligamentares laterais do tornozelo resolve-se espontaneamente com tratamento conservador. Isto é, um procedimento fisioterápico conhecido como princípio RICE (Rest - repouso, Ice - gelo, Compression - compressão e Elevation - elevação). Imediatamente após a lesão, um curto período de imobilização e proteção com bandagens elásticas ou rígidas e exercícios de mobilização precoce seguidos de carga precoce e treinamento neuromuscular precoce. Um programa de fisioterapia bem estruturado com fortalecimento dos perônios e treinamento proprioceptivo, alongamento e aparelhamento ou imobilização funcional pode resolver a maiores dos problemas sem recorrer a cirurgias[18].

O projeto deve incentivar a produção de tecnologia nacional dando maior acessibilidade da tecnologias assistivas a população, sendo eficaz na aplicação de protocolos terapêutico, tendo um custo reduzido e uma fácil fabricação.

Para este trabalho, será implementado um sistema de controle "*Master-Slave*", onde o robô replica a trajetória imposta pelo fisioterapeuta.

Considerando a problemática, acima citada, e a alta incidência de lesões no tornozelo é aqui proposto o comando e controle de um robô paralelo esférico para auxílio na rea-

bilitação do tornozelo. Este robô será denominado neste trabalho como ROPERT (Robô Paralelo Esférico para Reabilitação do Tornozelo). O ROPERT está baseado na topologia proposta por [11]. Sua arquitetura possui três juntas RRS (duas rotativas e uma esférica) por perna, sendo ele composto por três pernas.

- Objetivos Gerais

O objetivo deste TCC é desenvolver um projeto de comando e controle de um mecanismo paralelo para fisioterapia do tornozelo, que permita auxiliar o trabalho do fisioterapeuta e dos profissionais de saúde no âmbito nacional.

- Objetivos Específicos

1. Obter uma solução projetiva mediante o Processo de Desenvolvimento de Produto PRODIP.

2. Desenvolver um protótipo funcional do robô paralelo para fisioterapia do tornozelo.

3. Desenvolver os algoritmos de comando e controle do robô para fisioterapia.

4. Realizar um estudo do estado da arte e do estado da técnica para poder comparar vantagens e desvantagens dos sistemas existentes com o sistema proposto.

- Organização do Texto

Ao longo do capítulo 2, será abordado o estado da arte em relação à robótica na fisioterapia, às aplicações da robótica na reabilitação do tornozelo e por fim, chegando bem próximo a proposta deste trabalho, os robôs paralelos na reabilitação do tornozelo.

O projeto aqui proposto segue a metodologia de desenvolvimento de produto (PRODIP)[1], desde o projeto informacional até a fase de projeto preliminar. Ao longo destas fases são determinadas os requisitos de projetos, as funções que devem satisfazer os princípios de solução para chegar finalmente, a um único princípio de solução, que é modelado e prototipado. O capítulo 3 trata da modelagem e prototipagem do robô.

Este trabalho termina nas conclusões que avaliam o resultado com a proposta inicial. Uma sessão extra foi adicionado, para comentar sobre algumas implementações que

espera-se implementar no futuro.

No capítulo 7, é feito um detalhamento sobre a arquitetura deste tipo de robô. Neste capítulo também serão abordados os fundamentos teóricos dos principais tipos de robôs paralelos estudados atualmente. Será abordado sua estrutura e a cinemática que o envolve. Esses conhecimentos fazem parte do estado da técnica, além de fomentar o conhecimento necessário para cumprir os pré requisitos do protótipo.

2 Estado da Arte

Nesta sessão, será abordado um ponto de vista atualizado da robótica assistiva utilizado na fisioterapia de membros inferiores. Para isto será feito uma revisão bibliográfica que vai se aprofundando aos poucos para tecnologias próximas à proposta por este projeto.

Primeiramente, serão abordados os estudos sobre a robótica aplicada à fisioterapia de forma geral. Posteriormente, será falado sobre a robótica na reabilitação do tornozelo. E por fim, é abordado o uso de robôs paralelos na reabilitação do tornozelo, focando exatamente no estado da arte da proposta deste projeto.

2.1 Avaliação da Robótica na Fisioterapia

Com os avanços tecnológicos, tanto na robótica como em outras áreas, está sendo gerado um grande número de pesquisas multidisciplinares, que mistura robótica com a área da saúde, por exemplo; resultando em diversos mecanismos e técnicas para melhorar a qualidade de vida das pessoas. Um levantamento feito pela UNIFESP e publicado em [15], pegou diversos estudo sobre robótica aplicada na reabilitação. Este levantamento pode ser visto na tabela 2.

Autores/ano	Amostra	Patologia/desordem	Tecnologia	Resultado
Sale et al., 2013.	20 adultos.	Doença de Parkinson (DP).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora na marcha no grupo utilizando robótica.
Hu et al., 2015.	26 adultos.	Acidente vascular encefálico (AVE).	Robô de membros superiores e NMES.	Houve melhora significativa no grupo utilizando terapia robótica e NMES.
Timmermans et al., 2014.	22 adultos.	Acidente vascular encefálico (AVE).	Robô de membros superiores.	Houve melhora significativa no grupo utilizando terapia robótica.
Picelli et al., 2014.	10 adultos.	Doença de Parkinson (DP).	Robô de membros superiores.	Houve melhora significativa no grupo utilizando terapia robótica.

Tabela 1 – Estudos selecionados utilizando robôs para reabilitação, parte 1. [15]

Autores/ano	Amostra	Patologia/desordem	Tecnologia	Resultado
Straudi et al., 2013.	16 adultos.	Esclerose múltipla (EM).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora na marcha no grupo utilizando terapia robótica.
Hoekstra et al., 2013.	10 adultos.	Lesão medular (LM).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora na aptidão cardiorrespiratória no grupo utilizando terapia robótica.
Fleerkotte et al., 2014.	10 adultos.	Lesão medular (LM).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora da marcha no grupo utilizando terapia robótica.
Schoenrath et al., 2015.	5 adultos.	Insuficiência cardíaca (IC).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora da marcha no grupo utilizando terapia robótica.
Drużbicki et al., 2013.	52 crianças.	Paralisia cerebral (PC).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora da marcha no grupo utilizando terapia robótica.
Ruiz et al., 2013.	16 adultos.	Traumatismo cranioencefálico (TCE).	Treinamento de marcha assistida por robô.	Houve melhora na distância percorrida no grupo utilizando terapia robótica.

Tabela 2 – Estudos selecionados utilizando robôs para reabilitação, parte 2. [15]

De acordo com [15], pacientes acometidos por AVE, TCE, LM, IC, PC, DP e EM são beneficiados com terapia robótica. A partir desta tabela, fica evidente que a robótica traz resultados significativos para reabilitação. Dentro das áreas médicas, a fisioterapia também faz um bom uso de tecnológicas robóticas. Podemos citar por exemplo o artigo sobre a Efetividade da reabilitação de membros inferiores assistida por robô para pacientes espásticos ¹[20].

Nesse trabalho foi abordado a eficácia do dispositivo de reabilitação assistiva do robô para remoção de espasticidade do membro inferior de pacientes com espasticidade. Para isso foi extraído setenta e uma publicações de onze bancos de dados publicados e selecionados por meio de palavras-chave: Espasticidade, reabilitação robótica, eficácia da robótica e reabilitação do pé do tornozelo.

O resultado foi um estudo quantitativo da análise de 26 trabalhos compreendendo 786 indivíduos realizados. Com isso, foi possível deduzir a eficácia da terapia assistiva do robô para o movimento do tornozelo e funcionamento da marcha. Após todo esses levantamentos, Fica evidente que a robótica na reabilitação possui a capacidade de fornecer protocolos terapêuticos unificados com maior facilidade em comparação com terapias con-

¹ Espasticidade é quando ocorre um aumento do tônus muscular, envolvendo hipertonía e hiper-reflexia, no momento da contração muscular, causado por uma condição neurológica anormal [19].

vencionais. Eles, continuamente, provam ser assistentes insubstituíveis quando trata de fornecer excelente tratamento em termos de melhoria a partir deste estudo [20].

Um outro trabalho [21], de âmbito nacional, também valida a eficácia de dispositivos robóticos de reabilitação do tornozelo. Neste caso, o motivo da reabilitação são as doenças cerebrovasculares, incluindo o acidente vascular encefálico que geram complicações motoras. Este trabalho propõe uma revisão bibliográfica, de dispositivos robóticos de reabilitação do tornozelo já desenvolvidos no exterior e apresenta um projeto de pesquisa nacional. Para validar este estudo, os pesquisadores utilizam uma Plataforma Robótica de Reabilitação, desenvolvida no Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos. Neste artigo, comprova-se as potenciais melhorias relacionado ao ganho motor e aprendizado motor na reabilitação.

A conclusão pode ser lida na citação dos próprios pesquisadores:

Com os resultados das diversas pesquisas levantadas, pode-se verificar de uma forma geral que o treinamento intensivo da articulação do tornozelo, apresentaram ganhos motores relacionados à aumento de velocidade, amplitude de movimento articular, ganho de força, menor resistência articular. Tais repostas positivas mostram estímulos na neuroplasticidade positiva e aprendizado motor, mesmo nas condições dos hemiparéticos² crônicos.

A utilização dos dispositivos robóticos associado a estímulos virtuais potencializaram ainda mais os ganhos. O uso de impedância mecânica (por exemplo, atuador elástico em série) dos dispositivos robóticos promovem uma interação entre o paciente e o robô, fazendo com que o paciente desenvolva os movimentos dentro da sua capacidade individual. Em todos os tipos de treino, na postura sentada, ao caminhar sobre uma esteira rolante ou sobre o solo, apresentaram ganhos relacionados à velocidade da marcha, comprimento da passada e cadencia.[21]

Um dos mecanismo já introduzidos no mercado é que já apresenta alguma sucesso é o Lokomat, Figura 3. O Lokomat é uma estação robótica para reabilitação fisiológica altamente intensiva para pacientes neurológicos gravemente comprometidos.

² Paralisia leve de um dos lados do corpo; interrupção parcial ou relaxamento do movimento de uma parte do corpo, geralmente causada por alguma lesão neurológica[22]



Figura 3 – Lokomat da empresa Hocoma.[3]

A ideia do produto é entregar um mecanismo que permite treinamento de esteira automático, que não deixe terapeutas expostos a tensão física e que não seja necessário mais que um terapeuta. Oferece também duração e intensidade de treinamento ilimitadas, diversos tipos de respostas e análises para o paciente e o terapeuta. Durante a reabilitação, os pacientes precisam ser desafiados para além de suas capacidades individuais. A velocidade, o carregamento e o suporte robótico podem ser ajustados para moldar de forma ideal a intensidade da terapia. Um vídeo faz a interação com o paciente, onde este deve andar sobre a estação de trabalho. Um exoesqueleto é instalado sobre o paciente para pegar as informações. O Lokomat serve de exemplo para exemplificar um projeto de reabilitação bem sucedido e que foi possível introduzir no mercado.[3]

Com esta série de artigos e projetos avaliando o uso da robótica da recuperação de pacientes, é seguro afirmar que a robótica é uma boa aliada nos tratamentos de fisioterapia, pois irá beneficiar indivíduos que sofreram algum tipo de lesão auxiliando na movimentação ativa de articulações e conseqüentemente poderá resultar na melhora da força muscular, do controle motor e da sensibilidade. O tratamento pelo uso da robótica também proporciona momentos lúdicos, de descontração, lazer e bem estar ao praticante. Logo, influencia de forma positiva na melhora da qualidade de vida, promovendo incentivo na continuidade do processo de reabilitação. Outra vantagem é que a robótica é um recurso para mensurar com exatidão os parâmetros individuais de cada paciente promovendo um melhor diagnóstico e acompanhamentos do tratamento [15].

2.1.1 Robótica na Reabilitação de Lesões no Tornozelo

Existem vários estudos de dispositivos robóticos que auxiliem de maneira eficaz o tratamento de lesões no tornozelo. Entre eles exoesqueletos, plataforma móveis e robôs cartesianos e até "workstations". Nessa sessão, serão resumidos as principais dessas tecnologias mais recentes.

O uso de plataformas móveis, como mostra na Figura 4, é amplamente abordado pelo meio científico.

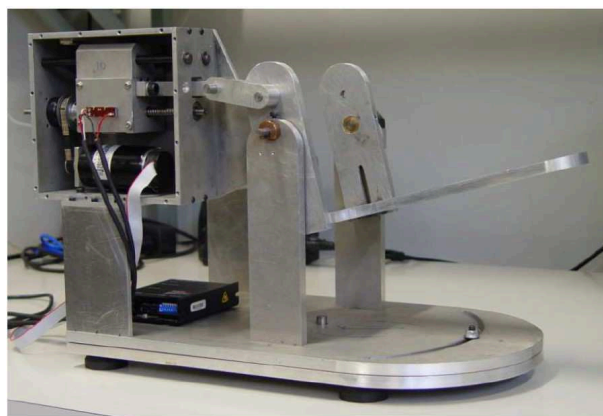


Figura 4 – Plataforma robótica para reabilitação do tornozelo.[4]

O estudo de uma plataforma móvel pode ser visto em [4]. Este trabalho implementa um modelo uma plataforma móvel para reabilitação que inclui uma sistema de controle de segunda ordem para controle de força aplicado na articulação humana. Este dispositivo pode ser visto na Figura 4. O foco deste projeto é criar um sistema de controle de força, que apesar de cumprir com a proposta, constituiu de um mecanismo com movimentos muito simples, extremamente limitado, focado somente no sistema de controle de forças.

Para se controlar a saída impedância da plataforma é usado uma configuração em cascata com um controlador de posição PD como loop externo e um controlador de força em o laço interno. Neste projeto a análise de um controlador de força garante estabilidade robusta no interior do loop de controle da impedância. Para validar os resultados, testes de desempenho e estabilidade utilizando frequência e respostas temporais foram realizadas. Os resultados obtidos neste trabalho são ponto de partida para melhorar o desempenho dos controladores de força e, portanto, terapias de reabilitação controladas por impedância [4].

Em [5], é um artigo que sugere um dispositivo também em forma de plataforma móvel, mas associado já uma estação de trabalho, Figura 5. No artigo Reabilitação sensorimotora do tornozelo guiada por robô de pacientes com múltiplos esclerose, introduz um estudo e validação de um mecanismo para treinamento de movimento passivo-ativo do tornozelo

guiado por robô para redução das deficiências motoras e sensoriais e melhora as funções de equilíbrio [5].



Figura 5 – Workstation robótica para reabilitação do tornozelo [5].

Neste trabalho, sete pacientes participaram de alongamento passivo combinado e treinamento de movimento ativo usando um robô de reabilitação do tornozelo. Seis dos pacientes terminaram o treinamento robótico 3 sessões por semana durante 6 semanas para um total de 18 sessões. Avaliações biomecânicas e de resultados clínicos foram realizadas antes e após as 6 semanas de tratamento. Após essas seis semanas de treino sensorimotor no tornozelo, houve aumento da amplitude de movimento dorsiflexão, força muscular dorsal e flexora plantar e equilíbrio e locomoção. O estudo mostrou as seis semanas de duração do treinamento foi apropriada para observar melhora da amplitude de movimento e força para pacientes com comprometimento do tornozelo. Com isso, concluiu-se que o treinamento de tornozelo guiado por robô é potencialmente uma intervenção terapêutica útil para melhorar a mobilidade dos pacientes.

Este segundo estudo foca no resultado que essas plataformas móveis com controle de força podem trazer para os pacientes, mas mais uma vez, sua movimentação é limitada, o equipamento é grande e complexo.

Vale a pena ressaltar que existem projetos que usam o conceito de robôs paralelos junto com plataformas. Pode ser mencionado o artigo [23], que trabalha no projeto da cinemática de um robô paralelo de reabilitação de tornozelo, usando algoritmo genético modificado. Para este projeto, ele propõe um robô que utiliza uma plataforma acoplado a um mecanismo paralelo, porém aplicado de forma suave para a reabilitação articular do tornozelo. O artigo aborda mais a parte de algoritmo, mostrando a análise cinemática do espaço de trabalho, os critérios de singularidades e é definido a área de trabalho viável[23].

Outra solução dentro da robótica para este tipo de tratamento é o uso de robôs cartesianos. A grande vantagem que esses dispositivos, apesar de serem grandes e complexos,

apresentam também a possibilidades de tratamento em outras articulações, além do tornozelo. Um grupo de pesquisa em robótica da Faculdade de Engenharia da Universidade de Pequim, sugere no seu artigo [6], um robô paralelo onde se encaixe um dos membros inferiores, mostrado na Figura 6, que execute movimentos longitudinais e latitudinais.

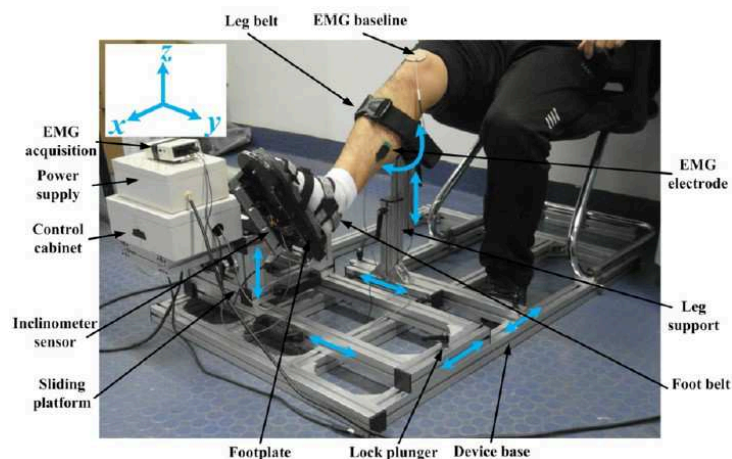


Figura 6 – Robô Cartesiano da Faculdade de Engenharia da Universidade de Pequim.[6]

O sistema consiste em uma plataforma robótica e sistema de controle com interface gráfica de usuário. Cinco pessoas normais foram usadas para testar a confiabilidade e viabilidade do sistema proposto. Para validar a eficácia do sistema robótico, cinco pacientes com AVC foram recrutados para realizar um tratamento de seis semanas. O resultado do tratamento foi avaliado quantitativamente em propriedades de junção passiva e ativa. As propriedades da junta ativa melhorou significativamente chegando perto ao de indivíduos normais. Neste trabalho, foi visto que a força muscular tem uma tendência crescente à medida que o tempo passa. Os resultados demonstram que o sistema robótico integrado de reabilitação tornozelo-pé proposto é eficaz na melhora da espasticidade e/ou contratura do tornozelo e é uma solução promissora na reabilitação clínica. O sistema proposto é um bom exemplo de projeto, pois se mostrou inteligente e confiável, além de poder oferecer tratamento mais efetivo do que apenas o alongamento passivo. Este trabalho sugere um futuro empreendimento para introduzir no mercado e torná-lo amplamente utilizado na reabilitação clínica.[6]

Uma segunda solução para um robô paralelo é apresentado em [7]. O artigo aborda a modelagem e simulação de um robô terapêutico para a reabilitação de membros inferiores, assim como o modelo cinemático e dinâmico de um robô paralelo com três graus de liberdade. Eles também implementam um sistema de controle de torque para o rastreamento de trajetórias planejadas. A validação é feita através de simulações de exercícios terapêuticos para quadril e joelhos realizados em ADAMS e MATLAB. Apesar deste projeto cumprir com o que propõem e, de fato, trazer contribuição significativa para o meio científico, pode-se observar pela Figura 7, o dispositivo apresenta somente uma movimen-

tação longitudinal, limitando assim o tratamento somente por este movimento [7].

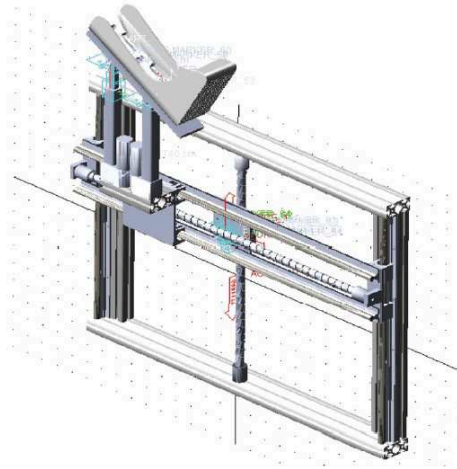


Figura 7 – Robô Cartesiano da Escola de Engenharia da Universidade de Antioquia.

Um outra abordagem um tanto interessante para o tratamento desse tipo de lesão, são os projetos de exoesqueletos. Este tipo de projeto normalmente propõem algum tipo de mecanismo robótico em que o paciente veste o protótipo para auxiliar nas movimentações estipuladas. Um exemplo deste tipo pode ser visto no artigo [24]. Este trabalho sugere um exoesqueleto para o treinamento de membros inferiores com órtese instrumentada (ELLTIO) por suas siglas em inglês "Exoesqueleto para Treino de Membro Inferior com Órtese Instrumentada", Figura 8. Consiste em um dispositivo mecatrônico que para ajudar na fisioterapia passiva no intuito de aumentar a força e a resistência dos músculos humanos. A ideia principal é ajudar um fisioterapeuta profissional na concepção e execução de rotinas e exercícios para seus pacientes usando o protótipo. Os movimentos do joelho e articulação do tornozelo gravam e armazenam o movimento realizado durante os exercícios para posteriormente propor algumas trajetórias similares geradas por computador e assim o exoesqueleto deve seguir. Vele ressaltar que para o projeto em sim, um controlador adaptativo é implementado para rastrear trajetórias e adaptar os parâmetros do usuário.[24].

