

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LEONARDO DENARI RUIZ DURAN

ROBÔ PARALELO ATUADO A CABOS
PROTÓTIPO DE 2 GDL

São Carlos
2019

LEONARDO DENARI RUIZ DURAN

**ROBÔ PARALELO ATUADO A CABOS
PROTÓTIPO DE 2 GDL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador (a): Profa Dra. Maira Martins da Silva

VERSÃO CORRIGIDA

**São Carlos
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D948r Denari Ruiz Duran, Leonardo
 Robô paralelo atuado a cabos: protótipo de 2 GDL /
 Leonardo Denari Ruiz Duran; orientadora Maira Martins
 da Silva. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. Robô paralelo. 2. CDPR. 3. End-effector. 4.
Cinemática. 5. Robô a cabos. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Leonardo Denari Ruiz Duran

**Título: CABLE DRIVEN PARALLEL ROBOT - 2 DOF PLANAR CASE STUDY
AND PROTOTYPING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dr. Maíra Martins da Silva (Orientadora)

Nota atribuída: 9,0 (NOVE, ZERO)

Maíra M. da S. Silveira

(assinatura)

Prof. Dr. Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira

Nota atribuída: 9,0 (nove)



(assinatura)

Msª. Fernanda Thaís Colombo

Nota atribuída: 9,0 (nove)

Fernanda Thaís Colombo

(assinatura)

Média: 9,0 (NOVE)

Resultado: APROVADO

Data: 21/02/2019.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador Maíra M. da S. Silveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito ao meu pai José Carlos, por todo o apoio físico, emocional e por toda a parceria nos embates da vida, sempre me orientando e estimulando a buscar meus objetivos e metas de vida, sendo muito mais que um pai, se tornado um amigo e um herói para mim.

Agradeço muito à minha falecida mãe Marcia, que se mostrou muito mais que um exemplo de perseverança, se mostrou uma guerreira até seu último dia de vida, lutando por seus sonhos e lutando por mim.

Agradeço a meus dois falecidos avós Casimiro e Lourdes que por grande parte da vida me acompanharam e ajudaram a construir quem sou hoje.

Agradeço a meu padrinho Manoel, por todos os ensinamentos e conselhos durante meu crescimento, aquele “Uma horinha por dia” pro menino que não gostava de estudar teve um enorme valor até os dias de hoje para mim.

Agradeço a minha companheira Natália, por todo o amor que coloca em tudo o que faz, o apoio e motivação em todas as minhas idéias, tarefas, e cafés de madrugada enquanto eu precisava estudar, sendo ela minha motivação.

Agradeço finalmente a professora Maíra, não somente pela orientação, mas principalmente pelo engajamento com nosso curso e com os alunos, pelos conselhos em tempos dificeis, por toda a ajuda e por todas as aulas com empolgação pela nossa Engenharia.

“O sinal é a verdade. O ruído é o que nos distrai, afastando-nos da verdade”

Nate Silver

RESUMO

DURAN, L. D R. Robô Paralelo atuado por Cabos: Estudo de caso de um robô com 2 GDL. 2018. 048f. Tese de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Cable Driven Parallel Robot – CDPR, faz parte de uma classe especial de robôs paralelos, que diferentemente dos robôs seriais e paralelos convencionais que utilizam uniões rígidas entre as juntas, consiste em uma junção de cabos que têm como função a movimentação da plataforma de atuação (end-effector). Sua movimentação espacial pode ser obtida através de dois métodos de tração, um através da conexão da plataforma com os motores pelo uso de polias, e a outra através do uso de uma bobina acoplada ao eixo do motor. Esse tipo de robô tem o potencial de atuação de forma mais abrangente que os demais, tendo como características a habilidade de manipular altas cargas com uma melhor eficiência de energia.