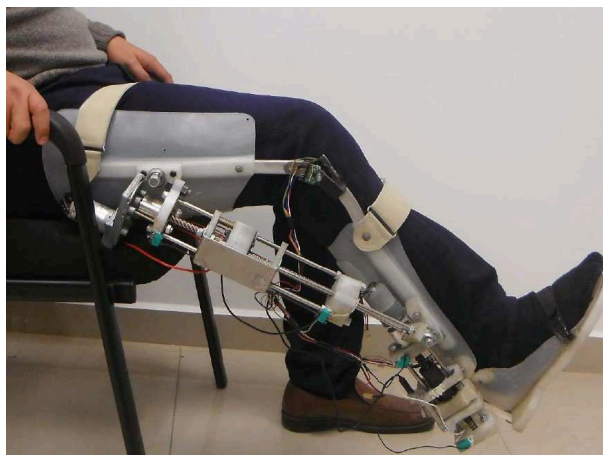


Figura 8 – ELLTIO:Exoesqueleto para Treino de Membro Inferior com Órtese Instrumentada.

Nesse protótipo de exoesqueleto, o mecanismo é controlado usando um sistema de controle PD com um adaptativo algoritmo de compensação. Os parâmetros desconhecidos são identificados on-line para que as duas posições angulares acompanhem as trajetórias desejadas correspondentes. Ao final, os pesquisadores concluem que tanto o protótipo quanto o sistema de controle foram bem sucedidas e testados em experimentos em tempo real. Foi observado que é possível usar o mesmo exoesqueleto em pacientes com pesos diferentes, pois as articulações do joelho e tornozelo foram capazes de rastrear as trajetórias pré-definidas após algum período transitório. Também, foi implementado no exoesqueleto, uma mecânica de freios que impedem ultrapassar os ângulos de conforto além de uma parada de emergência. A velocidade e aceleração das articulações são limitadas por software e mecanicamente. Para validação de resultados, um terapeuta gerou a rotina real adaptado para a criança com distrofia muscular. este rotina foi utilizada nos experimentos.

Uma solução mais simples foi descrita no artigo *Ankle-foot orthoses for rehabilitation and reducing metabolic cost of walking: Possibilities and challenges* (Tradução livre: Órteses tornozelo-pé para reabilitação e redução de energia ao caminhar: possibilidades e desafios) [25]. Neste artigo é estudado uma intervenção órtica de tornozelo onde seu objetivos principal é tratar deficiências do tornozelo parético³. Esta órteses de tornozelo-pé foi desenvolvida para auxiliar a caminhada humana, o que pode vir reduzir o gasto energético do paciente ao caminhar. No artigo foram desenvolvidos três tipos de órteses, incluindo as órteses passivas, semi-ativas órteses e órteses ativas [25]. Um exemplo dessas órteses mencionadas no artigo pode ser visualizada na Figura 9.

³ Que se refere, pertence ou é próprio à parestesia, um tipo de paralisia causada por lesão neurológica que não é completa; parésico [22].

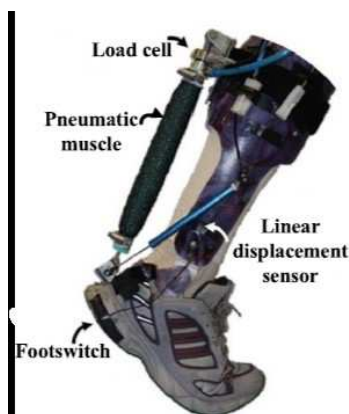


Figura 9 – Órteses tornozelo-pé para reabilitação e redução de energia ao caminhar.

Estas órteses não deixam de ser um bom exemplo do uso da robótica na reabilitação do tornozelo, apesar da simplicidade. Não só esta, mas diversos artigos científicos propõem pequenas órteses para, na maioria dos casos, tratamento de lesões no tornozelo com o uso da robótica e outras vezes até com mecanismos mais simples.

Voltado ao escopo de um mecanismo mais complexo, pode-se citar o artigo [26].



Figura 10 – Projeto mecânico e avaliação de um robô portátil compacto de joelho-tornozelo-pé para reabilitação do andar.

Este artigo apresenta o projeto mecânico e avaliação de um robô joelho-tornozelo-pé, que é compacto, modular e portátil e já visa o uso ambulatoriais e domésticas.

O projeto propõe o uso de uma mola translacional de baixa rigidez e uma outra mola de torção de alta rigidez, que são colocadas em série para transmissão de força. Como o artigo propõe um mecanismo com uma certa portabilidade, a articulação robótica é otimizada com base na biomecânica e a estrutura mecânica é construída com materiais leves. Este robô demonstra controle de força estável e preciso em experimentos realizados em indivíduos saudáveis com caminhada no solo. A força exercida pelos principais mús-

culos das pernas dos pacientes é reduzido como indicado pelos sinais de padrão normal de marcha, e é mantido durante o teste, que demonstra que o robô pode fornecer força assistiva efetiva aos pacientes durante andar.[26]

O artigo também abre discussão para futuras implementações de metodologias avançadas no sensoriamento e controle. No caso, para introduzir o robô em ensaios clínicos em pacientes com AVC. Resumidamente, a proposta dos pesquisadores é detectar a deficiência do caminhar e as fases anormais dos passos do paciente e aplicar a força assistiva apropriada nas fases correspondentes da marcha. Além de propor novos sensoriamentos, um novo protótipo também é sugerido para integrar a fonte de energia e o controlador em uma mochila, o que torna o sistema robótico geral autocontido e portátil. O estudo clínico também será conduzido para avaliar melhor a eficácia do sistema robótico.[26]

No artigo [27], apresenta o desenvolvimento de um exoesqueleto robótico para o joelho, que utiliza o controle de admitância para auxiliar pessoas com mobilidade reduzida e melhorar sua locomoção. A pesquisa aponta que esses dispositivos, trabalhando em constante interação com o sistema humano neuromuscular e esquelético, melhora a compensação funcional e a reabilitação. Assim, os usuários tornam-se parte ativa do treinamento/reabilitação, facilitando seu envolvimento e melhorando sua plasticidade neural. Para reconhecimento da intenção de movimento dos membros inferiores e discriminação dos movimentos do joelho, são utilizadas sinais eletromiográficos de membros inferiores e tronco.[27]



Figura 11 – Exoesqueleto robótico do joelho, controlado pela intenção de movimento baseado em sinais miográficos. [7]

Para isso, um sistema de controle, que inclui um estágio para o reconhecimento da intenção do movimento humano, baseado em técnicas para classificar as classes de movimento relacionadas à articulação do joelho, foi desenvolvido. Para a tradução da intenção do usuário para um estado desejado para o exoesqueleto robótico do joelho, o sistema também inclui uma máquina de estado finito e controladores de admitância, velocidade e trajetória com uma função que permite parar o movimento de acordo com a intenção do usuário. Os resultados apresentam que o controlador oferece suporte de joelho em 50%

do ciclo da marcha e auxilia corretamente as classes de movimento.[27]

Todos esses projetos mencionados dão uma base sobre o que está sendo estudada em exoesqueletos robóticos aplicados na robótica assistiva, especificamente para a reabilitação no tornozelo. Essas propostas e soluções, apesar de serem projetos de grande estudo e alguns mesmo, teses de mestrado, possuem suas limitações e peculiaridades. No caso dos exoesqueletos, normalmente um alto valor comercial vem agregado, um vasto conhecimento dos utilizadores é necessário e por esses motivos, inviabiliza a introdução desses tipo de atuadores no mercado nacional.

2.1.2 Robô paralelos na Reabilitação do tornozelo

Nesta sessão, serão apresentados alguns projetos científicos de robôs paralelos aplicados na reabilitação do tornozelo.

No artigo [28], compara as técnicas existentes de reabilitação de tornozelo assistida por robô em termos de design de robô. De acordo com Miao [28], os dispositivos baseados em plataformas são desenvolvidos principalmente para o tratamento de uma variedade de sistemas músculo-esqueléticos e neurológicos do tornozelo. Por exemplo lesões, enquanto os robôs exoesqueletos vestíveis, como já mencionado neste trabalho, se concentram mais no treinamento de marcha relacionado ao tornozelo. Em termos de design de robôs, indica que um robô ideal para reabilitação do tornozelo deve ter um centro de rotação alinhado como articulação do tornozelo, espaço de trabalho apropriado e torque de atuação, não importa quantos DOFs ele tenha. O robô de reabilitação do tornozelo com reconfigurabilidade para maximizar suas funções será um novo ponto de pesquisa para o projeto ideal, especialmente em mecanismos paralelos [28].

O artigo já dá uma noção que, apesar da maioria dos robôs de reabilitação do tornozelo demonstraram ser eficaz para fisioterapia, eles têm desvantagens no design que impediu suas aplicações. Alguns levantamentos feitos por Miao[28], podem ser extraídos de seu artigo e levados em consideração:

- Um projeto ideal de robô de reabilitação do tornozelo é caracterizado por possuir um centro de rotação alinhado com a articulação do tornozelo. Deve ter um espaço de trabalho apropriado e controle de torque.
- O número de DOF do robô depende da aplicação. O robô com um único DOF (plataformas por exemplo) é desenvolvido principalmente para uma aplicação especial, como alongamento do tornozelo ao longo da flexão dorsal e flexão plantar, enquanto mecanismos com mais DOF (robôs paralelos), são mais adequados para exercícios de reabilitação do tornozelo mais abrangentes.

- Robôs de reabilitação do tornozelo podem ser uma nova área de pesquisa para um projeto ideal com espaço de trabalho apropriado e torque de acionamento, em mecanismos paralelos. Otimização multiobjetivo técnicas podem ser envolvidas para fazer robôs em ótimo desempenho cinemático e dinâmico.

Esta busca no desempenho dos robôs paralelos já está sendo abordado por alguns pesquisadores através de sistemas de controle. No artigo [8], mostra o desenvolvimento e avaliação de um sistema de controle baseado em lógica fuzzy para um robô paralelo de reabilitação de tornozelo. O robô construído pode ser visto na Figura 12 e se baseia na Plataforma Stewart que será abordado no capítulo 7. O sistema de controle adaptativo proposto atua na forma de resistência/nível contra a força aplicada dos pacientes em cima do dispositivo. A Controlador fuzzy também é desenvolvido para melhorar a capacidade de rastreamento de trajetória do robô de reabilitação sujeito a distúrbios externos que possivelmente ocorrem devido à interação humano-robô. O controlador (PID) também é ajustado para examinar o desempenho do Robô. [8]



Figura 12 – Robô paralelo de reabilitação de tornozelo desenvolvido (a:plataforma de conexão de tornozelo; b:sensores de força; c:plataforma móvel; d:suporte central; e:atuadores lineares; f:plataforma de base).[8]

A eficácia do esquema de controle de resistência é observado nos resultados experimentais. Além disso, o resultados experimentais demonstram que o o controle de lógica fuzzy otimizado melhora significativamente o desempenho do rastreamento do robô de reabilitação do tornozelo. Também diminui os erros de rastreamento em estado estacionário cerca de 50% em comparação com o Controlador PID otimizado. O controle de lógica fuzzy tem desempenho aproximadamente 50% melhor que o controlador PID. [8]

A vantagem de usar a proposta esquema de controle de admitância adaptativo em vez de uma admissão estática esquema de controle é que ele ajuda os pacientes quando

a força aplicada não é suficiente para mover a plataforma ou resiste adequadamente aos pacientes quando eles são bem fortes. Este Robô está ilustrado na Figura 12.

No projeto de Ayas, um modo passivo de exercício foi implementado para mostrar desempenhos do controlador PID. Foi inferido a partir de os resultados de rastreamento que o controlador de lógica fuzzy é melhor do que o controlador PID em termos de atenuação da perturbação externa e desempenho de rastreamento. Os resultados de desempenho dos controladores obtidos pode ser verificados no próprio documento do projeto. Ayas concluiu que a lógica fuzzy pode renderizar adaptação de admitância, e que o controlador de lógica fuzzy é melhor sobre o controlador PID em rastreamento de trajetória sob perturbações, ambos parâmetros subjacentes otimização.[8]

O artigo [9], apresenta uma síntese de um manipulador paralelo esférico para um ombro de um braço humano protético de sete graus de liberdade, Figura 13. No artigo, é determinado três objetivos de projeto, ou seja, o espaço de trabalho, a destreza e os torques dos atuadores. O manipulador paralelo é modelado considerando 13 parâmetros de projeto em um procedimento de otimização. Devido à não linearidade do problema de projeto, algoritmos genéticos são implementados.[9]

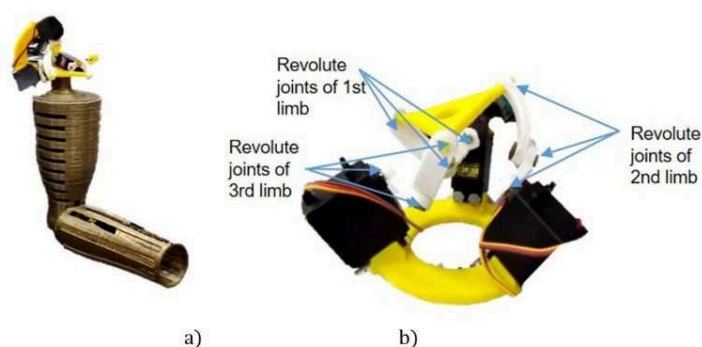


Figura 13 – Protótipo impresso em 3D: a) um braço humano protético; b) mecanismo de ombro.[9]

Uma otimização multi-objetivo é usada para projetar o manipulador. A partir dos resultados, o artigo evidencia que a otimização dos três objetivos precisa ser realizada de forma simultânea, pois são dependentes entre si e uma melhoria em uma característica poderia resultar em uma repercussão indesejada dos demais. Os resultados mostram também que um desempenho adequado do manipulador é alcançado.[9]

Para finalizar este tópico, a tendência do uso de robôs paralelos é estudado no artigo [29]. O artigo aborda a evolução da robótica para as tarefas de reabilitação. A importância das lesões no tornozelo e o adequado procedimento de reabilitação passiva ou ativa também é destacado. Os dispositivos de reabilitação do tornozelo revisados. Também

incluem aqueles já comercialmente disponíveis e aqueles em estágio de desenvolvimento em laboratórios e centros de pesquisa. No final do artigo há uma proposta sobre o desenvolvimento de um dispositivo mecatrônico, de média complexidade, para a reabilitação do tornozelo, voltado para a reabilitação ativa com algumas particularidades.[29]

Conclui-se etão que o modo ativo é desejável, pois inclui o fortalecimento dos tendões e músculos do tornozelo, permitindo a recuperação do estado pré-lesão. É comum que os centros do setor de saúde tenham algumas limitações que impedem o atendimento adequado aos pacientes em geral e, em particular, àqueles que necessitam de reabilitação com terapia do tornozelo, daí a conveniência de desenvolver dispositivos para reabilitação. Sua conclusão é que, atualmente, existem vários dispositivos no mercado que ajudam a reabilitar o tornozelo. Recentemente, tem havido um grande interesse em alguns centros de pesquisa em todo o mundo para propor e desenvolver sistemas automatizados de reabilitação do tornozelo. Um aspecto muito importante é a incorporação da função para fortalecer os músculos e tendões do tornozelo através da reabilitação ativa; os dispositivos propostos variam de um a seis graus de liberdade.[29]

3 Proposta do Projeto para o comando e controle de um robô para fisioterapia do tornozelo ROPERT

O projeto para comando e controle de um robô paralelo esférico para reabilitação do tornozelo, ROPERT, é projetado seguindo a Metodologia de Desenvolvimento de Produto (PRODIP) [10].

Este robô visa executar e controlar exercícios terapêuticos que permitirão imitar o gesto ou o movimento específico de um fisioterapeuta. Isso, mediante um controle "*Master-slave*", onde o mecanismo paralelo replica o movimento executado uma vez pelo fisioterapeuta. Desse modo o robô repete o movimento quantas vezes seja necessário atingindo protocolo de reabilitação indicado.

Este projeto ainda não é um produto para ser colocado no mercado, mas sim é um protótipo intermediário para um futuro produto que será usado por fisioterapeutas.

Vistos os problemas como também a arquitetura dos atuais robôs para reabilitação do tornozelo, se propõe o presente projeto que visa aperfeiçoar as deficiências dos sistemas atuais.

Neste Capítulo será explicada brevemente a sequência de passos que compõem a metodologia PRODIP. Na sequência é realizada a implementação dessa metodologia para o desenvolvimento do ROPERT.

3.1 Breve descrição da Metodologia de Processo de Desenvolvimento de Produto PRODIP

Na sequência é explicada brevemente a metodologia de projeto PRODIP pela qual se obteve a concepção do robô. A estrutura básica do Processo de Desenvolvimento de Produtos também esta descrita em [1], como se apresenta na Figura 14.



Figura 14 – Macrofases e fases de processo de desenvolvimento de produtos, adaptado de [10]

3.1.0.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

Macrofase de Planejamento: É onde se gera a ideia de produto. Aqui é definido o problema, a pesquisa, os objetivos e restrições.

3.1.0.2 PROJETO INFORMACIONAL

Macrofase de processo de projeto: É a primeira fase da macrofase do Processo de Projeto, composta por quatro partes: Necessidades do Usuário, Requisitos de Usuário, Requisitos de Projeto e Especificações de Projeto. A definição de cada uma destas atividades vem na continuação:

- a) Necessidades do Usuário: Definida como a primeira atividade propriamente dita do processo de projeto de produto e também a mais crítica de todo o processo, pois aqui se faz uma síntese e descrição das necessidades que são as anseias do consumidor ou usuário. As demais atividades e decisões no processo de desenvolvimento de produtos, são decorrências (ver Figura 15), assim, as Necessidades de Usuário é a palavra ou frase que o consumidor precisa, sua vontade, desejos e expectativas, expressadas numa linguagem natural e livre de qualquer padronização de termos e classificação.
- b) Requisitos de Usuário: Para que as Necessidades do Usuário sejam facilmente compreendidas, são agrupadas e classificadas numa linguagem técnico apropriado para expressar atributos de qualidade do produto, que são denominados Requisitos de Usuário. Os Requisitos de Usuário são geralmente expressados na forma qualitativa

[1], como por exemplo: “seguro”, “atraente”, “de fácil manutenção e baixo custo”.

No presente trabalho são desenvolvidos diretamente os Requisitos de Usuário (que é a agrupação e classificação numa linguagem técnica das Necessidades de Usuário).

- c) Requisitos de Projeto: Quando os Requisitos de Usuário são transformados e desdobrados e aos mesmos são atribuídas dimensões, o resultado dessa conversão é chamado de Requisitos de Projeto. Aqui são realizadas diversas tarefas que buscam a definição dos fatores de influência no projeto de produto. Os Requisitos de Projeto de produto são definidos considerando diferentes atributos, como: funcionalidade, ergonomia, segurança, confiabilidade e modularidade, entre outros. Na Tabela 3 apresenta-se uma lista de atributos típicos para sistemas técnicos. O Requisito de Projeto de Produto é uma qualidade, um atributo com grandeza definida do produto, por exemplo, os Requisitos dos Usuários por fácil manutenção pode ser convertido nos seguintes Requisitos de Projeto: tempo médio (horas) de manutenção preventiva e custo (R\$) de manutenção corretiva.[1]

- d) Especificações de Projeto: O conjunto de atributos passíveis de medição, com os modos e as grandezas para avaliação de conformidade estabelecidas, e adicionadas com as Prioridade de Atendimento, denominar-se-á Especificações de Projeto de produto. A atividade de elaboração das Especificações de Projeto é o principal resultado da fase de Projeto Informacional, pois além de proporcionar o entendimento e a descrição do problema na forma funcional, qualitativa e quantitativa, formaliza a tarefa de projeto, fornece a base sobre a qual serão montados critérios de avaliação e de todas as tomadas de decisão realizadas nas etapas posteriores do projeto.

Classes de Atributos	Atributos	Comentários
Atributos Básicos	Funcionalidade	Funções, operações, desempenho, eficiência.
	Ergonomia	Ergonomia de uso.
	Esteticidade	Aparência, estilo, cores.
	Segurança	Princípios de seguranças, proteção, atos inseguros.
	Confiabilidade	Taxa de falhas, redundâncias.
	Legalidade	Atendimento as leis de segurança, comércio.
	Patenteabilidade	Inovação passível de privilégio.
	Normalização	Atendimento as normas internas, de transforma e de comércio.
	Robustez	Poucos sensível a fatores do meio ambiente
Atributos do Ciclo de Vida	Impacto Ambiental	Atende as normas ambientais, poluição, conservação.
	Fabricabilidade	Fácil, precisa e de baixo custo.
	Montabilidade	Manutenção fácil e econômica.
	Embalabilidade	Embalagem fácil, compacta, econômica e segura.
	Transportabilidade	Adequado aos meios de transporte e manipulação.
	Armazenabilidade	Conservação, ambientes, manipulação.
	Vendabilidade	De fácil venda e exposição.
	Usabilidade	Fácil operação aprendido.
	Mantenabilidade	Manutenção fácil, rápida e segura.
Atributos Específicos	Reciclabilidade	Produto, componentes e resíduos recicláveis.
	Descartabilidade	Descarte sem contaminação ou dano ao ambiente.
	Geometria	Forma, arranjo, dimensão, espaço.
	Cinemática	Movimentos, direção, velocidade, aceleração.
	Forças	Direção, magnitude, frequência, rigidez, peso.
	Energia	Fontes, potência, rendimento, armazenamento.
	Materiais	Propriedades físicas e químicas, contaminações.
Sinais	Entrada, saída, forma, apresentação, controle.	
Automação	Manual, índice de automação.	
Tempo	Tempo de desenvolvimento.	

Tabela 3 – Atributos de produto típicos para sistemas técnicos. [1]

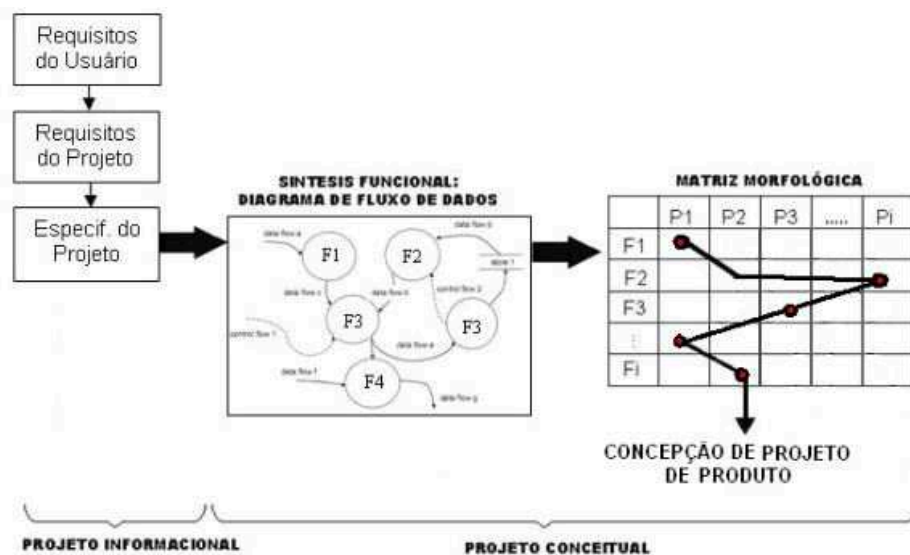


Figura 15 – Etapas do projeto informacional e do projeto conceitual.

3.1.1.0.3 PROJETO CONCEITUAL

Macrofase de Processo de Projeto: O resultado desta fase é a geração de opções e escolhas de projeto, desenvolvimento, aprimoramento e detalhamento. As principais atividades envolvidas no Projeto Conceitual são na sequência: Síntese Funcional, determinar

os Princípios de Solução e Matriz Morfológica. Daqui se obtém como resultado a concepção de um projeto de produto.

- a) Síntese Funcional (Fase de Projeto Conceitual): As Funções que o produto deve oferecer (e que se colocam na Matriz Morfológica) são obtidas mediante a Síntese Funcional ou com um método similar chamado Fluxograma de Dados. As funções que aparecem no Fluxograma de Dados são inspiradas na fase anterior de geração de Especificações de Projeto de produto, encontrada dentro da macrofase de Projeto Informacional como é apresentada na Figura 15.[1]
- b) Os Princípios de Solução são obtidos mediante métodos intuitivos de geração de Concepções de produto como brainstorming, método sintético (ou de analogias) e pesquisas de mercado. As funções que o produto deve oferecer são obtidas pela Síntese Funcional.
- c) Matriz Morfológica (Fase de Projeto Conceitual): A Concepção de Produto pode ser obtida mediante a Matriz Morfológica tendo presentes as combinações que se obtém com as Funções que o produto deve oferecer ($F_1, F_2, F_3, \dots, F_i$) e os Princípios de Solução ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$), como são apresentados na Figura 15.

3.1.0.4 PROJETO PRELIMINAR

Macrofase de Processo de Projeto: Se enfoca em modelar e simular o produto e na construção do protótipo segundo a concepção escolhida na etapa anterior do Projeto Conceitual.

3.2 Implementação da metodologia PRODIP para desenvolvimento do ROPERT

Para realizar o projeto de comando e controle, modelagem e desenvolvimento do protótipo do ROPERT, é aqui utilizado o processo de desenvolvimento de produtos PRODIP [10], desde a etapa do projeto informacional até a etapa do projeto preliminar. O presente trabalho não atinge a fase de projeto detalhado.

3.2.1 Projeto Informacional: Requisitos de Usuário

Para que o projeto atenda as especificações, é necessário entender qual tipo de lesão e quais movimentos ele deve realizar para atender a necessidade do fisioterapeuta e, conseqüentemente, do paciente. Felizmente já existem estudos nesta área dos quais serão extraídos os dados necessários, avaliados e utilizados nesta proposta.

A fisioterapia é responsável pelo tratamento de reabilitação motora do membro lesionado, atuando no controle da dor e do edema. Seu objetivo é também proporcionar função articular, para recuperação completa e adequada para o retorno precoce dos pacientes às atividades normais. O objetivo principal deste trabalho é propor a criação de um mecanismo paralelo para auxiliar a fase de fortalecimento muscular, que é de fundamental importância para a reabilitação das pessoas que possuem lesão no tornozelo. Indivíduos com deficiência na contração dos músculos podem ser susceptíveis a lesão por não terem habilidade muscular para dissipar forças de maneira coordenada.[11]

A lesão de entorse de tornozelo pode ocorrer uma distensão, ruptura parcial ou completa de um ou mais ligamentos articulares. E ainda pode vir acompanhada por alguma inflamação e edema.[11]

Existem três níveis de gravidade, dividida por graus. No caso, grau 1 seriam as lesões discretas ou leves. Chamado assim quando houver ruptura de apenas algumas fibras. Apesar de causar dores, não interfere nos movimentos do dia-a-dia da pessoa. O grau 2 é uma entorse moderada. Já neste caso, tem-se um número maior de fibras rompidas. Os movimentos já ficam comprometidos por conta do edema no membro lesionado. O pior caso seria o grau 3, considerado entorse grave. As fibras são rompidas na sua totalidade de um ou mais ligamentos com um grande edema. Por conta disso ocasiona a perda de sustentação do tornozelo (articulação bastante instável).[11]

A movimentação do tornozelo, dentro da fisioterapia, é baseada na articulação túbio-tarsiana, sendo esta a mais importante do conjunto de articulações do tornozelo, onde este conjunto apresenta três graus de liberdade, isto é, para um tornozelo saudável. A articulação túbio-tarsiana representa o eixo transversal e faz parte do plano frontal, podendo realizar os movimentos de flexão e extensão .

Os movimentos de abdução e adução, são os movimentos de rotação e movimentos longitudinais da perna estão contidos no plano vertical. O plano faz parte do eixo longitudinal do pé e condiciona a orientação da planta do pé permitindo-lhe o movimento para fora e para dentro, chamados de inversão e eversão. Esses movimentos estão ilustrados na figura 16.[11]



Figura 16 – Movimentos que podem ser realizados por um tornozelo saudável [11].

De acordo com [11], a reabilitação fisioterapêutica de tornozelos lesionados pode ser dividida em três etapas. O objetivo da primeira etapa é reduzir o edema, a dor e o agravamento da lesão, realizando modalidades como: crioterapia e eletroterapia. A segunda etapa consiste na restauração da mobilidade articular, no fortalecimento muscular e no treino proprioceptivo. Na terceira etapa são realizados treinos específicos com a finalidade de reabilitar o paciente às suas atividades diárias. Como citado anteriormente, este trabalho está concentrado no fortalecimento muscular do tornozelo lesionado, ou seja, na segunda etapa.

Durante a segunda etapa, quatro dos movimentos mostrados na Figura 1 deverão ser observados por serem importantes na fase de fortalecimento muscular do tornozelo. Tais movimentos são: Dorsiflexão, Plantiflexão, Inversão e Eversão. É importante ressaltar que no início da segunda etapa, o paciente deverá realizar a movimentação do membro lesionado de forma lenta e com baixas amplitudes. À medida que for percebida a melhora da lesão (através da diminuição da dor), a amplitude dos movimentos do tornozelo deverá aumentar de forma gradativa.

A Tabela 4 mostra a amplitude articular ideal que alguns autores (MARQUES, 2003; MAGEE, 2002; PALMER e EPLER, 2000) definem na literatura. Tais amplitudes são os movimentos que o paciente deverá apresentar, quando a lesão do tornozelo estiver praticamente cicatrizada. [11]

Movimentos	(MARQUES, 2003)	(MAGEE, 2002)	(PALMER,EPLER,2000)
Dorsiflexão	0° – 20°	0° – 20°	0° – 20°
Plantiflexão	0° – 40°	0° – 50°	0° – 40°
Inversão	0° – 45°	0° – 45/60°	0° – 30°
Erversão	0° – 20°	0° – 15/30°	0° – 25°

Tabela 4 – Amplitude articular ideal dos movimentos de um tornozelo saudável [11].

Esses movimentos serão os requisitos de projeto e serão levados em consideração na fase de projeto do mecanismo paralelo que auxiliará no fortalecimento muscular de pacientes com tornozelo lesionado. [11]

3.2.2 Projeto Informacional: Requisitos de projeto

Para os Requisitos de Projeto, é feito um desdobramento e uma classificação dos Requisitos dos Usuários, dando a estes dimensões, considerando diferentes atributos.

Na Figura 17, apresenta-se a ordem em que os Requisitos de Projeto serão classificados em sub-requisitos ou atributos, para depois buscar uma concepção e solução adequada. Na sequência desdobra-se cada tipo de requisito.

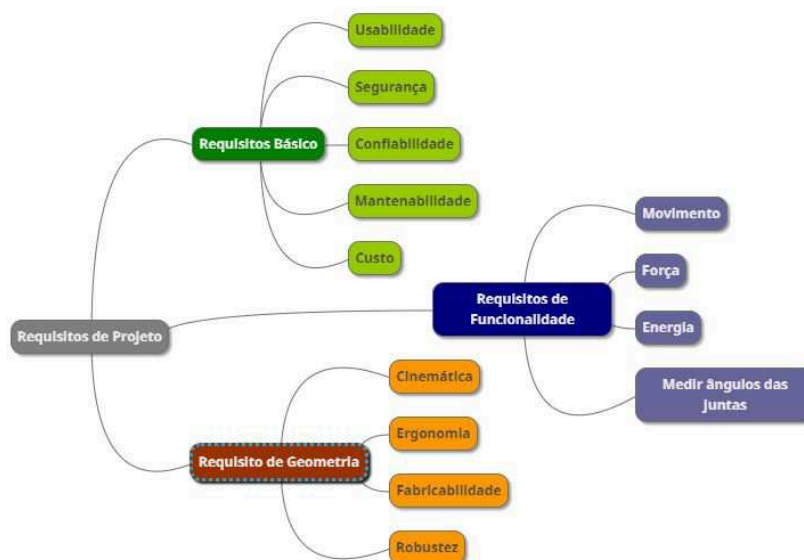


Figura 17 – Requisitos de Projeto.

a) Requisitos Básicos:

- **Usabilidade:** O Robô tem que ser de fácil utilização, possuindo um modo de operação intuitivo para que não seja necessário nenhum tipo de treinamento ao usuário final.
- **Segurança:** O robô, quando estiver em operação e sendo utilizado para o seu propósito, não pode apresentar nenhum tipo de risco para os utilizadores, seja ele o paciente ou o fisioterapeuta.
- **Confiabilidade:** É desejável que o Robô tenha uma baixa probabilidade de ocorrência de falhas. Uma vez que ele está sendo projetado para atender uma demanda de atividades contínuas e em contato direto com seres humanos.
- **Mantenabilidade:** O projeto tem que apresentar um dispositivo de fácil manutenção além de baixo custo de reposição de peças para que ele seja acessível.
- **Custo:** É desejável que este projeto seja de baixo custo, tanto para facilidade de prototipagem como acessibilidade comercial.

b) Requisitos de Funcionalidade:

- **Movimento:** O Robô deve apresentar os movimentos necessários para que consiga reproduzir as atividades determinadas pelo fisioterapeuta. Essas amplitudes angulares são apresentados na Tabela 4.
- **Força:** O Robô precisa ter força o suficiente para conseguir sustentar sua estrutura, realizar movimentos e mover determinadas cargas aplicadas a ele.
- **Energia:** Deve-se ter uma fonte de energia que seja segura e que garanta o funcionamento correto do Robô.
- **Medir ângulos das juntas:** O Robô precisa de sensores para medir os movimentos realizados como forma de "*feedback*" para o sistema.

c) Requisitos de Geometria:

- **Cinemática:** O mecanismo deve ser capaz de se colocar a plataforma móvel em ângulos específicos e trajetórias determinados pelo fisioterapeuta.
- **Ergonomia:** Deve-se ter ergonomia para que seja confortável e eficiente para os usuários finais, isto é os pacientes.
- **Fabricabilidade:** O sistema tem que ser modelável para que seja possível a sua implementação
- **Robustez:** O Robô tem que apresentar uma topologia que atenda todos os requisitos de usuário e de projeto. Também deve ser construído com um material que garanta sua robustez.

3.2.3 Projeto Informacional: Especificações de projeto

Requisitos Básicos	Usabilidade	Desejável
	Segurança	Obrigatório
	Confiabilidade	Obrigatório
	Mantenabilidade	Obrigatório
	Custo	menor que R\$500,00
Requisitos de Funcionalidade	Movimento	3DOF
	Força	pelo menos 3Kg
	Energia	Para o Circuito 3 - 5v Para os Motores 9 - 24V
	Medir	sensibilidade min. $5^\circ/pass$
Requisitos de Geometria	Angulo de Movimento	0 - 40°
	Ergonomia	Desejável
	Fabricabilidade	De fácil implementação.
	Robustez	Estrutura firme de topologia conhecida.

3.2.4 Projeto Conceitual: Síntese funcional

A Síntese Funcional é uma coleção de funções decorrentes das Especificações de Projeto. servem para indicar as funções que o projeto deve realizar e são satisfeitas por Princípios de solução que serão posteriormente propostos na Matriz Morfológica. Na sequência são indicadas cada uma das funções que deve cumprir o projeto:

F1 – Motorizar as juntas ativas;

Para motorização da junta ativa será escolhido motores elétricos rotacionais. Devido a simplicidade e a necessidade de baixo custo do projeto, soluções como acionamento hidráulicos e pneumáticos está fora de cogitação. Atuadores lineares também possuem um custo elevado e difícil aquisição no mercado. Motores elétricos rotacionais possuem uma ampla variedade no mercado, são de fácil aquisição e, na maioria dos casos, possuem um valor acessível.

F2 – Articular esfericamente as juntas passivas;

Para articular a junta esférica, é necessário um mecanismo que seja pequeno, porém seguro o bastante para manter a robustez do sistema. Esta junta deve ter pelo menos três graus de liberdade para que não mude as características mecânicas do robô. Como é uma junta de fixação, algum atrito não sera problema. Pela complexidade, será avaliado as juntas disponíveis no mercado, caso contrário, será levado em consideração a confecção desta junta.

F3 – Articular rotacionalmente as juntas passivas;

Esta segunda junta passiva deve ter um grau de liberdade em movimento rotacional de 180° em volta do eixo de fixação do mecanismo. Esta deve aguentar as cargas aplicadas sobre o robô e por este motivo deve ser feita em material rígido. Por se tratar de uma junta passiva, deve ter o mínimo de trato possível. Será avaliado as juntas disponíveis no mercado, caso contrário, será levado em consideração a confecção desta junta.

F4 – Controlar;

Será necessário um circuito controlador com um microprocessador que tenha interfaces digitais para comunicação com sensores e motores. Que aceita alguma linguagem de programação, que consiga salvar dados em sua memória e que tenha a capacidade de realizar operações. É desejável que se tenha protocolos de comunicação universais.

F5 – Robustez;

O corpo do Robô deve ser feito de material robusto, para a estrutura se manter firme, porém de baixo custo. É desejável que se tenha a menor flexibilidade possível para que se garanta uma melhor precisão mecânica. O material deve ser de fácil aquisição e não poder ser tóxico.

F6 – Programabilidade;

Deve-se utilizar uma linguagem de programação que aceite operadores lógicos, que seja de fácil implementação e leitura. Esta linguagem deve ter interface de comunicação com as I/O do circuito controlador. É desejável que seja de fácil modificação e que se tenha uma ampla interface amigável para o desenvolvedor.

F7 – Energizar;

A energização do sistema deve-se garantir um bom funcionamento do robô, assim como seu periféricos. Deve ser segura tanto para o usuário final como para a pessoa responsável pela implementação protótipo. Deve ser um fonte de baixo custo e fácil aquisição.

F8 – Comandar;

A interface homem-máquina (IHM) deve ser responsável por controlar as funções do robô. É desejável que ela seja intuitiva, para que não seja necessário nenhum tipo de treinamento ao usuário final. Deve ser ergonômica e resistente, pois será utilizado continuamente.

F9 – Comunicar;

A comunicação com a IHM tem que garantir a confiabilidade para que não haja falhas. Deve-se pensar no ambiente de trabalho do robô para que se faça a melhor escolha com o intuito de facilitar os utilizadores.

F10 – Medir ângulos;

Para se fazer um sistema de "*feedback*", é preciso de sensores para medir os ângulos dos motores e/ou a inclinação da mesa do atuador. Essa medição é importante para futura reprodução das ações do robô

F11 – Topologia;

A topologia do robô deve garantir que ele faça todos os movimentos desejados com os DOF necessários.

3.2.5 Projeto Conceitual: Matriz Morfológica

A Matriz Morfológica apresenta um arranjo de linhas e colunas, onde as colunas são as Funções (Fi) obtidas na Síntese Funcional, e as linhas correspondem aos Princípios de solução (Si). Vários Princípios de Solução podem satisfazer a uma Função. Neste Capítulo serão apresentados os Princípios de solução selecionados (dentro de várias opções disponíveis) para a construção do protótipo atendendo os requisitos de projeto e as funções que deve cumprir. De essa Matriz é obtida uma única Concepção de Projeto de Produto, que sintetiza o conjunto dos melhores Princípios de Solução escolhidos. A escolha da Concepção de Projeto de Produto está indicada pela seta vermelha (Figura 18) é justificada depois de proposta a Matriz Morfológica. As escolhas são pensadas para que atenda os requisitos do paciente já apresentados, que seja de possível implementação e que se assegure que o projeto vá funcionar da melhor maneira possível. Critérios de avaliação dos melhores Princípios de Solução são, por exemplo, facilidade de implementação, o preço e facilidades de compra dos componentes, etc. A Matriz morfológica (com seus Princípios de Solução e suas Funções) pode ser visualizada na figura 18.



Figura 18 – Matriz Morfológica para escolha da Concepção de Projeto de Produto. Si = Princípios de solução. Fi= Funções. A concepção de Projeto de Produto está indicada pelos Princípios de Solução selecionados pela seta vermelha

3.2.5.1 Justificativa dos princípios de solução da Concepção de Projeto de Produto ROPERT

a) Do tipo de motor:

O tipo de motor foi definido a partir do tipo de comportamento que o robô dever ter, além da acessibilidade ao tipo de motor. Outra consideração feita foi a facilidade de implementação. Para este projeto foi escolhido motores de passo Nema 17 de 3,5kgf, segunda sugestão (S2).

Para a primeira solução (S1), foi sugerido usar um servo motor MG996R TowerPro. Ele tem como vantagem ser um motor pequeno, muito rápido e forte. Todas as suas engrenagens são metálicas, possui faixa de rotação de 180 graus e seus conectores são compatíveis com diversos padrões. Possui também interface padrão de três fios (sinal PWM, Positivo e GND). O seu preço também é acessível. Ele seria um excelente motor para o projeto, inclusive de fácil implementação, porém não é possível ter um comportamento passível (permitir mover seu eixo com o mesmo desligado), pois uma vez desligado ele não permite força contrária, mantendo seu eixo firme. Outra desvantagem seria sua precisão. Este tipo de motor necessita de um caixa de redução interna, o que interfere na precisão dos graus.

Para resolver o problema de precisão e a falta do comportamento passivo do motor anterior, foi sugerido a segunda solução (S2). No caso, motores de passo Nema 17 de 3,5kgf. Um motor de passo pode ser uma boa escolha para este projeto, pois ele permite um movimento controlado. Estes tipos de motores podem ser utilizados onde é preciso controlar o ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. Seu movimento é devido a pulsos elétricos que são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste. A rotação de tais motores é diretamente relacionada aos impulsos elétricos que são recebidos, bem como a sequência a qual tais pulsos são aplicados reflete diretamente na direção a qual o motor gira. A velocidade que o rotor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos e o tamanho do ângulo rotacionado é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados.

Este tipo de motor também oferece um bom custo benefício quando se necessita de movimentação com precisão de posicionamento. Dada a sua robustez possui baixíssimo índice de manutenção. Otimizado para trabalhar com resoluções de micro-passo que garantem uma precisão maior ao sistema de movimentação. Para fazer a interface com o circuito controlado utilizados drives. Neste caso será utilizado um driver DRV8825 indicado para controle de motores de passo com regulagem de cor-

rente por trimpot. O módulo aceita alimentação entre 8.2 e 45V e pode fornecer até 1.5A por fase, suportando micro resolução até 1/32 passos. Possui proteção contra sobrecarga de corrente e temperatura. Esses fatores facilitam a implementação de um fonte externa. Em comparação ao servo motor (S1), é possível fazer movimentos passivos nos eixos (moto desligado), além disso, pode-se trabalhar facilmente com controle de posição sendo o motor de passo possui excelente precisão.