O objetivo do trabalho é apresentar um panorama geral sobre esta classe de robôs e seu contexto de possível aplicação na indústria e na vida das pessoas. Foi desenvolvido um estudo teórico, partindo da análise matemática do modelo físico, abrangendo análises cinemáticas até à escolha de motores e controladores embasados na simulação computacional do sistema através da parametrização dos componentes e por fim realizar a construção de um protótipo de CDPR planar atuado por quatro cabos e motores. Por fim o trabalho busca ser um alicerce e um degrau a mais na discussão e estudo de robótica no país, tanto na academia como na indústria.

Palavras-chave: CDPR, Robô paralelo. Sistema atuado por cabos. GDL. Cinemática.

ABSTRACT

DURAN, L. D R.; SO, E. Y. **Cable Driven Parallel Robot: 3 DoF Planar Robot Case Study.** 2018. 048f. Tese de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Cable Driven Parallel Robot - CDPR is part of a special class of parallel robots, which unlike conventional serial and parallel robots that use rigid joints between the joints, consists of a joint of cables that have as function the movement of the actuation platform (end-effector). Its space movement can be obtained through two traction methods, one through the connection of the platform with the motors by the use of pulleys, and the other through the use of a coil coupled to the motor shaft. This type of robot has the potential of acting in a more comprehensive way than the others, having as characteristics the ability to handle high loads with a better energy efficiency, with high velocities and accelerations.

The objective of this work is to present an overview of this class of robots and their context of possible application in industry and in people's lives. It was developed a theoretical study, starting from the mathematical analysis of the physical model, covering kinematic analyzes until the choice of motors and controllers based on the computer simulation of the system through the parameterization of the components and finally to carry out the construction of a planar CDPR prototype operated by four cables and motors. Finally, the work seeks to be a foundation and an additional step in the discussion and study of robotics in the country, both in academia and industry.

Keywords: CDPR, Parallel robot. System actuated by cables. GDL. Kinematics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Robô “Charlotte” NASA / McDonnell-Douglas	19
Figura 2 - Conceito e componentes de um CDPR	20
Figura 3 - Conceito de manufatura aditiva baseada em CDPR com extrusora equipada no end effector	21
Figura 4 - Conceito de pintura, limpeza e manutenção em aeronaves utilizando CDPRs.....	21
Figura 5 - Conceito de armazenamento e pickin através do uso de CDPRs	21
Figura 6 - Conceito de montagem de painéis solares através do uso de CDPRs	22
Figura 7 - Conceito do String Man baseado em CDPRs	22
Figura 8 - Conceito da Spider Cam baseado em CDPRs.....	23
Figura 9 - Configuração de cabos cruzada, não cruzada e com ponto central.....	25
Figura 10 - Configuração genérica de CDPR de 2 GDL	26
Figura 11 - Diagrama de Corpo Livre do CDPR	28
Figura 12 - Diagrama de Corpo Livre do eixo motor/bobina	29
Figura 13 - Trajetória retilínea do end effector, com traçado em forma de quadrado, partindo e retornando ao ponto { -0.4 0.4 }	32
Figura 14 - Trajetória curvilínea do end effector, com traçado em forma de circunferência, partindo e retornando ao ponto { 0.0 0.2 }	33
Figura 15 - Trajetória retilínea e curvilínea do end effector, com traçado em forma de quadrado e circunferência	33
Figura 16 - Ângulos entre os cabos e a base fixa na trajetória mista.....	34
Figura 17 - Diagrama de etapas de atuação do end effector do CDPR.....	35
Figura 18 - : Motor de passo e driver utilizados no protótipo	35
Figura 19 - Dimensões do Motor de Passo 28BYJ-48.....	36
Figura 20 - Comunicação Serial para informação de Coordenadas.....	40
Figura 21 - Base do protótipo com componentes e suportes	40
Figura 22 - Fixação Helice - Carretel.	41
Figura 23 - Fixação Helice/Carretel – Eixo do Motor.....	41
Figura 24 - Protótipo final do CDPR Planar – Posição Home.....	42
Figura 25 - Protótipo final do CDPR Planar – Posição (0.05 , 0.05).....	42
Figura 26 - Erro de posicionamento do end effector – Posição (0.05 , 0.05)	44
Figura 27 - Exemplo de perda de tração em uma das linhas	45

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	17
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. CONCEITUAÇÃO	19
1.2. CAMPOS DE APLICAÇÃO	20
2. OBJETIVOS	24
3. MODELAGEM CINEMÁTICA	25
3.1. INTRODUÇÃO CINEMÁTICA	27
3.2. EQUACIONAMENTO CINEMÁTICO	27
3.3. EQUACIONAMENTO ESTÁTICO	28
3.4. MODELAGEM E EQUACIONAMENTO DOS ATUADORES	29
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	31
4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO EM MATLAB	31
4.2. RESULTADOS OBTIDOS	32
5. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	35
5.1. CÓDIGO DE ATUAÇÃO NO MICROCONTROLADOR	35
5.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	40
5.3. RESULTADOS OBTIDOS: COMPARAÇÃO TEÓRICA x REAL	43
6. CONCLUSÃO	46
7. TRABALHOS FUTUROS E RECOMENDAÇÕES	47
8. BIBLIOGRAFIA	48

1. INTRODUÇÃO

O problema abordado neste estudo foi o de avaliar e parametrizar um robô paralelo de 2 graus de liberdade atuado por cabos, sendo dois graus de translação, capaz de gerar trajetórias circulares e lineares pelo end-effector, através da atuação de quatro cabos por quatro motores.

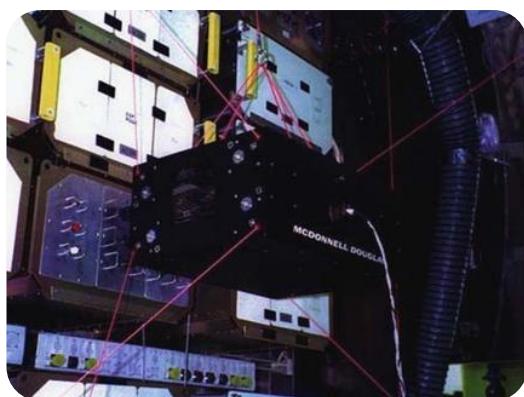
1.1. CONCEITUAÇÃO

A metodologia de aplicação de cabos para manipular cargas foi e é amplamente utilizada pela humanidade desde tempos muito remotos, sendo até hoje utilizada em guindastes na construção civil e na produção industrial, devido a sua versatilidade e ao baixo custo quando comparado a outras soluções. Trabalhadores quando precisam movimentar cargas elevadas ou até mesmo montá-las de forma precisa, fazem a fixação de cordas e cabos de modo a obter um maior controle de posicionamento em relação a distúrbios externos, sendo o controle feito manualmente por eles através da tração nos cabos que restringem um grau de liberdade para cada cabo adicionado.

Partindo deste princípio de controle manual por parte dos trabalhadores, fica evidente a adaptabilidade e utilização de motores no controle de posição das cargas, substituindo a necessidade do trabalho humano através da aplicação de motores em cada cabo de atuação. Em paralelo a isto e adicionando um controle baseado em computadores aos motores, se torna simples definir e sincronizar movimentos pré definidos para as cargas, tendo como produto final, um robô paralelo atuado por cabos.

"Cable Driven Paralell Robot" fazem parte de uma classe de manipuladores paralelos em que a base (end-effector) é suportada por n cabos paralelos através da aplicação de n motores de tração. Além dos benefícios já conhecidos dos robôs paralelos em relação a robôs seriais, os CDPRs podem ter massa pequena e melhor rígidez do que os demais robôs paralelos. Um dos exemplos do surgimento e aplicação dos robôs paralelos atuados por cabos foi o construído por McDonnel-Douglas, mais conhecido como "Charlotte", que foi construído para ser utilizado na Estação Espacial Internacional, sendo ele composto por uma caixa retangular atuada por oito cabos com oito motores de tração, como mostra a figura 01:

Figura 1 - Robô "Charlotte" NASA / McDonnell-Douglas

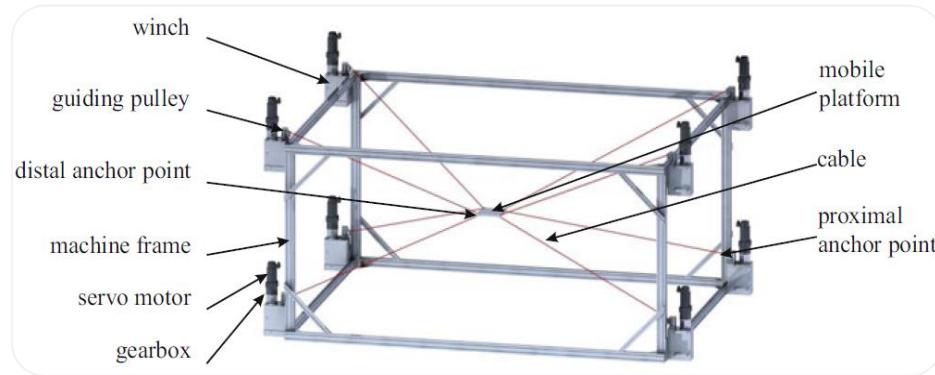


Fonte: Disponível em <https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/williams/html/Image.html>

Através do uso deste tipo de manipulador e devido a sua construção e geometria, é possível utilizar cabos longos de forma a manter o mecanismo no mesmo baseline, o que permite a este tipo de robô ter uma área de trabalho muito grande, como por exemplo na aplicação mais conhecida como SpiderCam, que consiste de um CDPR de 3 GDL, com atuação promovida por quatro cabos e quatro motores que fazem a varredura e captura de todo o estádio durante os jogos. Com esta configuração, o end-effector do robô é capaz de imprimir altas acelerações e velocidades devido à leveza e rigidez dos cabos.

Um robô atuado por cabos pode ser decomposto em uma plataforma móvel, uma estrutura de sustentação dos motores/polias fixa, m cabos conectados à plataforma móvel em suas extremidades e presos à estrutura do frame em sua extremidade nos motores. Os comprimentos dos cabos são alterados devido à aplicação de transferência de movimento via polias, ou via bobina acoplada no eixo dos motores, enrolando e liberando os cabos para movimentar a plataforma, como pode ser visto na figura 02 abaixo:

Figura 2 - Conceito e componentes de um CDPR



Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2ByFGil>

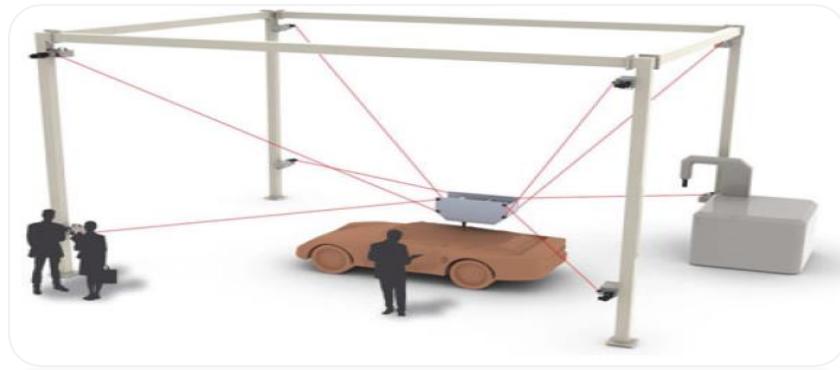
1.2. CAMPOS DE APLICAÇÃO

Um dos benefícios e diferenciais dos *cable driven parallel robots* é a sua diversidade de aplicação em diversas áreas, e a sua adaptabilidade em setores e aplicações que antes não eram possíveis devido a restrições relacionadas ao tamanho do “Workspace”, ao “Payload” ou de requisitos de ciclo de vida. Além da versatilidade advinda dos CDPRs, há também outros benefícios inerentes ao uso desse tipo de robô, que está ligado a instalação facilitada, ao transporte mais simplificado, e até a qualidade e precisão.