A terceira solução é o motor DC (S3). São motores rápidos e potentes. Para este tipo de motor, o controle de velocidade é facilitado, pois é proporcional a tensão aplicada. Estes motores são mais utilizados para movimentos contínuos rotacionais. O motor DC é alimentado por fontes de energia CC e pode ser do tipo motor elétrico DC escovado e motor elétrico DC sem escova. Em motores escovados, as escovas são usadas para manter a conectividade elétrica com o enrolamento do rotor e a comutação interna muda as polaridades do eletroímã para manter o movimento de rotação sustentado. Em motores de corrente contínua, os eletroímãs permanentes ou usados são usados como estatores. As bobinas do rotor estão todas conectadas em série, e cada junção é conectada a uma barra de comutação e cada bobina sob os polos contribui para a produção de torque. Por serem motores mais simples, não possuem drives nem circuitos para controle de posição. Para isso, seria necessário um estudo a parte para a implementação de um sistema de posicionamento e um circuito de controle do motor usando algum sensor para feedback. Mesmo com a implementação de um circuito para controle de posição, não se compara a precisão e facilidade dos motores de passo.

Essas dificuldades de implementação tornam a terceira solução (S3) inviável, além das dificuldades mencionadas da solução (S1), fazem com que a melhor escolha para este projeto seja a segunda solução (S2), motores de passo.

b) Da Articulação Esférica:

Para este tipo de juntas três possibilidades foram levantadas. Primeiramente a junta universal (S1) foi considerada, pois é robusta, é um item comum, com certa facilidade de se encontrar comercialmente, porém foi analisado que a junta universal iria limitar alguns movimentos, torando o comportamento do robô indesejável. A segunda solução (S2) é uma junta esférica de plástico. Este tipo de junta não fica muito bom se impresso em impressora 3D, devido a imprecisões e ranhuras natural da impressão 3D. Porém existe diversos modelos que se encontra no mercado, feito de plástico injetado, que apresentam um excelente tamanho e atendem muito bem

o requisito do projeto. A terceira solução (S3) são chamados de rótulas. Essas rótulas são rolamentos com movimentos em todas as direções. A rótula apresenta duas dificuldades, uma delas é o preço, por ser uma articulação incomum seu preço acaba sendo elevado. Outro problema é que a arquitetura, para se encaixar a rótula no projeto seria necessário alterações na arquitetura já previsto do robô para ser possível encaixar. Logo, a solução S2, da junta esférica de plástico foi a escolhida para atender este projeto.

c) Da Articulação Rotacional:

A escolha para este caso é mais simples. Uma vez que é necessário uma junta simples rotacional passiva. Por motivos orçamentários, a primeira solução (S1) foi fazer esta junta na modelagem do robô para ser impresso no mesmo material do corpo. Porém por se um junta pequena, delicada e que recebe forças perpendiculares, o plástico utilizado na construção do corpo não é uma boa escolha. Além disso, o plástico gera um atrito e imprecisões para este caso. A substituição mais óbvia para este caso é a segunda solução (S2), rolamentos. O uso de rolamentos garante resolver todos os problemas anteriores. Por ser de ferro, permite que se aplique forças em cima dele, é um mecanismo sem atrito e lubrificado que garante uma suavidade e facilidade de movimento. Também é uma solução barata uma vez que será utilizados somente três unidade de pequeno tamanho para o projeto. Outras soluções, como juntas rotacionais prontas (S3) foram descartadas, pois sua funcionalidades se assemelham muito com as dos rolamentos (S2), porém com o preço mais elevado. Por isso o uso dos rolamentos (S2) foi a solução mais óbvia.

d) Do Circuito Controlador:

Hoje em dias temos diversas opções de microcontroladores e sistemas computacionais embarcados. A primeira solução para o circuito controlador já seria a solução mais completa, a utilização de um sistema computacional embarcado, que no caso, seria um Raspberry Pi 3 Model B (S1). Esta placa facilitaria a implementação por não necessitar de um computador a parte para implementação e programação do robô. O Raspberry Pi 3 Model B tem processador quad-core Broadcom BCM2837 de 1,2 GHz (Cortex-A53), 1 GB de RAM, Bluetooth 4.1, Wi-Fi 802.11n, saída de vídeo HDMI, quatro portas USB 2.0, entrada para microSD e conexão Fast Ethernet, pesando 45 gramas e GPIO de 40 pinos. Ele pode rodar Raspbian, Ubuntu e outras distribuições Linux, além do Windows 10 IoT. Permite praticamente qualquer tipo

de linguagem de programação, além da possibilidade de instalar programas dedicados para aplicação. A sua grande desvantagem seria o preço, pois de todas as soluções dadas ele seria o mais caro. Porém o aluno já tem um Raspberry Pi 3 e justamente por isso foi a primeira solução.

Como segunda solução (S2) podemos colocar um Arduino Uno. Esta placa tem a facilidade de ter uma comunidade forte ativa na internet onde se pode encontrar muito material para pesquisa. Em seu microprocessador é um ATMEL ATMEGA328, um dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada e com encapsulamento DIP28. Ele conta com 32 KB de Flash (mas 512 Bytes são utilizados pro bootloader), 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM. Pode operar a até 20 MHz, porém na placa Arduino UNO opera em 16 MHz, valor do cristal externo que está conectado aos pinos 9 e 10 do microcontrolador. Possui 28 pinos, sendo que 23 desses podem ser utilizados como I/O .

Esse microcontrolador pode operar com tensões bem baixas, de até 1,8 V, mas nessa tensão apenas opera até 4MHz. Possui dois modos de consumo super baixos, o Power-down Mode e o Power-save Mode, para que o sistema possa poupar energia em situações de espera. Possui, como periféricos uma USART que funciona a até 250kbps, uma SPI, que vai a até 5MHz, e uma I2C que pode operar até 400kHz. Conta com um comparador analógico interno ao CI e diversos timers, além de 6 PWMs. A corrente máxima por pino é de 40mA, mas a soma da corrente de todo o CI não pode ultrapassar 200mA. Ele possui um oscilador interno de 32kHz que pode ser utilizado, por exemplo, em situações de baixo consumo. Uma outra vantagem no Arduino Uno seria seu preço. Com a popularização desta placa, sua acessibilidade se tornou muito fácil.

Como pode-se observar, este microprocessador está bem a baixo na primeira solução em questões de processamento, memória, comunicação I/O entre outras características de hardware que o deixam atrás. Além disso, para se fazer a comunicação com futuros dispositivos para manipulação do robô, é necessário a instalação de módulos. Outra desvantagem do Arduino é que sua linguagem é própria, aceitando somente alguns tipos de linguagens e poucas dessas linguagem tem bibliotecas matemáticas extensas o suficiente para se fazer os cálculos de cinemática do robô. E por fim, o Arduino ainda apresenta uma outra desvantagem em relação ao Raspberry, a necessidade de se utilizar um computador para se programar e auxiliar mudanças na programarão.

A terceira solução (S3) se trata do Arduino Mega, a grande diferença para o Arduino Uno é seu processamento e a quantidade de portas. Neste caso o Arduino Mega é baseado no microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos de entradas e saídas digitais onde 15 destes podem ser utilizados como saídas PWM. Possui 16 entradas analógicas, 4 portas de comunicação serial. Como a sua grande diferença para o Arduino Uno é somente a quantidade de portas e memória, as dificuldades do Uno ainda estão presentes no Mega, além de ser mais caro que o Uno, assim o Raspberry continua sendo a melhor solução. Como quarta solução (S4) podemos citar outras placas de prototipagem como a TI Tiva ou TI Stellaris que são equivalentes ao Uno. Existe também as Intel Galileo ou as alternativas ao Raspberry como o Orangi Pi e a Beaglebone. Porém para todas essas placas anteriores existem dificuldade de se encontrar material para estudo, a comunidade ainda é bem pequena, pois sua utilização não é tão popular, além dos preços altos e dificuldades de se encontrar no mercado. Por essas dificuldades, a escolha do sistema de controle para o projeto foi o Raspberry Pi 3 Model B, a primeira solução (S1).

e) Do Material do Robô:

O Robô deve ter uma material rígido, que aguarde pesos e forças que seus motores vão aplicar sobre ele. Para isto, foi pensado em 4 tipos de materiais como solução. A primeira solução seria fazer seu corpo de MDF (S1). MDF é a sigla de Medium Density Fiberboard, que significa placa de fibra de média densidade, e é um termo em inglês. MDF é uma sigla internacional e é um material oriundo da madeira, fabricado com resinas sintéticas. O MDF possui a vantagem de ser leve e relativamente barato. É vulnerável a umidade, porém sua aplicação não envolve este pré requisito. Infelizmente o MDF não apresenta uma boa plasticidade para confeccionar as peças do robô. No caso, seria necessário “esculpir” as peças na madeira o que se estenderia em um trabalho difícil sem a garantia de qualidade, isto é, as peças saírem como planejado.

Para a segunda solução foi pensado fazer o corpo do robô em acrílico (S2). Acrílico ou polimetil-metacrilato (PMMA) é um material termoplástico rígido, transparente e incolor; também pode ser considerado um dos polímeros (fibra sintética) mais modernos e com maior qualidade do mercado, por sua facilidade de adquirir formas, por sua leveza e alta resistência. É também chamado vidro acrílico ou simplesmente acrílico. Sua grande desvantagem seria o preço e a acessibilidade do serviço. Primeiramente para se confeccionar peças em acrílico teria que se encontrar locais especializados em confecção de peças injetadas, além disso, esse tipo de processo

é caro. A maioria dos lugares trabalha somente com corte a laser de chapas de acrílico, o que inviabiliza a construção das peças.

A terceira e quarta solução (S3) e (S4), fazem parte de manufaturas injetadas. Isto é, fazer o corpo do robô em uma impressora 3D. A única diferença entre as duas soluções é o tipo de material, sendo eles PLA ou ABS. O PLA (também chamado de PDLA, PLLA), ou melhor dizendo, políácido láctico, é um polímero sintético termoplástico que vem substituindo os plásticos convencionais em diversas aplicações. O PLA é vantajoso por ser mais resistente e se parecer mais com um plástico normal, além de ser 100% um plástico biodegradável (se dispuser de condições ideais). O Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) é um polímero amorfo produzido através de polimerização por emulsão ou massa do acrilonitrilo e estireno na presença de polibutadieno. As propriedades mais importantes do ABS são a resistência ao impacto e a rigidez. A produção de 1 kg de ABS requer o equivalente a cerca de 2 kg de petróleo para as matérias-primas e energia gasta na produção do plástico.

Como ambos os materiais são de fácil acesso, sem diferenças no preço a escolha do material foi o PLA (S3) por ser plástico 100% biodegradável e que, de acordo com os operadores do laboratório onde será feito a impressão, o PLA funciona melhor na impressora por ser mais maleável.

f) Da Linguagem de Programação:

A escolha da melhor solução da linguagem de programação está vinculada também a placa de prototipagem escolhida. Para a primeira solução (S1) foi sugerida a programação própria do Arduino, mas como o projeto com o uso de um Arduino foi descartada, pode-se também descartar este tipo de linguagem de programação. A segunda solução (S2) é o uso do Matlab. Aqui vale ressaltar que o Matlab será amplamente utilizado para resolução de problemas de cálculo das cinemáticas durante a modelagem do robô. Porém, a nível de código para ser embarcado no robô o Matlab não é a linguagem de programação ideal, pois ainda não tem uma comunicação satisfatória para isso. Apesar de suas comunicações serias com as placas de prototipagem, o uso do Matlab exigiria o uso de um computador para o controle do robô, por isso, o Matlab ainda será usado para auxílio de cálculos na modelagem, mas não será utilizado como linguagem embarcado no robô.

A terceira solução (S3) é a Programação Orientada a Objetos (POO) como o Java e o C++. Apesar desse tipo de linguagem ser de alto nível, é possível controlar diversos dispositivos com ela. A terceira solução (S3) deu a ideia para que uma outra POO fosse sugerida. Como quarta solução (S4) temos a linguagem de programação Python. Este tipo de linguagem de programação também é um POO, porém existe diversas vantagens de se utilizar ela. A primeira dela é a facilidade de código de fácil entendimento. Outra vantagem dela é boa compatibilidade com o Raspberry. E por último, podemos citar as bibliotecas matemáticas que são muito semelhantes ao Matlab, facilitando a resolução dos cálculos na fase de modelagem para o protótipo.

g) Da Alimentação de Energia:

Uma vez que a placa de prototipagem e os motores operam em tensões e correntes diferentes, uma sistema de alimentação deve ser pensado. A primeira solução (S1) foi o uso do Módulo Driver Ponte H - L298N. Esse módulo é de fácil acesso, barato e permite controlar motores até 2A, o que é o suficiente para este projeto. Como segunda solução um módulo X-NUCLEO-IHM03A1 é sugerido. É uma placa de expansão de driver de motor de passo de alta potência e já possui distribuição de força para os motores. Dificuldades para se encontrar este módulo no mercado brasileiro e o seu preço tornam essa solução automaticamente inviável. A terceira solução (S3) é implementar um circuito discreto usando eletrônica. Este solução, apesar de ser elegível, não compensa pelo tempo e material gasto para se implementar um fonte confiável que assegure os pré requisitos dos equipamentos, além do período de testes. Como este projeto o foco não é na eletrônica em si, esta solução foi descartada. A quarta e última solução (S4) é um Módulo Fonte De Alimentação 3.3v 5v para Protoboard. Este módulo apresenta uma máxima corrente de saída de 700 mA, e por conta disso esta solução não atende as configurações necessárias. Para alimentação, a primeira solução (S1) Módulo Driver Ponte H - L298N foi a que melhor apresentou características para se adequar ao projeto.

h) Da IHM:

Apesar da principal proposta ser o robô imitar o gestos do fisioterapeuta, uma interface deve ser implementada. A manipulação do robô é o meio onde o usuário final, isto é, o fisioterapeuta vai manipular o robô, antes de ensinar os movimentos que deve reproduzir. Para isso, deve ser fácil e intuitivo para que não aja a necessidade de softwares extras ou treinamento específico. Vale lembrar que a principal

manipulação do robô vai ser o modo "aprendizado" onde o robô vai reproduzir a movimentação que o próprio fisioterapeuta fizer. Porém sugere-se uma segunda forma de comandar o robô. Para isso, são apresentadas as 4 soluções a seguir. A primeira solução (S1) seriam computadores para se fazer o controle. Esta solução, apesar de facilitar muito a parte dos cálculos, inviabiliza a comercialização do projeto, primeiramente pelo usuário precisar ter um computador a disposição para isso. Além disso vai precisar a implementação de um software para se facilitar a utilização do robô. Por esses motivos esta solução foi descartada. Em vista dos problemas anteriores, a segunda solução (S2) seria um joystick de videogame, justamente visando a simplicidade de se controlar o robô. Não será necessário nenhum software adicional e muito menos de treinamentos para a utilização, uma vez que um controle de videogame tem sua utilização extramente intuitiva.

A terceira solução (S3) seria o uso de celular e tablets. Essa solução apresenta os mesmos problemas que a solução S1. Precisa de um software dedicado, além do próprio equipamento em si dedicado para aplicação. Então essa solução também foi descartada. A quarta e última solução (S4) é uma tela touch screen de 7" distribuída pela própria fabricante do Raspberry. Esta solução resolve o problema de ter o equipamento em si, sendo a tela fazendo parte do próprio robô. As duas desvantagens seria o custo adicional que este periférico resultaria e a implementação mais intuitiva dos controle na tela. Para este problema, a segunda solução (S2) foi escolhida pela simplicidade e facilidade tanto de implementação como para uso final do usuário. A solução S4 não foi totalmente descartada podendo essa ser implementada como auxílio da solução S2.

i) Da Comunicação com a IHM:

A comunicação com a IHM deve ser um solução pensando no usuário final, isto é, não pode apresentar dificuldades para o paciente e nem o fisioterapeuta. Por conta disso, as duas primeiras soluções, comunicação serial (USB) (S1) e cabeamento por fios e "jumpers" (S2) já são descartadas, pois o uso de cabos e fios poderia atrapalhar o uso final. Essas soluções são apresentadas, pois elas são as mais básicas a serem sugeridas e utilizadas e necessitariam de uma justificativa para o não uso. Uma vez que foi escolhido o Raspberry, ele já vem com uma comunicação Bluetooth e Wi-fi, facilitando a implementação de comunicações sem fios, sendo a bluetooth a terceira solução (S3) e o Wi-fi como quarta (S4) e última solução. Como o controle do robô foi escolhido o uso de um joystick de videogame, sendo está lá possuir comunicação bluetooth, a terceira solução (S3), comunicação bluetooth foi determinado pelo hardware definido nas seções anteriores, pela facilidade de implementação, já que

não necessitará de módulos adicionais e por ser sem fio, não atrapalhando pacientes e fisioterapeutas.

j) Sistema de "feedback":

Alguns sensores comercialmente acessíveis foram pensados para compor o "feedback" do sistema. Como primeira solução (S1) foi pensando no Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050, que pode ser instalado na mesa do robô para medir inclinações. Este módulo possui um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos totalmente funcionais. Com este sensor é possível desenvolver aplicações que necessitem de uma IMU com 6 DOF. A placa ainda possui um sensor de temperatura embutido, que permite leituras nominais de -40 a +85°C, que não terá nenhum tipo de aplicação para este projeto. A desvantagem deste tipo de sensor é que necessitaria de cálculos cinemáticos complexos para se determinar o posicionamento dos ângulos dos motores. Por conta desse problema, esta solução foi descartada.

A segunda solução (S2), são encoders rotativos industriais. São extremamente sensíveis, porém possuem um preço elevado inviabilizando a aquisição, logo, esta solução também foi descartada. A terceira solução (S3) é o encoder rotativo de prototipagem KY-040. Este encoder converte movimentos rotativos em impulsos elétricos de onda quadrada, gerando assim uma quantidade exata de impulsos por volta, que neste caso são 18° por pulso. Com estes impulsos é possível calcular o deslocamento, além de determinar posição e direção. Este encoder KY-040 Rotacional também possui um botão extra ao pressionar o eixo. As configurações são o suficiente para atender o projeto e o baixo custo deste sensor o tornam a melhor solução.

k) Topologia:

Existe três tipos de topologia como solução do problema. O primeiro (S1) é um robô paralelo Stewart. Este robô apresenta uma complexidade no qual não contribui para modelagem e implementação do robô pelo fato de se ter 6 pernas e 6 DOF, logo, possui 3DOF além do necessário. A carga e robustez necessária também não justifica o uso de um manipulador com essa quantidade de pernas, além do mais, encareceria o projeto, pois necessitaria de mais articulações, atuadores e materiais.

Como segunda solução (S2) tem a topologia proposta por [11]. Essa topologia encaixa muito bem para a proposta, pois possui o número de perna mínimo para a

robustez necessária, e possui junta rotacionais de atuação que são de fácil aquisição e custo. Esta topologia possui 3DOF que é a mesma necessária para os movimentos do tornozelo.

A terceira solução (S3), seria um robô paralelo esférico, porém com atuadores lineares. O problema desta terceira solução é justamente os atuadores lineares, pois eles são caros e de difícil aquisição, inviabilizando esta opção, apesar de possuir 3DOF. Neste caso então, a segunda solução (S2) é a melhor escolha.

Com essas informações culmina-se a etapa de Projeto Conceitual. Na sequência, o Capítulo V: "Resultados" corresponde à etapa de Projeto Preliminar. Ali serão realizadas as tarefas de Modelagem, Desenho Técnico e Planos de fabricação, Montagem do Protótipo e Algoritmos necessários para o controle e comando. O estudo de todas essas topologias encontram-se no apêndice do capítulo 7.

4 Resultados

Os resultados deste trabalho correspondem à etapa de Projeto Preliminar. A proposta deste projeto é a construção de um robô paralelo esférico. Seu espaço de trabalho, análise geométrica e suas cinemáticas foram abordadas no sub capítulo 7.1.1.3. Este projeto foi sugerido por [11], onde se encontra a síntese deste mecanismo.

A arquitetura do robô é inspirada no artigo [11] e constitui de três membros com três juntas, duas rotacionais e uma esférica, ou seja, RRS (Figura 19).

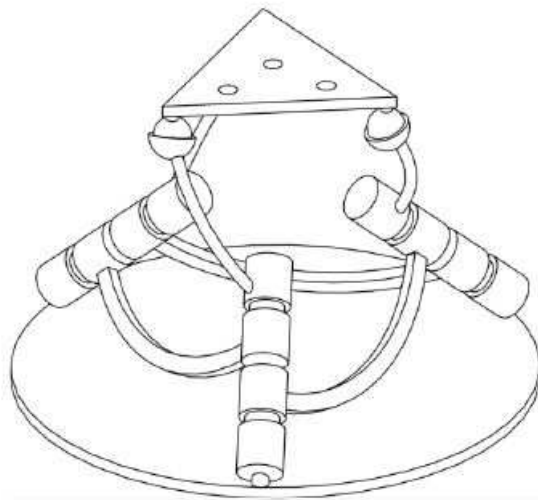


Figura 19 – Mecanismos paralelo montado com três pernas do tipo RRS. [11]

Esse mecanismo foi projetado para apresentar o movimento esférico em seu elo de saída.