LOGÍSTICA E MANUFATURA

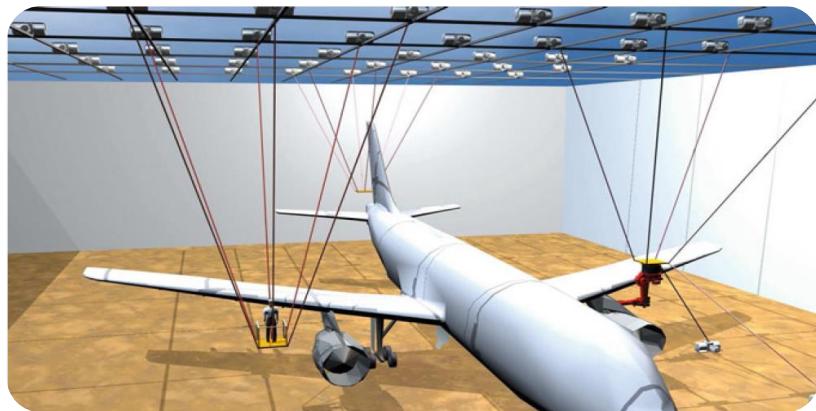
Um campo muito promissor de aplicação dos CDPRs está na área da logística e manufatura, devido a sua vantagem em termos econômicos em relação a espaço de trabalho muito grande, alta repetitividade e dinâmica associada com alto rendimento de execução e classificação, sendo grandes exemplos a manufatura aditiva em larga escala, processo de pintura, manutenção e limpeza de aeronaves, e operação em estoques de alta escala, como pode ser visualizado nas figuras 03,04 e 05 abaixo, respectivamente:

Figura 3 - Conceito de manufatura aditiva baseada em CDPR com extrusora equipada no end effector



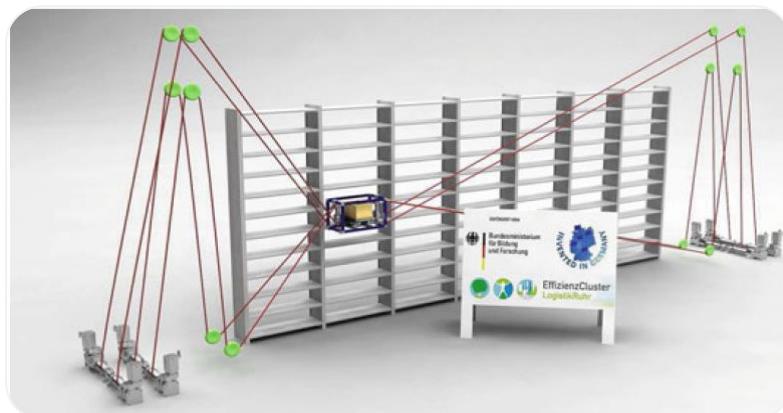
Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2E9JR6E>

Figura 4 - Conceito de pintura, limpeza e manutenção em aeronaves utilizando CDPRs



Fonte: Disponível em <http://www.cablebot.eu/en/>

Figura 5 - Conceito de armazenamento e pickin através do uso de CDPRs



Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2E8UCGa>

CONSTRUÇÃO

No contexto de construção e montagem, os CDPRs foram inicialmente propostos como guindastes robotizados, para aplicações como a construção de barcos e navios, e até na construção de pontes e de plantas de geração de energia solar.