4.0.1 Modelagem do sistema

A modelagem do sistema será dado de acordo com a figura 20.

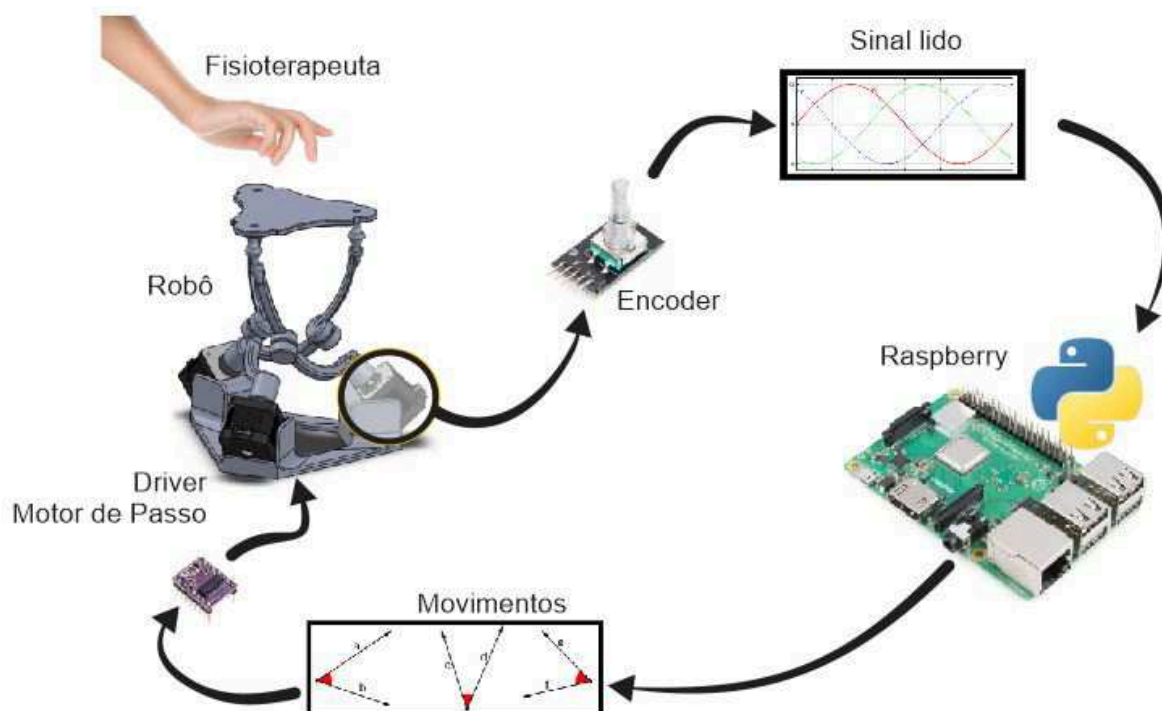


Figura 20 – Modelagem do Sistema: Diagrama de Fluxo de Sinais

O fisioterapeuta faz a movimentação desejada no manipulador. Os movimentos são captados pelo encoder acoplado ao lado de cada motor. O encoder envia o sinal captado para a placa de prototipagem, no caso, o Raspberry. O Raspberry é responsável pelo tratamento dos dados, convertendo o sinal recebido em valores de ângulos que serão utilizados pelos motores e salvar estes valores. Ele, Raspberry, também é responsável por criar uma lista de ações para que ao fazer a leitura dos dados salvos, execute na mesma ordem ou, se for necessário, em ordem inversa.

Os motores ficam desligados no processo de leitura dos encoders para que o fisioterapeuta possa executar os movimentos desejados sem resistência. Os motores são acionados somente quando é feita a reprodução dos movimentos enviados pelo Raspberry.

4.0.2 Desenho Técnico e Planos para Fabricação

O desenho das peças do protótipo foram feitas a partir da arquitetura do robô paralelos esféricos sugerido por [11], respeitando a síntese do mecanismo da figura 19. O tamanho foi determinado a partir da dimensão dos motores e as medidas de área de impressão da impressora 3D. Também foi considerado os requisitos de projeto, como ta-

Os desenhos da base e da mesa podem ser visto na Figura 22 e 23, respectivamente. As medidas da base foi determinado pelo tamanho dos motores escolhidos e tanto a base como a mesa foram limitadas pela área de impressão disponível.

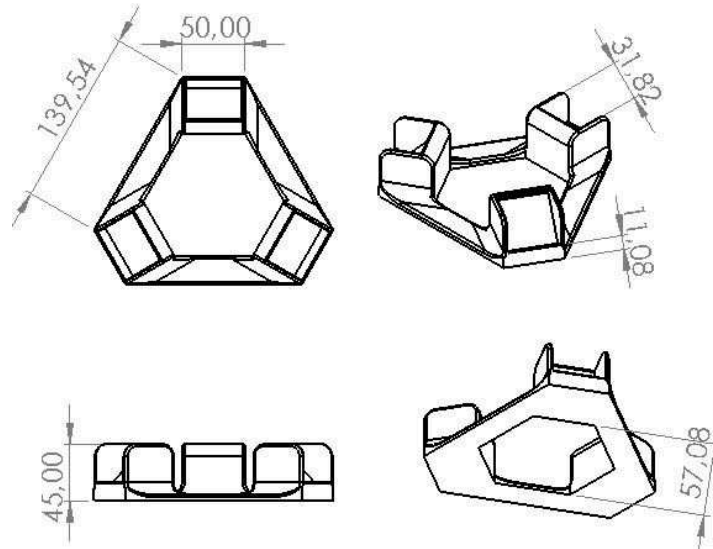


Figura 22 – Detalhamento dos base.

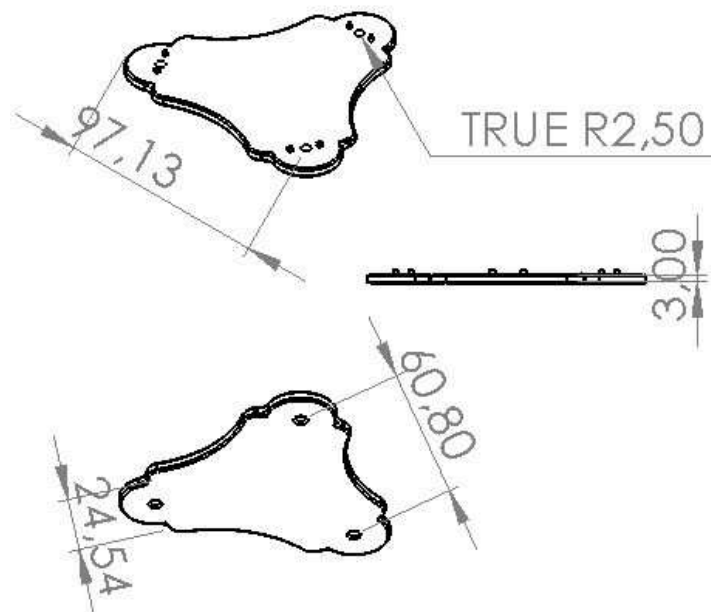


Figura 23 – Detalhamento da mesa.

Todas as peças, levando em consideração também as juntas esféricas adquiridas, estão mostradas na Figura 24.



Figura 24 – Peças desenhadas em CAD para impressão 3D

4.0.3 Montagem

A Montagem do protótipo, foi primeiramente simulada em ambiente virtual e pode ser vista completa na figura 27.

A partir da base, os motores são posicionados de acordo com o encaixe. Esse encaixe já garante que os motores fiquem inclinados como previsto no desenho inicial da síntese do mecanismo descrita em [11] (Figura 19). Nos eixos dos motores é encaixado o primeiro elo. Na ponta deste elo foi estipulado uma espaço para que se encaixe um rolamento. Os motores , com os dois elos e o rolamento constitui em uma perna (Figura 25).

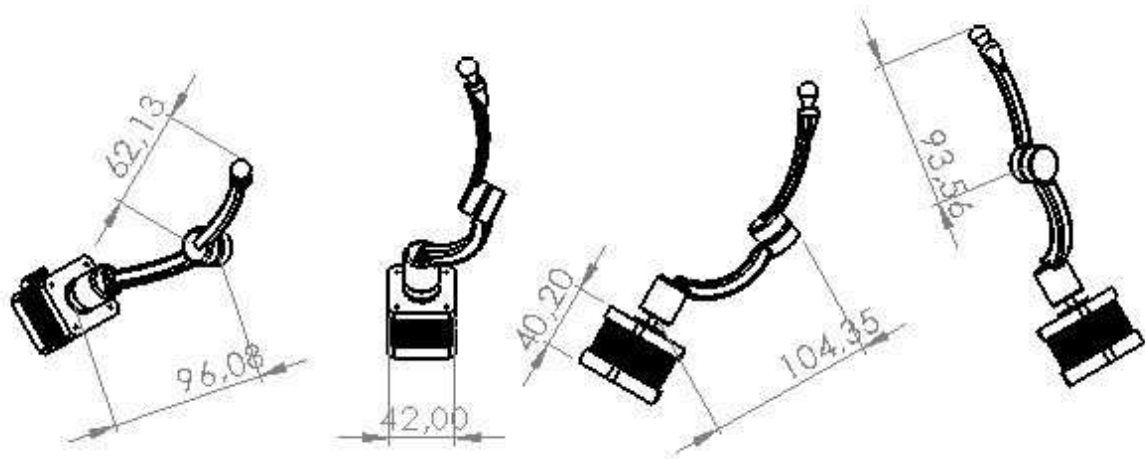


Figura 25 – Montagem de uma das pernas: elos entre si e um deles com o motor.

Após a aquisição e impressão de todas as peças, a montagem física do protótipo foi possível. Cada uma das pernas foi encaixadas nos espaços estipulados na base. A ultima parte é o encaixe da mesa nos elos esféricos. Esta montagem pode ser vista na Figura.

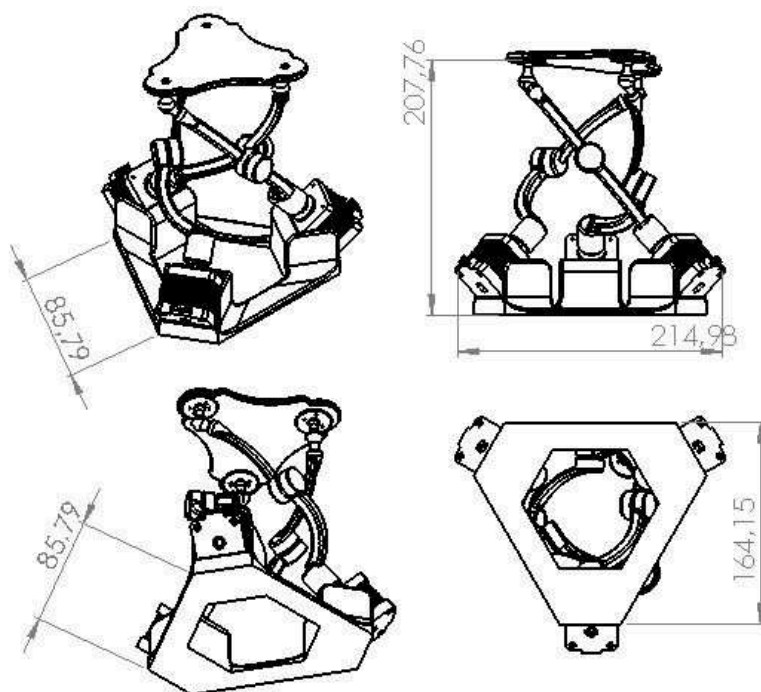


Figura 26 – Montagem Final, diversas vistas.

Um modelo 3D de melhor visualização pode ser visto na Figura 27.

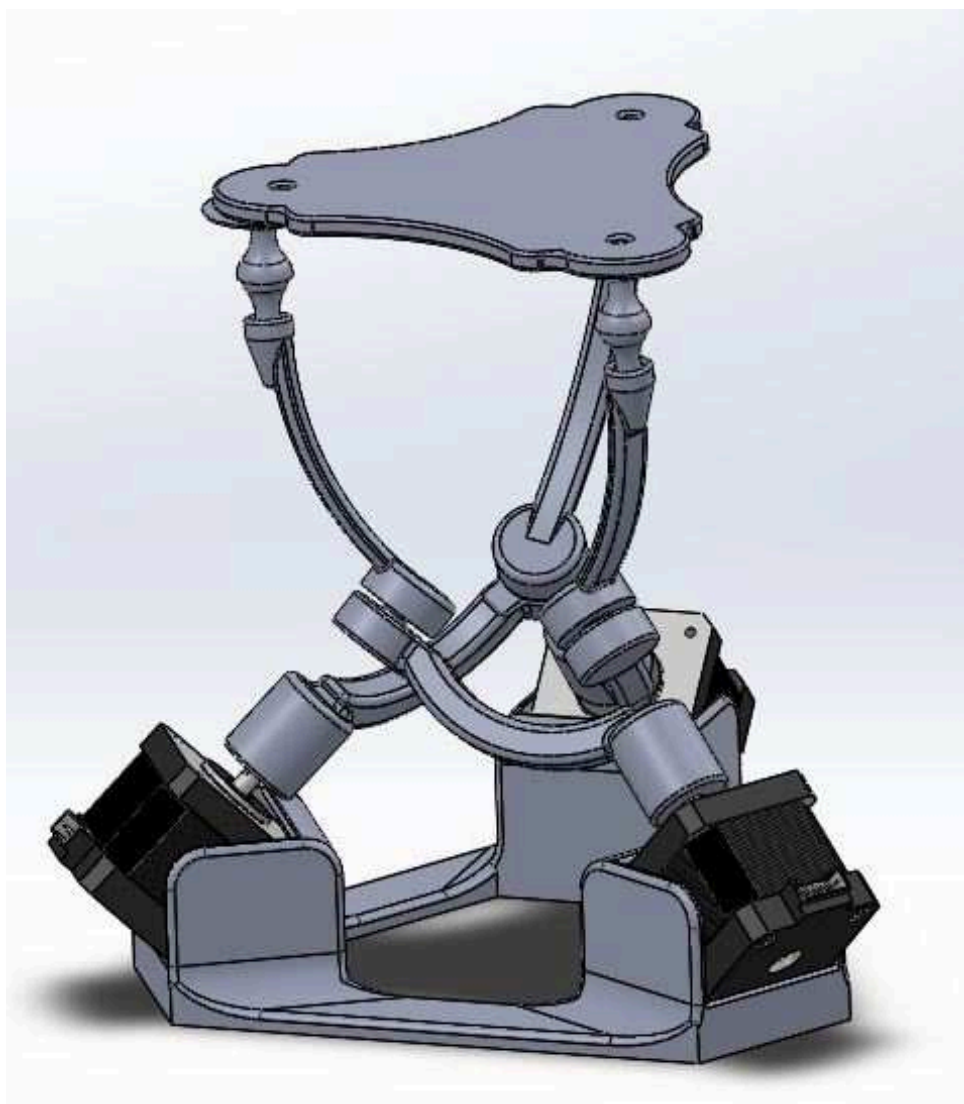


Figura 27 – Montagem do sistema em CAD

Após a impressão das peças a montagem da estrutura pode ser vista na Figura 28. Este é o resultado do modelo do mecanismo idealizado.



Figura 28 – Foto do protótipo ROPERT

Para o feedback de posição, encoders foram instalados paralelamente aos eixos de cada motor e fixados a partir de cantoneiras em "L" de plásticos. Elásticos foram utilizadas para sincronizar o movimento da perna do robô com o encoder como mostra a Figura 29.

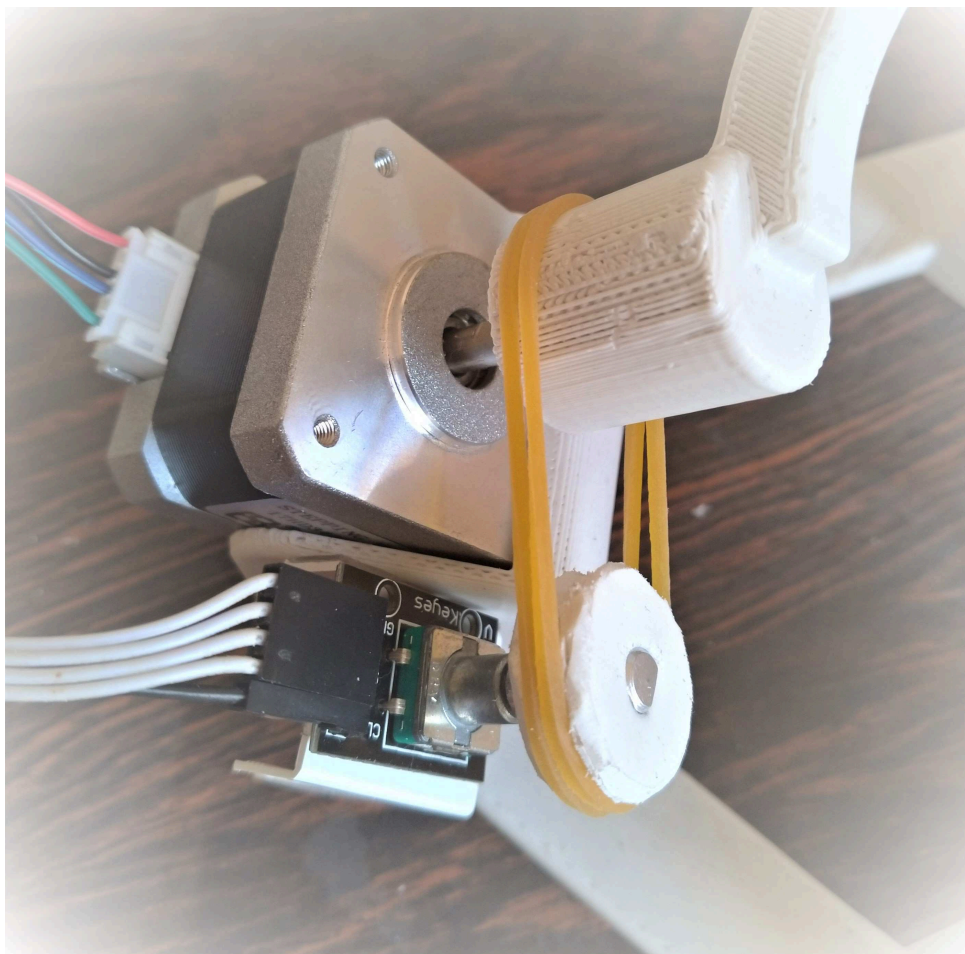


Figura 29 – Posicionamento do encoder no protótipo.

- Montagem dos Circuitos

Para melhor apresentar as ligações dos componentes ao circuito controlado, será levado em consideração apenas uma perna do robô, sendo essas ligações sendo equívale para cada uma das pernas, mudando somente as portas conectadas ao Raspberry. Para facilitar também, será dividido em duas partes, o circuito leitor dos dados, indicando as conexões do encoder no Raspberry e circuito de escrita, mostrando as conexões para o motor.

O pino SW é o pino do interruptor e fica *"high"* quando o codificador rotativo é pressionado. Apesar de conectado, este pino não será utilizado.

Os pinos CLK (relógio) e DT (dados) são responsáveis por lê a direção em que o codificador foi girado. O pino CLK fica em *"low"* quando o codificador é girado e o pino DT mostra que ele foi girado, logo ele fica em *"low"* no sentido horário e *"high"* no sentido anti-horário. Os pinos SW, CLK e DT devem ser conectados aos pinos GPIO, + e o GND devem ser conectados a um pino 3.3v e terra. Foi conectado o CLK ao GPIO 5, o DT ao

GPIO 6 e o SW ao GPIO 13.

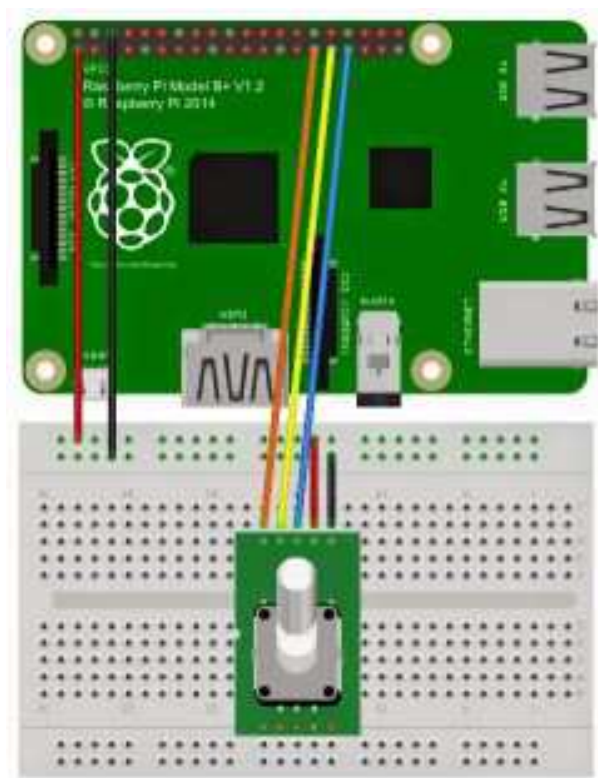


Figura 30 – Ligação Encoder

Os motores de passo são motores CC sem escova, cuja rotação é dividida em um número distinto de etapas, o que proporciona controle posicional e repetibilidade muito precisos.

NEMA 17 apenas se refere às dimensões do motor, sendo ele podendo ter torques distintos. Para este projeto está sendo usado três motores Nema 17 de torque 3,5 kgf.cm. Esta medida de força significa que o motor estacionário pode suportar um peso de 3,5 kgf em uma polia de raio de 1 centímetro. O torque de retenção presume que o motor não está girando. Quando um motor gira, seu torque é reduzido. Quanto mais rápida a rotação do motor, menos torque. O motor é bipolar porque tem 4 fios (2 para cada bobina). Os motores bipolares de passo são chamados de bipolares porque a corrente precisa alternar direções através das bobinas para mudar os polos magnéticos. Esta mudança de polaridade requer um circuito de condução mais complexo. No entanto, existem algumas soluções de baixo custo, como o driver de passo bipolar DRV-8825, que será usado neste projeto.

O driver pode controlar um único motor bipolar de passo de até 2,2 ampères e 45 volts. A saída de corrente máxima é ajustável, o que permite usar tensões acima da tensão no-

minal do motor de passo para obter taxas de passo mais altas. Existem 6 configurações para gerar sinais de degrau, isto é, desde o passo completo até o passo de 1/32. E ele também possui um regulador embutido de 3.3V que facilita a interface com o Raspberry Pi.

A conexão dos motores com o drive ao Raspberry pode ser visto na Figura 31. Para simplificar a explicação de montagem, será demonstrado somente a ligação de um dos motores, sendo os outros dois equivalente, alterando somente as portas de GPIO do Raspberry. A fiação mínima requer apenas pinos GPIO. Neste caso, o pino de passo conectado ao GPIO 21 e o DIR ou pino de direção está conectado ao GPIO 20. É possível usar qualquer pino GPIO, pois eles serão especificados no código, logo para os outros dois motores serão especificados outros pinos GPIOs. O pino de aterramento é conectado a um terra no Pi. Nenhuma fonte de tensão lógica é necessária porque o DRV8255 possui um regulador de tensão 3.3V integrado. No entanto, os pinos RST (reset) e SLP (sleep) precisam estar em *high*, por isso deve-se conectar no pino de 3.3V no Pi. O FLT ou o pino de falha opcional é deixado desconectado. Ele é usado para detectar eventos de sobrecorrente ou desligamento térmico. Para controlar o modo de passo de forma programática, M0, M1 e M2 são conectados a GPIO 14, GPIO 15 e GPIO 18, respectivamente, pois desejamos usar o modo de etapa completa.

O DRV8825 requer uma alimentação de energia do motor entre 8,2 e 45 volts. Como o Raspberry não fornece energia o suficiente, será utilizado um módulo Ponte H L298N, para fazer a distribuição, que suporta até 35v e 2A. O VMOT ou pino de tensão do motor é conectado ao terminal positivo da Ponte H. O pino de aterramento do motor está conectado ao terminal negativo da ponte H também.

O DRV8825 é suscetível a picos de tensão destrutivos. Para proteger a placa, é importante colocar um capacitor eletrolítico através da fonte de alimentação do motor o mais próximo possível do DRV8255. Para este caso, será usando um capacitor de $100\mu F$. Uma bobina do motor é conectada a A1 e A2 e a outra bobina é conectada a B1 e B2.

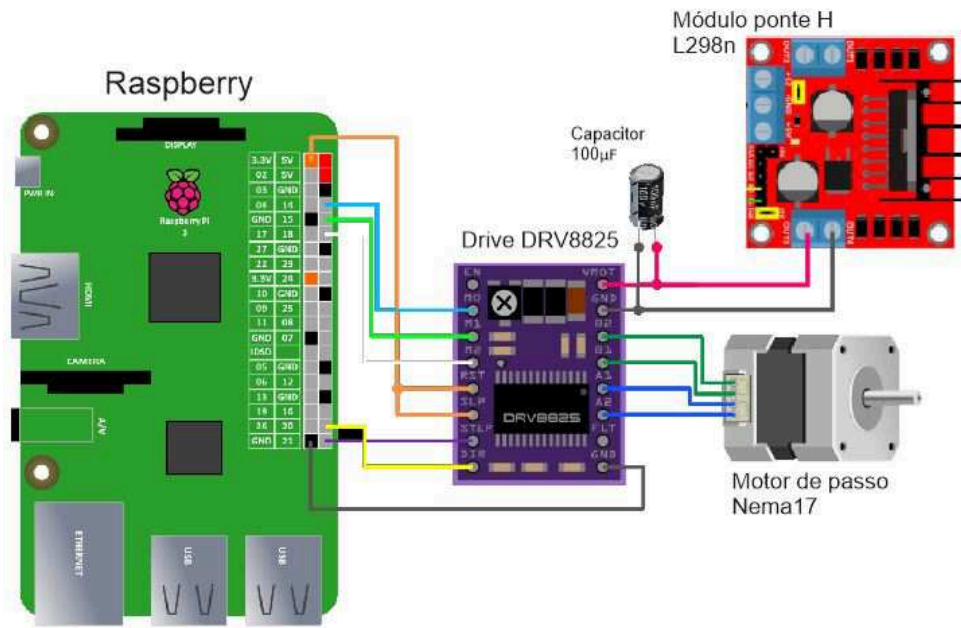


Figura 31 – Ligação do Motor de Passo

Ao final, o circuito completo para um dos motores pode ser visto na Figura 32. Para os outros dois motores segue a mesma lógica.

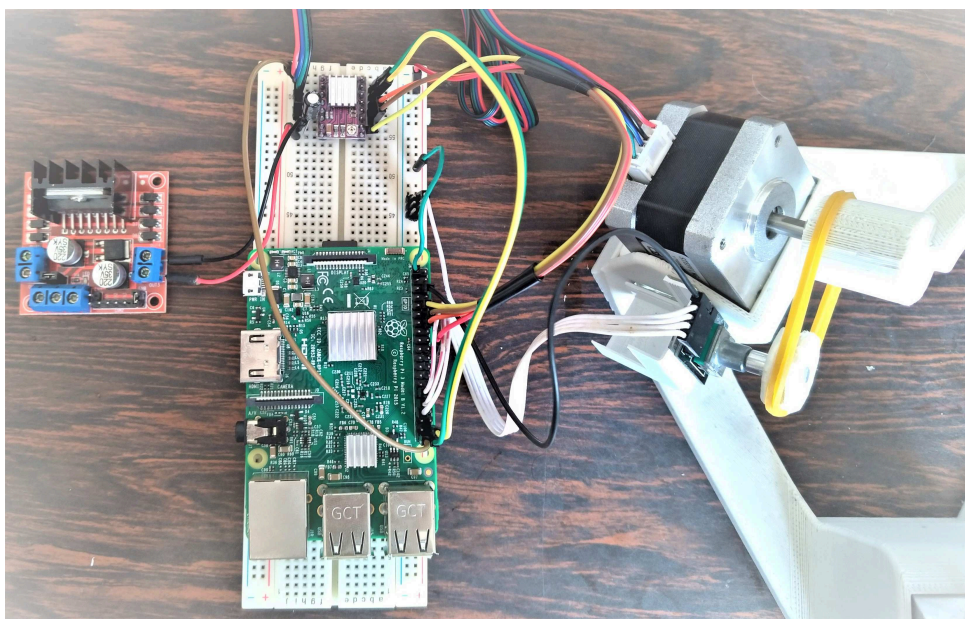


Figura 32 – Circuito completo para um motor

4.0.4 Algoritmos e programação

Na sequência será apresentado o fluxograma do algoritmo que realiza o comando e controle do ROBERT (Figura 33). Como sinal de entrada, o fisioterapeuta impõe a trajetória correspondente a um protocolo de reabilitação. Em um primeiro instante o sistema está no modo leitura, onde os motores estão desligados e os encoders ativos. Em um segundo momento, o sistema está em movimento ativo onde os motores são acionados seguindo o sinal de referência vindo pelos encoders. Então a plataforma móvel replica o movimento feito inicialmente pelo fisioterapeuta por um tempo determinado.

Em relação à transformação do sinal que vem dos encoders que chega até os motores, ocorre uma série de processos. O sinal que é captado pelo encoder é um sinal PWM que pode ser visto na Figura 33. O Raspberry recebe este sinal e traduz em valores de ângulos legíveis. O fisioterapeuta deve enviar um comando (no caso apertando um botão na IHM), para o sistema começar a gravar os valores lidos pelos encoders. A partir dessa gravação, é feita uma lista de valores de ângulos salvos em um arquivo .txt. Aqui termina o modo leitura do robô.

Um novo comando deve ser enviado pelo fisioterapeuta para que o sistema entenda que o modo ativo será acionado. O modo ativo vai ler o arquivo .txt salvo anteriormente e transformar estes dados em valores onde serão enviados aos drivers dos motores, onde os drivers vão garantir a movimentação dos motores reproduzindo o movimento inicial captado pelos encoders.

O código de programação feito em Python pode ser visto no apêndice, capítulo 7.

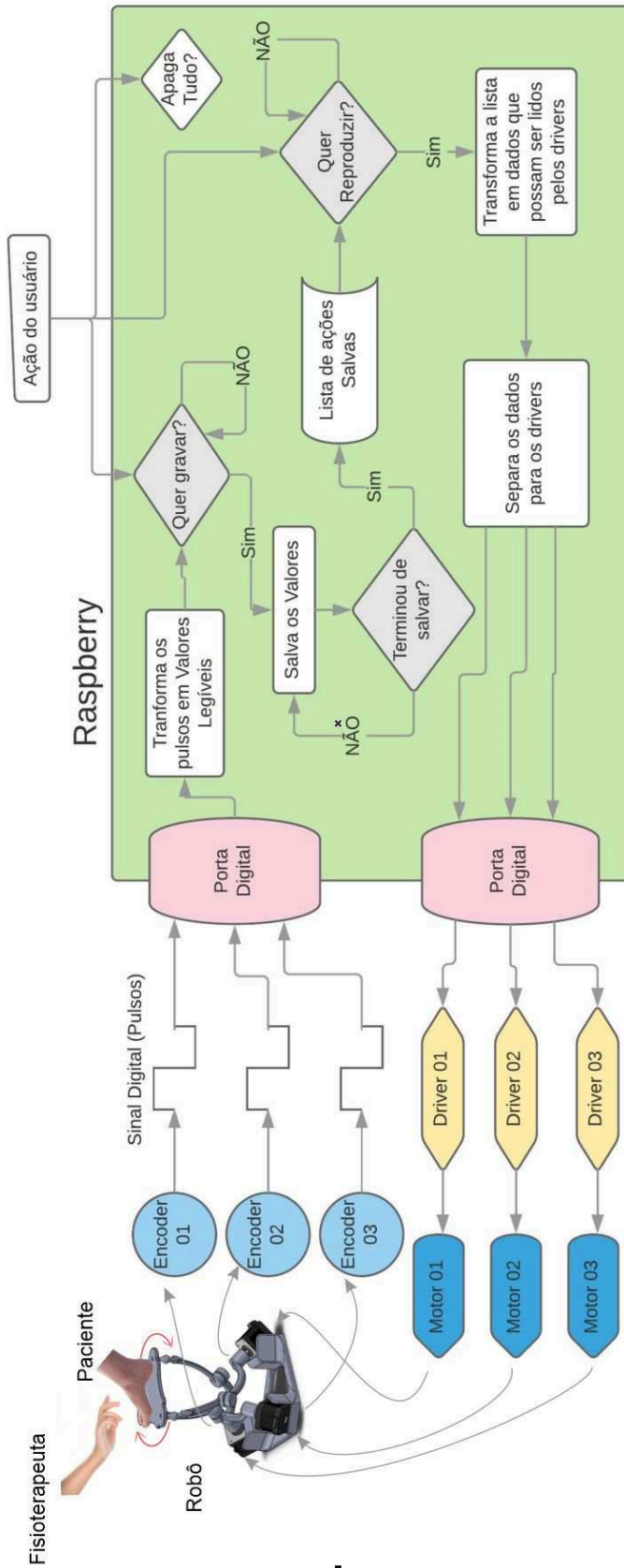


Figura 33 – Algoritmo

5 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido o projeto de comando e controle de um robô paralelo esférico para reabilitação do tornozelo, ROPERT. Com base nos resultados obtidos podemos indicar que o sistema proposto poderia auxiliar ao fisioterapeuta ou o profissional de saúde no tratamento da entorse do tornozelo.

Foi desenvolvido um protótipo funcional do robô paralelo e levantados os algoritmos de um sistema de comando "*Master-Slave*" que permitiria aplicação de fisioterapia. A metodologia PRODIP utilizada se apresentou como uma ferramenta útil para a obtenção de uma solução de projeto de robótica assistiva.

Esta proposta apresentou uma melhor topologia em relação aos exosqueletos e as estações de trabalho, por exemplo, pois não necessita de especialistas para instalação no ambiente de trabalho. A topologia também contribuiu no transporte do equipamento, uma vez que este apresenta um tamanho reduzido em comparação a "*Workstations*" grandes e pesadas. Pela simplicidade, ele também se mostrou ser de fácil manutenção por possuir certa simplicidade na sua construção.

A proposta também se mostrou melhor na usabilidade, pois tem uma IHM intuitiva e fácil de usar, além de não precisar de computadores, tablets e nenhum periférico extra. Outra vantagem em relação à maioria dos projetos levantados no estado da arte, é que este projeto não necessita de software específico, já que toda a programação vai embarcada no controle do robô.

Outro comparativo que poder ser feito é em relação à sua ergonomia. Alguns projetos necessitam aplicar uma série de "*plugs*" nos pacientes. Outros projetos já necessitam que o paciente vista ou entre no dispositivo. Nesta proposta, o robô se apresenta mais confortável para o paciente dispensando esses procedimentos inconvenientes.

O trabalho segue a proposta de ser de baixo custo para que seja acessível. Para este projeto foi gasto menos de R\$500,00 para construção do protótipo. Este trabalho é uma amostra da capacidade científica tecnológica nacional, portanto é um incentivo às tecnologias assistivas locais.

6 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se a implementação de outros modos de controle da plataforma paralela, por médio da cinemática inversa e o controle de força.

O trabalho tem muitas áreas que podem ser aprimoradas (controle, detecção de singularidades, projeto mecânico, cinemático, etc), abrindo opções para temas de pesquisa e realização artigos científicos.

Também é de interesse a implementação no Sistema Único de Saúde S.U.S. para aliviar os gargalos e déficits existentes, de maneira de ajudar aos profissionais da saúde.

7 Apêndice

7.1 Fundamentos Teóricos

Nesta seção será apresentado um breve resumo sobre os tipos de robôs paralelos existentes. Esta seção foi baseada, em sua grande parte, no capítulo 3 do livro *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* [13].

7.1.1 Robôs Paralelos

Nessa seção será abordado os manipuladores paralelos existentes e suas cinemáticas. São também conhecidos por mecanismos espaciais com vários graus de liberdade. De acordo com suas características de movimento, podem ser classificados como manipuladores planos, esféricos ou espaciais.

Um manipulador paralelo é definido como uma plataforma móvel que é conectada a uma base fixa por vários membros ou pernas. O grau de liberdade é dado pelo número de membro, onde cada membro possui, pelo menos, uma junta ativa. Os manipuladores paralelos tendem a ter uma grande capacidade de carga, isto é devido ao número de pernas que essas cargas podem ser distribuídas. Por conta disso, diversas aplicações são incentivadas a estes tipos de robôs. No caso, podemos citar simuladores de voo, como mostrado na figura 34, treliças articuladas ajustáveis, máquinas de mineração, máquinas de caminhar entre outras aplicações. [13]



Figura 34 – Simulador de Voo da Cia Aérea Azul, robô paralelo Stewart.[12]

Neste tipo de mecanismo a carga externa aplicada pode ser compartilhada pelos atuadores. O projeto de manipuladores paralelos pode ser datado de 1962, quando Gough e Whitehall criaram um sistema de seis pernas lineares para uso como uma máquina universal de testes de pneus. Stewart em 1965 projetou um manipulador de plataforma para uso como um simulador de aeronave em 1965. Hunt em 1983 fez um estudo da estrutura cinemática dos manipuladores paralelos [13].

A maioria dos manipuladores paralelos de 6 graus de liberdade estudados até o momento consistem em seis membros extensíveis. Esses manipuladores paralelos possuem as vantagens de alta rigidez, baixa inércia e grande capacidade de carga útil. No entanto, eles sofrem com um espaço de trabalho útil relativamente pequeno. Além disso, é muito difícil de obter sua cinemática direta. Existem poucos manipuladores paralelos de 6 DOF para os quais é conhecida a expressão algébrica que descreva sua cinemática direta. A mais comum é a plataforma de Stewart-Gough que hoje é conhecido como manipulador Stewart. Para esses manipuladores é geralmente necessário utilizar técnicas de otimização para encontrar para as soluções da cinemática direta. Raghavan [13] em 1993 aplicou o método de continuação, enquanto Innocenti e Parenti-Castelli [13] em meados de 1993, desenvolveram um exaustivo algoritmo de busca monodimensional para resolver a cinemática direta da plataforma geral de Stewart-Gough. Outras variações da plataforma Stewart-Gough também foram propostas na tentativa de superar as deficiências mencionadas anteriormente[13].

7.1.1.1 Estrutura dos Manipuladores paralelos

Seguindo uma classificação estrutural dos manipuladores paralelos, existem basicamente dois tipos: os simétricos e os assimétricos. Um manipulador paralelo é dito simétrico se satisfizer as seguintes condições:

- O número de membros é igual ao número de graus de liberdade da plataforma móvel.
- O tipo e o número de articulações em todos os membros estão dispostos em um padrão idêntico.
- O número e a localização das articulações acionadas em todos os membros são os mesmos.

Quando as condições acima não são satisfeitas, o manipulador é chamado de assimétrico [13].

Neste trabalho, será abordado somente alguns dos manipuladores simétricos. Observamos que em um manipulador simétrico o número de membros (m) é igual ao número de graus de liberdade (F) que também é igual ao número total de loops, $L + 1$, isso é:

$$m = F = L + 1 \quad (7.1)$$

Considerando que o conceito de conectividade (C_k) é definido como o número de variáveis independentes necessária para controlar um elo em relação a outro, serão definidas algumas relações úteis na descrição geométrica dos manipuladores paralelos.

A conectividade de um membro tem os graus de liberdade associados a cada articulação do membro f_i , assim:

$$\sum_m^{k=1} C_k = \sum_j^{i=1} f_i \quad (7.2)$$

onde j é o número de juntas de um mecanismo, C_k a conectividade e f_i a articulação. A conectividade do mecanismo é relacionada à mobilidade ou espaço de trabalho λ , pela equação 7.3:

$$\sum f_i = F + \lambda L \quad (7.3)$$

Substituindo 7.1 em 7.3 e substituindo na equação 7.2, obtemos:

$$\sum_m^{k=1} C_k = (\lambda + 1)F - \lambda \quad (7.4)$$

Onde a conectividade de cada membro deve menor ou igual do que espaço de trabalho e maior ou igual que os graus de liberdade da plataforma móvel, isto é:

$$\lambda \geq C_k \geq F \quad (7.5)$$

Equações 7.4 e 7.5 são usuais para enumeração e classificação de manipuladores paralelos.

Já a mobilidade de um mecanismo, é calculada como,

$$F = 3(n - 1) - 2f_1 - f_2 \quad (7.6)$$

onde, f_1 representa o número de pares cinemáticos que restringem dois graus de liberdade e f_2 denota o número de pares cinemáticos que restringem apenas um grau de liberdade para o movimento relativo plano entre as peças.

Dentro dos mecanismos de tipo paralelo existe uma subclassificação que consiste em: Manipuladores Paralelos Planares, esféricos e espaciais [13]. Na sequência é feita uma descrição de essa classificação.

7.1.1.2 Manipuladores Paralelos Planares

Para manipuladores paralelos planares de 3 graus de liberdade e três (k)- membros, temos o espaço de trabalho $\lambda = 3$ (translação em x, translação em y e rotação em z) e $m=F=3$. Substituindo na equação 7.4, obtemos:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 4F - 3 = 9 \quad (7.7)$$

Ao mesmo tempo, a equação 7.5 reduz para:

$$3 \geq Ck \geq 3 \quad (7.8)$$

Conseqüentemente a conectividade de cada membro deve ser igual a 3. Isso é, cada membro deve ter 3 graus de liberdade. Assumindo que cada membro consiste em dois elos e três juntas e que cada junta tem um grau de liberdade, podem ser utilizadas articulações rotacionais e prismáticas como o pares cinemáticos, e assim obter sete arranjos de membros possíveis: RRR, RRP, RPR, PRR, RPP, PRP e PPR. Além do mais, se limitarmos a manipuladores com estruturas de membros idênticas, apenas sete manipuladores paralelos planares são viáveis. A Figura 35 mostra um manipulador paralelo planar de 3 DOF usando a estrutura do membro 3RRR.

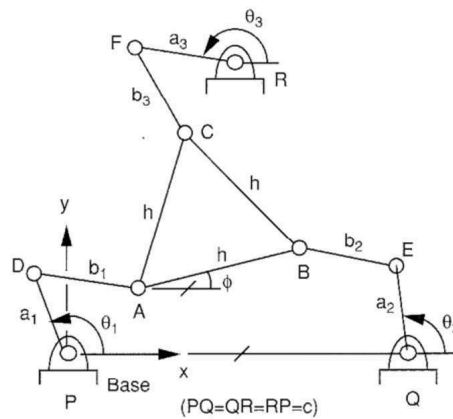


Figura 35 – Manipulador paralelo planar de 3 DOF.

A Figura 36 mostra um manipulador planar paralelo de 3 DOF usando a estrutura do membro 3PRP, onde os três eixos rotacionais são perpendiculares ao plano de movimento enquanto os eixos prismáticos da articulação estão no plano do movimento [13].

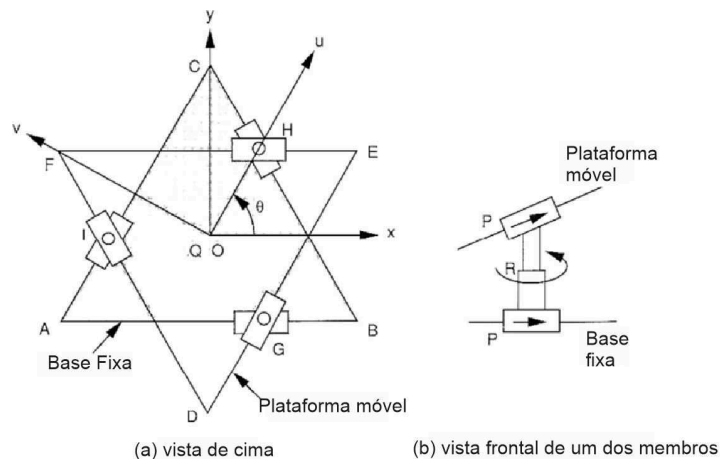


Figura 36 – Outra visão do manipulador paralelo planar de 3 DOF.

7.1.1.3 Manipuladores Esféricos Paralelos

Manipuladores Esféricos Paralelos consistem em uma plataforma móvel presa em uma base por três membros iguais, Figura 38. Cada membro possui 3 juntas, que no caso da Figura 38, tem a configuração RRR [13].

O espaço de trabalho para mecanismos esféricos também é igual a 3. Portanto, o requisito de conectividade para manipuladores paralelos esféricos é idêntico ao dos manipuladores paralelos planares. Para manipuladores de articulação esférica, todos os eixos da articulação devem se cruzar em um ponto comum chamado centro instantâneo de rotação. O manipulador mostrado na Figura 37 é um manipulador paralelo esférico de 3 DOF, 3 RRR.

Uma junta esférica pode ser instalada no centro de um manipulador paralelo esférico. No entanto, essa junta esférica só pode ser usada como uma junta passiva, uma vez que

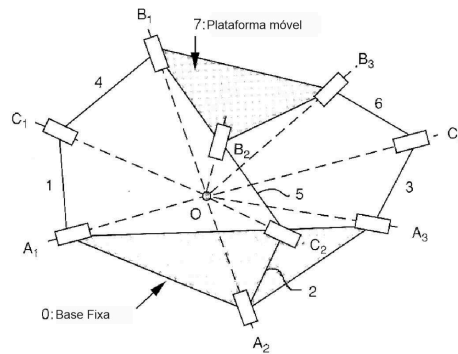


Figura 37 – manipulador Esférico Paralelo de 3 DOF [13].

não pode ser acionada por atuadores existentes. Portanto, se uma junta esférica for usada, três membros adicionais seriam necessários para a atuação paralela da plataforma móvel. Neste caso, os graus de liberdade do mecanismo esférico correspondem ao número de juntas ativas.

- ANÁLISE GEOMÉTRICO DE UM MANIPULADOR ESFÉRICO PARALELO COM JUNTAS DE REVOLUÇÃO

Um modelo de um manipulador esférico paralelo simétrico com juntas de revolução, proposto por [14], é mostrado na Figura 38.

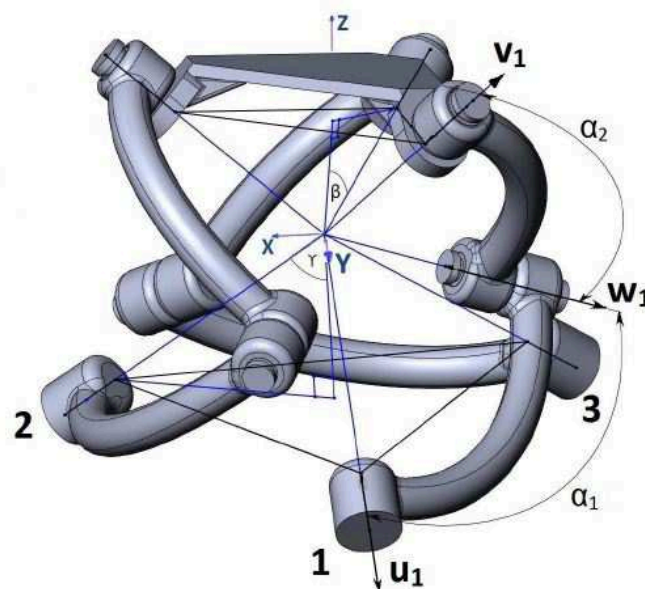


Figura 38 – Modelo cinemático de um manipulador paralelo esférico.[14]

Este tipo de robô consiste em duas plataformas triangulares, uma fixa e outra móvel, conectadas por três pernas igualmente espaçadas, numeradas por $i = 1, 2, 3$; cada uma tendo dois elos curvos. Os eixos de todas as articulações, cuja orientação é denotada por vetores unitários u_i , v_i e w_i se cruzam em um centro comum, que é chamado de

centro instantâneo de rotação. As amplitudes angulares dos elos medidos desde o centro de rotação são denominados α_1 e α_2 . Os ângulos β e γ definem a geometria das duas pirâmides regulares, a base e a plataforma móvel (Figura 38).

O movimento da plataforma móvel superior está confinado na superfície de uma esfera centrada no centro de rotação, por isso é denominada de manipulador esférico. O sistema ortogonal de coordenadas segue o sentido positivo para a regra da mão direita [14].

A origem localizada no centro de rotação do manipulador esférico paralelo também poder ser visto na Figura 38. O eixo fixo z é a normal para a base da e é direcionado para cima, enquanto o eixo fixo y está localizado no plano feito por z e u_1 . Os ângulos de entrada (nas juntas 1, 2 e 3) são θ_i , $i = 1, 2, 3$, e são medidos a partir do plano feito pelo eixo z e u_i para o plano de um link inferior. Os vetores unitários u_i , $i = 1, 2, 3$, para os eixos das juntas de base são definido como:

$$u_i = [\sin\eta_i \sin\gamma, \cos\eta_i \sin\gamma, -\cos\gamma]^T \quad (7.9)$$

onde η_i , $i = 1, 2, 3$, são os ângulos entre projeções de eixos das revoluções acionadas no plano de base e uma dada referência nesse plano.

$$\eta_i = 2(i - 1)\pi/3 \quad (7.10)$$

Componentes do vetor normal N para o topo móvel da plataforma, são definidas como somas dos componentes correspondentes de vetores v_i . Assim, o vetor unitário normal n é encontrado como:

$$n = N / \|N\| \quad (7.11)$$

Onde $N = [v_1x + v_2x + v_3x, v_1y + v_2y + v_3y, v_1z + v_2z + v_3z]^T$.

Se o topo móvel da plataforma é paralela à plataforma de base, consideramos então que o vetor unitário normal é $n = [0, 0, 1]^T$, [14].

- ANÁLISE DA CINEMÁTICA INVERSA DE UM MANIPULADOR ESFÉRICO PARALELO COM JUNTAS DE REVOLUÇÃO

Se a orientação da plataforma móvel do robô é conhecida, ou seja, vetores v_i são conhecidos, as soluções cinemáticas inversas podem ser definidas por três equações em função dos ângulos articulares:

$$A_i T_i^2 + 2B_i T_i + C_i = 0, i = 1, 2, 3, \quad (7.12)$$

com:

$$T_i = \tan(\theta_i/2); \quad (7.13)$$

$$A_i = (-s\eta_i s\gamma\alpha_i + s\eta_i c\gamma\alpha_i) \cdot -v_i x + (c\eta_i s\gamma\alpha_i - c\eta_i c\gamma\alpha_i) \cdot -v_i y + (c\gamma\alpha_i - s\gamma\alpha_i) \cdot -v_i z - \cos\alpha_2 \quad (7.14)$$

$$B_i = c\eta_i s\alpha_i \cdot -v_i x + s\eta_i s\alpha_i \cdot v_i y \quad (7.15)$$

$$C_i = (-s\eta_i s\gamma\alpha_i - s\eta_i c\gamma\alpha_i) \cdot -v_i x + (c\eta_i s\gamma\alpha_i + c\eta_i c\gamma\alpha_i) \cdot -v_i y + (-c\gamma\alpha_i + s\gamma\alpha_i) \cdot -v_i z - \cos\alpha_2 \quad (7.16)$$

onde $v_i x$, $v_i y$ e $v_i z$ são os componentes do vetor v_i . A equação 7.12 fornece duas soluções de ângulo θ_i para qualquer orientação da plataforma móvel. Consequentemente, existem oito soluções para a cinemática inversa [14].

7.1.1.4 Manipuladores Espaciais Paralelos

Substituindo $\lambda = 6$ na equação 7.4 e 7.5 para mecanismos espaciais, obtemos:

$$\sum_k^m Ck = 7F - 6 \quad (7.17)$$

e

$$6 \geq Ck \geq F \quad (7.18)$$

Resolvendo equações 7.17 e 7.18 simultaneamente para inteiros positivos de Ck , $k = 1, 2, 3, \dots$, pode-se classificar manipuladores paralelos espaciais de acordo com seus graus de liberdade. Isto é representado na lista de conectividade na Tabela 5.

DOF F	Número de Loops L	Soma de todas as f_i	Lista de conectividades $C_k, k = 1, 2, 3, \dots$
2	1	8	4,4 5,3 6,2
3	2	15	5,5,5 6,5,4 6,6,3
4	3	22	6,6,5,5 6,6,6,4
5	4	29	6,6,6,6,5
6	5	36	6,6,6,6,6,6

Tabela 5 – Classificação dos manipuladores paralelos. [13]

O número de elos incorporados em cada membro pode ser qualquer um, desde que a soma de todas as liberdades f_i comuns seja igual à conectividade requerida. O número máximo de links ocorre quando todas as juntas são juntas de 1 DOF. Na prática, é desejável empregar apenas dois links principais que conectam a plataforma móvel até a base por três juntas. A Figura 39 ilustra algumas dessas configurações de membros. A figura 39 a é um membro de 4 DOF. figura 39b até e são membros de 5 DOF, e figura 39 f-h são de 6 DOF. Note que cada um dos membros mostrados na figura 39 c, f, e h contém o grau passivo de liberdade, enquanto o mostrado na figura 39 g contém 2 graus passivos de liberdade. Se membros de estrutura cinemática idêntica forem desejados, as listagens de conectividade (4,4), (5,5,5) e (6,6,6,6,6,6) são os únicos arranjos de membros viáveis para os manipuladores paralelos de 2, 3 e 6 DOF [13]

7.1.1.5 Análise geométrica dos robôs paralelos: Diferenças entre o método de Denavit-Hartenberg e o Método Geométrico

Neste tópico será apresentado o método de análise da matriz de Denavit-Hartenberg e posteriormente o método geométrico para análises de robôs paralelos. É feito um breve comparativo entre os dois métodos.

Para facilitar a análise, um sistema de coordenadas cartesianas é definido em cada elo de acordo com a convenção Denavit-Hartenberg, como mostrado na Figura 40.

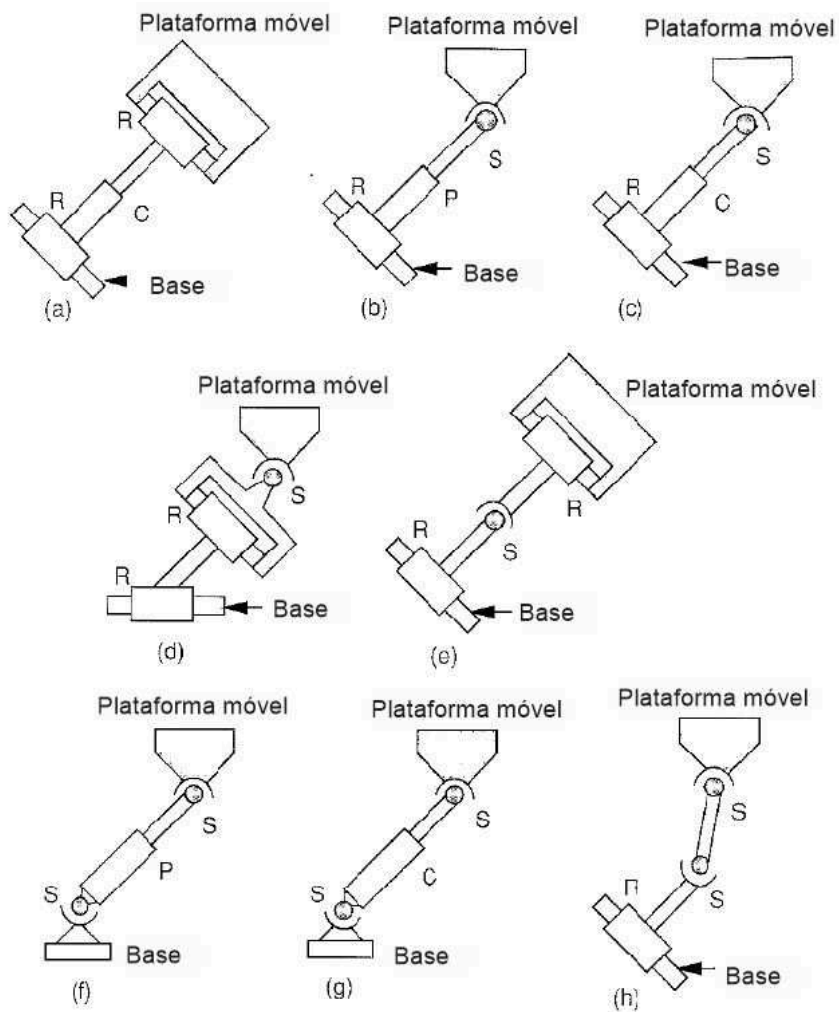


Figura 39 – As oito configurações possíveis do membro.[13]

Ao contrário dos manipuladores seriais que são modelados como uma cadeia cinemática aberta ou em malha aberta, os manipuladores paralelos são modelados com cadeias cinemáticas fechadas, ou seja, com circuitos fechados que nascem desde a origem dos eixos coordenados (plataforma fixa), seguem por cada uma das i -pernas até a origem da plataforma móvel e retornam ao mesmo ponto de origem. Em particular, o sistema de coordenadas do efetuador final (n -ésimo elo) coincide com o sistema de coordenadas de base (0 -ésimo elo), [13].

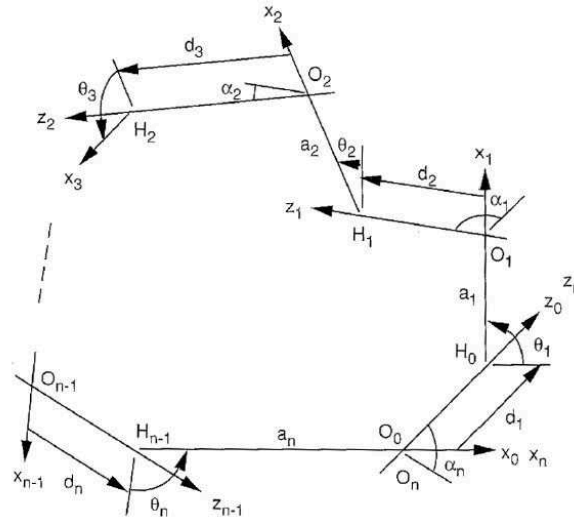


Figura 40 – Mecanismo de cadeia fechada para análise de D-H.[13]

Uma mudança de coordenadas entre o sistema de coordenadas i e o sistema de coordenadas $(i - 1)$ é dada na equação 7.19.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

Quando uma mudança de coordenadas é tomada em sequência, a modo de formar o laço fechado do loop, as matrizes correspondentes são multiplicadas. Essa transformação é uma transformação de identidade por causa do retorno ao sistema original:

$${}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdots {}^{n-2}A_{n-1} \cdot {}^{n-1}A_n = I \quad (7.20)$$

Onde I é uma matriz identidade 4×4 . Para um mecanismo de loop múltiplo, é formulado a equação de fechamento de loop, mostrado acima. Nota-se que uma junta universal pode ser modelada por duas juntas de revolução em interseção, e uma junta esférica pode ser modelada por três juntas resolutas em interseção. Embora o método Denavit-Hartenberg seja muito geral, o método é complicado pela existência de múltiplos loops fechados.

Para manipuladores paralelos, muitas vezes é mais conveniente empregar o método geométrico [13].

7.1.1.6 Análise de posição de um mecanismo de orientação espacial

Nesta seção, a cinemática de uma plataforma de orientação de 3DOF é estudada. Primeiro, descrevemos a estrutura cinemática do manipulador. Então a cinemática inversa e direta é resolvida de forma fechada. A Figura 41 mostra um manipulador paralelo espacial

que é composto por uma plataforma móvel, uma base fixa e três membros extensíveis. Tanto a plataforma móvel $OB_1B_2B_3$ como a base fixa $OA_1A_2A_3$ assumem a forma de um tetraedro. A plataforma móvel é conectada diretamente à base fixa por uma junta esférica no ponto O. Além disso, três membros extensíveis conectam a plataforma móvel nos pontos B_i à base fixa nos pontos A_i por juntas esféricas.

Cada membro consiste de um membro superior e um membro inferior conectados por uma articulação prismática. Parafusos de esferas ou macacos hidráulicos podem ser usados para variar os comprimentos das juntas prismáticas e, portanto, para controlar o movimento da plataforma móvel. No geral, existem oito links conectados juntos por sete juntas esféricas e três prismáticas. Notamos que este mecanismo não é um mecanismo esférico, porque os três membros e a plataforma móvel não têm um ponto estacionário comum. De fato, os membros superiores dos três membros não possuem movimentos esféricos. Aplicando a equação de Gruebler para verificar os DOF do robô de orientação especial, na equação 7.21.

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i \quad (7.21)$$

Substituindo $\lambda = 6$, $n=8$, $j=10$, e o f_i apropriado para cada junção na equação 7.21, temos:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i = 6(8 - 10 - 1) + (7 * 3 + 3) = 6 \quad (7.22)$$

No entanto, existe um grau passivo de liberdade associado a cada um dos três membros. Portanto, a plataforma móvel possui apenas 3 graus de liberdade. Embora o movimento de todo o mecanismo não seja esférico, a plataforma móvel possui um movimento esférico devido à existência de um ponto fixo O. Esse mecanismo pode ser usado como um dispositivo de orientação no qual a plataforma móvel é tratada como o elo de saída, e as três juntas prismáticas são empregadas como meio de entrada.[13]

A geometria deste tipo de manipulador, consiste em dois sistemas de coordenadas cartesianas A (x, y, z) e B (u, v, w) estão ligados à base fixa e plataforma móvel, respectivamente, como mostrado na Figura 41. Sem perder a generalidade, assumimos que a origem do quadro A está localizada no ponto fixo O, o eixo z aponta ao longo da direção de $O\bar{A}_1$, o eixo x encontra-se no plano de OA_1A_2 , e o eixo y é definido de acordo com a regra da mão direita. Similarmente, assumimos que a origem do quadro B está localizada no ponto fixo O, o eixo w aponta ao longo da direção de $O\bar{B}_1$, o eixo u está no plano OB_1B_2 , e o eixo v é definido de acordo para a regra da mão direita.

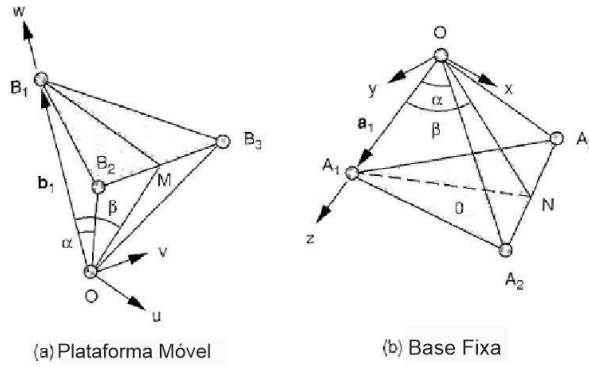


Figura 41 – Sistema de coordenadas da orientação do mecanismo.[13]

A transformação da estrutura móvel B para a estrutura fixa A pode ser descrita por uma matriz de rotação 3x3 definida pelos três ângulos seguintes de Euler. Suponha que a localização inicial da estrutura móvel B coincida com a estrutura fixa A e que a localização final seja obtida por uma rotação de ϕ sobre o eixo w, seguido por uma segunda rotação de θ sobre o eixo u deslocado, seguido por uma terceira rotação de ψ sobre o eixo w deslocado. Então a matriz de rotação resultante é dada por:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} c\phi c\psi - s\phi c\theta s\psi & -c\phi s\psi - s\phi c\theta c\psi & s\phi s\theta \\ s\phi c\psi - c\phi c\theta s\psi & -s\phi s\psi + s\phi c\theta c\psi & -c\phi s\theta \\ s\theta s\psi & s\theta c\psi & c\theta \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

O vetor de posição do ponto B_i em relação ao quadro em movimento B é dado por:

$${}^B b_i = [b_{iu}, b_{iv}, b_{iw}]^T \quad (7.24)$$

Então o vetor de posição do ponto B_i expresso no quadro fixo A é:

$$b_i = [b_{iu}, b_{iv}, b_{iw}]^T = {}^A R_B {}^B b_i \quad (7.25)$$

Vamos deixar também o vetor de posição do ponto A_i em relação ao quadro fixo A ser dado por:

$$a_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}]^T \quad (7.26)$$

Então uma equação de fechamento de loop pode ser escrita para o membro i como:

$$d_i = b_i - a_i \quad (7.27)$$

Onde $d_i = A_i \bar{B}_i$.

Esta equação anterior produz uma equação de restrição imposta pelo membro i da seguinte forma:

$$d_i^2 = a_i^2 + b_i^2 - 2a_i^T b_i \quad (7.28)$$

onde d_i denota o comprimento do i -ésimo membro. Substituindo a equação 7.23 e 7.26 para 7.28, temos:

$$e_{i1}c\theta + e_{i2}s\theta + e_{i3} = 0 \tag{7.29}$$

para $i = 1, 2$ e 3 .

A equação 7.28 ou 7.29 escrita três vezes, uma vez para cada $i = 1, 2$ e 3 , produz três equações de restrição para a plataforma móvel.

7.1.2 Manipulador Stewart

A Figura 42 mostra um manipulador paralelo 6 DOF, 6 SPS, conhecido como plataforma Stewart-Gough. Seis membros idênticos conectam a plataforma móvel à base fixa por juntas esféricas nos pontos B_i e A_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, respectivamente. Cada membro consiste de um membro superior e um membro inferior conectado por uma articulação prismática. Serapilheira ou macacos hidráulicos podem ser usados para variar os comprimentos das juntas prismáticas e, portanto, para controlar a localização da plataforma móvel.

Note que na Figura 42, o anexo aponta A_i para $i = 1$ a 6 são esboçados em um plano na base fixa. Da mesma forma, B_i para $i = 1$ a 6 são esboçados em um plano na plataforma móvel. Fora da plataforma geral de Stewart, no entanto, esses pontos de conexão não estão necessariamente em um plano. Existem 14 links conectados por 6 juntas prismáticas e 12 juntas esféricas. Portanto, o número de graus de liberdade do mecanismo é:

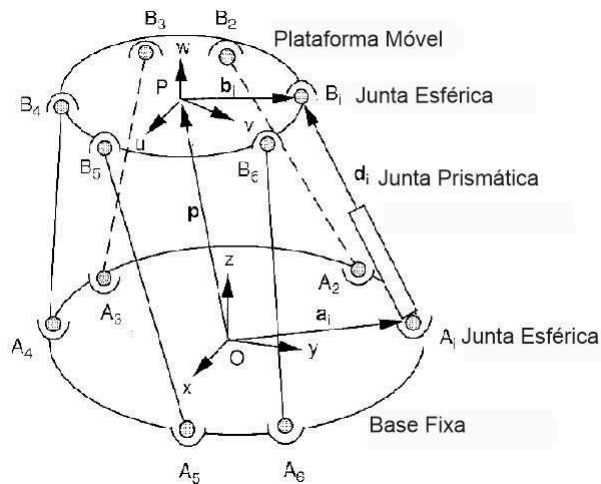


Figura 42 – manipulador paralelo 6 DOF, 6 SPS.[13]

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 3 * 12) = 12 \quad (7.30)$$

No entanto, existem 6 graus de liberdade passivos associados aos seis membros de SPS. Portanto, a plataforma móvel possui 6 graus de liberdade. Observe que um membro SPS pode ser substituído por um membro SPU sem comprometer os graus gerais de liberdade do mecanismo. Como os membros estão conectados à plataforma móvel e à base fixa por juntas esféricas, nenhum momento de flexão ou torque de torção será transmitido aos membros. A força que atua em cada membro é direcionada ao longo do eixo longitudinal do membro. Consequentemente, estes membros podem ser feitos de manipuladores cilíndrico de alta velocidade, alta rigidez e alta velocidade.

Desde que o membro esteja conectado à plataforma móvel e à base fixa por juntas esféricas, nenhum momento de flexão ou torque de torção transmitirá para os membros. A força que está em cada membro é orientada ao longo do eixo longitudinal do membro. Consequentemente, estes membros podem ser feitos de um manipulador cilíndrico de alta velocidade, alta rigidez e alta velocidade.[13]

- GEOMETRIA DO MANIPULADOR

Em relação a sua geometria, para fins de análise, dois sistemas de coordenadas cartesianas, A (x, y, z) e B (u, v, w), como mostrado na Figura 42, estão ligados à base fixa e à plataforma móvel, respectivamente. A transformação da plataforma móvel para a base fixa pode ser descrita pelo vetor de posição p do centróide P e pela matriz de rotação ${}^A R_P$ da plataforma móvel. Seja u , v e w três vetores unitários definidos ao longo dos eixos u , v e w do sistema de coordenadas móveis; então a matriz de rotação pode ser escrita como:

$${}^A R_P = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

Note que os elementos de ${}^A R_P$ devem satisfazer as seguintes condições ortogonais:

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1, \quad (7.32)$$

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 1, \quad (7.33)$$

$$w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 = 1, \quad (7.34)$$

$$u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0, \quad (7.35)$$

$$u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z = 0, \quad (7.36)$$

$$v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z = 0 \quad (7.37)$$

Como mostrado na Figura 42, $a_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}]^T$ e ${}^B b_i = [b_{iu}, b_{iv}, b_{iw}]^T$ ser os vetores de posição dos pontos A_i e B_i nos quadros de coordenadas A e B, respectivamente. Podemos escrever uma equação de vetor-loop para o i -ésimo do manipulador, da seguinte forma:

$$\bar{A}_i \bar{B}_i = P + {}^A R_P {}^B b_i - a_i \quad (7.38)$$

O comprimento do i -ésimo membro é obtido tomando-se o produto da vetor $\bar{A}_i \bar{B}_i$:

$$d_i^2 = [P + {}^A R_P {}^B b_i - a_i]^T [P + {}^A R_P {}^B b_i - a_i], i = 1, 2, \dots, 6 \quad (7.39)$$

onde d_i denota o comprimento do i -ésimo membro. Expandindo a equação 7.39, temos:

$$d_i^2 = p^T p + [{}^B b_i]^T [{}^B b_i] + a_i^T a_i + 2p^T [{}^A R_B {}^B b_i] - 2p^T a_i - 2[{}^A R_B {}^B b_i]^T a_i \quad (7.40)$$

A equação 7.40 escrita seis vezes, uma vez para cada $i = 1, 2, \dots, 6$, produz seis equações que descrevem a localização da plataforma móvel em relação à base fixa. Note que ${}^B b_i$ e a_i são vetores constantes definidos pela geometria do manipulador.[13]

7.2 Código Python

A código a seguir foi escrito na linguagem Python. Será dividido novamente em partes para melhor entendimento. Primeiramente será mostrado o código de leitura do encoder. Posteriormente como o Rapsberry salva os dados e por fim, como se envia os dados para os motores.

O código de leitura do encoder usa as funções de detecção de borda através de uma biblioteca conhecida como RPi.GPIO, usada para acionar um retorno de chamada quando o pino CLK fica em *low* e, em seguida, lê o valor do pino de dados para ver se ele foi girado no sentido horário ou anti-horário.

- Leitura do Encoder

```
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

class KY040:

    CLOCKWISE = 0
    ANTICLOCKWISE = 1

    def __init__(self, clockPin, dataPin, switchPin,
                 rotaryCallback, switchCallback):
        #persist values
        self.clockPin = clockPin
        self.dataPin = dataPin
        self.switchPin = switchPin
        self.rotaryCallback = rotaryCallback
        self.switchCallback = switchCallback

        #setup pins
        GPIO.setup(clockPin, GPIO.IN)
        GPIO.setup(dataPin, GPIO.IN)
        GPIO.setup(switchPin, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)

    def start(self):
        GPIO.add_event_detect(self.clockPin,
                              GPIO.FALLING,
                              callback=self._clockCallback,
                              bouncetime=250)
        GPIO.add_event_detect(self.switchPin,
                              GPIO.FALLING,
                              callback=self._switchCallback,
                              bouncetime=300)

    def stop(self):
        GPIO.remove_event_detect(self.clockPin)
        GPIO.remove_event_detect(self.switchPin)

    def _clockCallback(self, pin):
```

```
    if GPIO.input(self.clockPin) == 0:
        data = GPIO.input(self.dataPin)
        if data == 1:
            self.rotaryCallback(self.ANTICLOCKWISE)
        else:
            self.rotaryCallback(self.CLOCKWISE)

def _switchCallback(self, pin):
    if GPIO.input(self.switchPin) == 0:
        self.switchCallback()

#teste
if __name__ == "__main__":

    CLOCKPIN = 5
    DATAPIN = 6
    SWITCHPIN = 13

    def rotaryChange(direction):
        print "turned - " + str(direction)
    def switchPressed():
        print "button pressed"

    GPIO.setmode(GPIO.BCM)

    ky040 = KY040(CLOCKPIN, DATAPIN, SWITCHPIN,
                  rotaryChange, switchPressed)

    ky040.start()

    try:
        while True:
            sleep(0.1)
    finally:
        ky040.stop()
        GPIO.cleanup()
```

Esta parte do código foi baseada em [30].

- Arquivo para salvar valores

O Robô tem que ser capaz de salvar os valores lidos pelo encoder e, quando solicitado, reproduzir a programação. Para isso, os valores lidos pelo encoder serão salvos em um arquivo .txt. Criar e salvar dados em um arquivos .txt em Python é extremamente simple, como segue:

```

arq = open("ANGULOS_ROPERT.txt", "w")
arq.write("LINHA1")
#para inserir quebra de linha
arq.write("\n")

```

Algumas funções de escrita e leitura em Python pode ser visto na tabela 6.

Método	Uso	Efeito
write	ref_arquivo.write(s)	Adiciona o string s no final do arquivo. ref_arquivo deve ser uma referência a um arquivo que foi aberto para escrita ("w").
read(n)	ref_arquivo.read()	Lê e retorna um string de n caracteres ou o arquivo inteiro como um string se n não é fornecido.
readline(n)	ref_arquivo.readline()	Retorna a próxima linha do arquivo com todo o texto e incluindo o caractere de nova linha. Se n é fornecido como argumento então somente n caracteres são retornados se a linha tem mais do que n caracteres.
readlines(n)	ref_arquivo.readlines()	Retorna uma lista de strings, cada um representado o conteúdo de uma linha do arquivo. Se n não é fornecido, todas as linhas do arquivo são retornadas. Se n é fornecido como argumento então n caracteres serão lidos mas n é arredondado para cima de tal forma que uma linha inteira seja retornada.

Tabela 6 – Tabela com funções em Python[16]

Logo, segue um exemplo para se ler os dados do arquivo em .txt vi Python:

```

ref_arquivo = open("ANGULOS_ROPERT.txt", "r")
linha = ref_arquivo.readline()

ref_arquivo = open("ANGULOS_ROPERT.txt", "r")
lista_de_linhas = ref_arquivo.readlines()
print(len(lista_de_linhas))

print(lista_de_linhas[0:4])
ref_arquivo = open("ANGULOS_ROPERT.txt", "r")

```

```
string_arquivo = ref_arquivo.read()
print(len(string_arquivo))

print(string_arquivo[:256])
```

- Acionamento do Motor

O Acionamento do motor segue a explicação da montagem do circuito. Foi baseado no exemplo de [31].

```
from time import sleep
import pigpio

DIR = 20      # Direção GPIO Pin
STEP = 21     # Step GPIO Pin
SWITCH = 16   # GPIO pin do botão

# Conectar pigpiod
pi = pigpio.pi()

# Setar as saídas
pi.set_mode(DIR, pigpio.OUTPUT)
pi.set_mode(STEP, pigpio.OUTPUT)

# Setar a entrada do botão
pi.set_mode(SWITCH, pigpio.INPUT)
pi.set_pull_up_down(SWITCH, pigpio.PUD_UP)

MODE = (14, 15, 18)  # Mudar a resolução dos passos
RESOLUTION = {'Full': (0, 0, 0),
              'Half': (1, 0, 0),
              '1/4': (0, 1, 0),
              '1/8': (1, 1, 0),
              '1/16': (0, 0, 1),
              '1/32': (1, 0, 1)}

for i in range(3):
    pi.write(MODE[i], RESOLUTION['Full'][i])

# setar o duty cycle e a frequency
pi.set_PWM_dutycycle(STEP, 128)  # PWM 1/2 On 1/2 Off
```

```
pi.set_PWM_frequency(STEP, 500) # 500 pulses per second

try:
    while True:
        pi.write(DIR, pi.read(SWITCH)) # Mudar a direção
        sleep(.1)

except KeyboardInterrupt:
    print ("\nCtrl-C pressed. Stopping PIGPIO and exiting...")
finally:
    pi.set_PWM_dutycycle(STEP, 0) # PWM off
    pi.stop()
```

Referências Bibliográficas

- 1 SALDIAS, D. A. P. Pesquisa em biomecânica humana para o desenvolvimento de tecnologias assistivas. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, CAMPUS BLUMENAU. *PROPOSTA DE PROJETO DE PESQUISA*. [S.l.], 2015.
- 2 CLINICAECIRURGIADOPE. *ENTORSE DO TORNOZELO E INSTABILIDADE LIGAMENTAR*. Disponível em: <<https://clinicaecirurgiadope.com.br/artigos/11>>. Acesso em: 03 jan. 2019.
- 3 HOCOMA. *Lokomat - Hocoma*. Disponível em: <<https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/>>. Acesso em: 27 jan. 2019.
- 4 PÉREZ-IBARRA ANDRÉS L. JUTINICO ALARCÓN, J. C. J. F. M. E. O. J. C. Design and analysis of h1 force control of a series elastic actuator for impedance control of an ankle rehabilitation robotic platform. In: IEEE. *American Control Conference Sheraton Seattle Hotel*. [S.l.], 2017. p. 6.
- 5 LEE KAI CHEN, Y. R. J. S. B. A. C. J. A. S. L.-Q. Z. Y. Robot-guided ankle sensorimotor rehabilitation of patients with multiple sclerosis. *journal Elsevier*, v. 11, n. <<https://www.journals.elsevier.com/multiple-sclerosis-and-related-disorders>>, p. 65—70, 2017.
- 6 ZHOU YUAN ZHOU, N. W. F. G. K. W. Q. W. Z. A proprioceptive neuromuscular facilitation integrated robotic ankle-foot system for post stroke rehabilitation. *journal Elsevier - Robotics and Autonomous Systems*, <<https://www.journals.elsevier.com/robotics-and-autonomous-systems>>, v. 73, p. 111–122, 2015.
- 7 VALDIVIA ANDRÉS BLANCO ORTEGA, M. A. O. S. H. R. A. R. C. H. G. Modelado y simulación de un robot terapéutico para la rehabilitación de miembros inferiores. *Revista Ingeniería Biomédica*, ISSN 1909-9762, v. 7, n. 14, p. 42–50, 2013.
- 8 AYAS, I. H. A. M. S. Fuzzy logic based adaptive admittance control of a redundantly actuated ankle rehabilitation robot. *journal Elsevier - Control Engineering Practice*, <<https://www.journals.elsevier.com/control-engineering-practice>>, v. 59, p. 44–54, 2017.
- 9 LEAL-NARANJO, J. A.-A. et al. Multi-objective optimization of a parallel manipulator for the design of a prosthetic arm using genetic algorithms. *Latin American Journal of Solids and Structures*, scielo, v. 15, 00 2018. ISSN 1679-7825. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252018000300508&nrm=iso>.
- 10 ROMANO, L. R. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFS*, 2003.
- 11 SANTOS DAYANE MINETTO, R. S. D. M. João Victor Borges dos. Projeto de mecanismos paralelos para o auxílio fisioterapêutico na entorse de tornozelo. *XIX*

Jornadas de Jóvenes Investigadores Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM), XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores, 2011, 2011.

12 CIA AÉREA AZUL. *Simulador de Voo da Cia Aérea Azul, robô paralelo Stewart*. Disponível em: <<https://www.voeazul.com.br/imprensa/banco-de-imagens>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

13 TSAI, L.-W. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. Maryland: Wiley-Interscience, 1999. 520 p. (Série do livro). Bibliografia: cap. 3. ISSN 0471325937. ISBN 978-0-471-32593-2.

14 NIYETKALIYEV, A.; SHINTEMIROV, A. An approach for obtaining unique kinematic solutions of a spherical parallel manipulator. *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 978-1-4799-5736-1/14/\$31.00 2014 IEEE, p. 1355–1360, 2014.

15 RUIZ, P. L. M. Uso da robótica na reabilitação: Aplicação para a fisioterapia. *Revista UNILUS Ensino e Pesquisa*, ISSN 2318-2083 (eletrônico), v. 14, n. 37, p. 188–191, 2017.

16 BRAD MILLER, DAVID RANUM. *Trabalhando com Arquivos*. Disponível em: <<https://panda.ime.usp.br/pensepy/static/pensepy/10-Arquivos/files.html>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

17 RODRIGUES FÁBIO LUCAS E WAISBERG, G. Entorse de tornozelo. *Revista da Associação Médica Brasileira*, Print version ISSN 0104-4230 On-line version ISSN 1806-9282, <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-42302009000500008>>, v. 55, n. 5, p. 510–511, 2009.

18 LYNCH, P. A. R. S. A. Lesões ligamentares do tornozelo. *Rev Bras Med Esporte*, ISSN 1517-8692, <<http://dx.doi.org/10.1590/S1517-86921999000100004>>, v. 5, n. 1, p. 13–23, 1999.

19 AV MUSSE CAI, G. L. R. R. P. K. L. S. L. Espasticidade: Avaliação clínica. *Associação Brasileira de Medicina Física e Reabilitação.*, <https://diretrizes.amb.org.br/_BibliotecaAntiga/espasticidade-avaliacao-clinica.pdf>, p. 8, 2006.

20 SHAKTI LINI MATHEW, N. K. C. K. D. Effectiveness of robo-assisted lower limb rehabilitation for spastic patients: A systematic review. *journal Elsevier*, v. 117, n. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566318304597?via%3Dihub>>, p. 403–415, 2018.

21 GONÇALVES ANA CAROLINA, A. G. S. A. B. F. Estado da arte em reabilitação robótica de membros inferiores de pessoas com ave. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, ISSN 1415-6938, v. 17, n. 5, p. 109–129, 2013.

22 7GRAUS. *Dicionário Online de Português*. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/>>. Acesso em: 27 jan. 2019.

23 JAMWAL SHENGQUAN XIE, K. C. A. P. K. Kinematic design optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified genetic algorithm. *journal Elsevier*, v. 57, n. <<https://www.journals.elsevier.com/robotics-and-autonomous-systems>>, p. 1018–1027, 2009.

- 24 LÓPEZ-GUTIÉRREZ H. AGUILAR-SIERRA¹, S. S. R. L. R. Adaptive control in passive rehabilitation routines using elltio. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA*, v. 38, n. 2, p. 458–478, 2017.
- 25 CHEN BIN ZI, Y. Z. L. Q. W.-H. L. B. Ankle-foot orthoses for rehabilitation and reducing metabolic cost of walking: Possibilities and challenges. *journal Elsevier - Mechatronics*, <<https://www.journals.elsevier.com/mechatronics>>, v. 53, p. 241—250, 2018.
- 26 CHEN PENG QI, Z. G. H. Y. G. Mechanical design and evaluation of a compact portable knee–ankle–foot robot for gait rehabilitation. *journal Elsevier - Mechanism and Machine Theory*, <<https://www.journals.elsevier.com/mechanism-and-machine-theory>>, v. 103, p. 51—64, 2016.
- 27 VILLA-PARRA, A. C. et al. Control of a robotic knee exoskeleton for assistance and rehabilitation based on motion intention from sEMG. *Research on Biomedical Engineering*, scielo, v. 34, p. 198 – 210, 09 2018. ISSN 2446-4740. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2446-47402018000300198&nrm=iso>.
- 28 MIAO MINGMING ZHANG, C. W. H. L. Q. Towards optimal platform-based robot design for ankle rehabilitation: The state of the art and future prospects. *Journal of Healthcare Engineering*, Article ID 1534247 <<https://doi.org/10.1155/2018/1534247>>, v. 2018, p. 9, 2018.
- 29 ALCO CER LUIS VELA, A. B. J. G. M. O. W. Major trends in the development of ankle rehabilitation devices. *M. Sc., Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., México*, key number project 2142.09-P, v. 176, p. 45–55, 2012.
- 30 STUFFABOUTCODE. *Raspberry Pi and KY040 Rotary Encoder*. Disponível em: <<https://www.stuffaboutcode.com/2015/05/raspberry-pi-and-ky040-rotary-encoder.html>>. Acesso em: 20 jan. 2019.
- 31 ROTOTRON. */raspberry-pi-stepper-motor-tutorial*. Disponível em: <<https://www.rototron.info/raspberry-pi-stepper-motor-tutorial/>>. Acesso em: 20 jan. 2019.