Figura 6 - Conceito de montagem de painéis solares através do uso de CDPRs

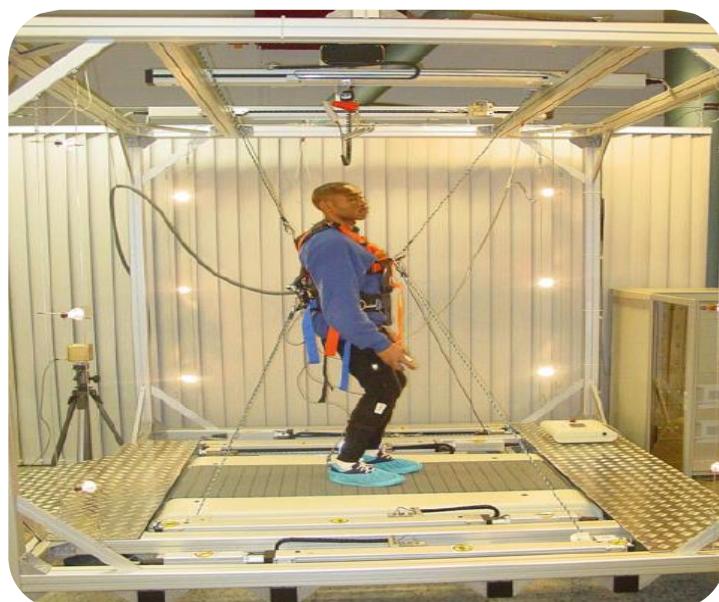


Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2TlYh2K>

REABILITAÇÃO

No contexto de reabilitação robótica, os CDPRs possuem uma aplicação vasta, e que permite o treinamento e a recuperação de forma mais avançada e menos custosa para os pacientes, como é feita na aplicação de Surdilovic, que propôs o “String Man”, um sistema de sustenção baseado em cabos, que através de um controle de força avançado, reduz a massa efetiva da pessoa debilitada, e permite um treinamento e simulação de caminhada e recuperação dos movimentos de forma menos custosa em relação a tensões e estresses no corpo e nas pernas.

Figura 7 - Conceito do String Man baseado em CDPRs



Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2SwoDso>

ENTRETENIMENTO

Uma das aplicações mais conhecidas por todos, e presente na grande maioria dos campeonatos de futebol e esportes de grande porte, são as Spider Cam, que “circulam” todo o estádio, capturando cenas de diversos ângulos durante a partida.

Figura 8 - Conceito da Spider Cam baseado em CDPRs



Fonte: Disponível em <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1155/2014/823028>

2. OBJETIVOS

O objetivo da tese é descrever os fundamentos teóricos dos Cable Driven Parallel Robots, e através dos fundamentos propor uma análise e formulação matemática e física de um caso específico de 2 graus de liberdade, analisando seu enquadramento no panorama brasileiro e internacional, e elucidando a importância da pesquisa e desenvolvimento de novas formas de atuação, muitas vezes mais eficiente e econômica.

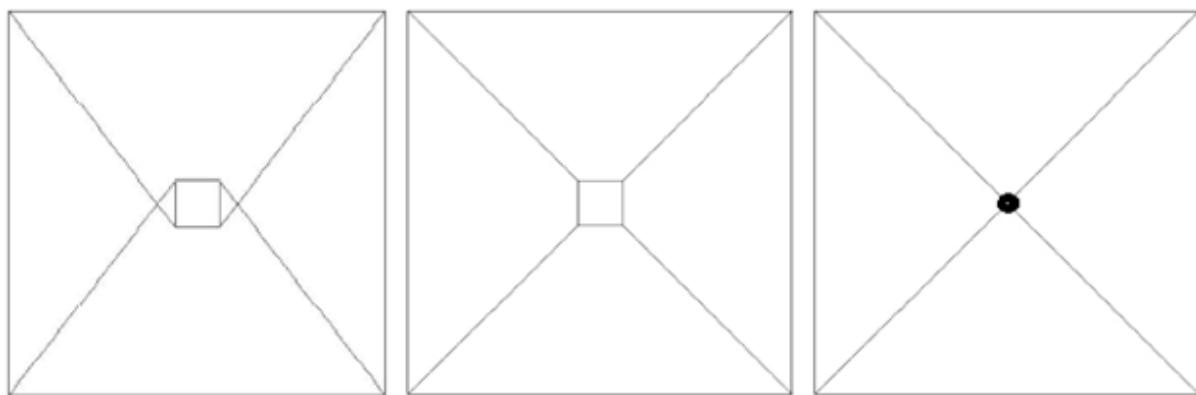
Objetiva-se também desenvolver através da formulação matemática e física um modelo que permita a simulação e escolha de componentes e parâmetros de projeto que permitam a implementação e construção de um protótipo de CDPR de 2 GDL para validação da modelagem e simulação realizada.

3. MODELAGEM CINEMÁTICA

Nesta seção são apresentados os modelos matemáticos de cinemática inversa e direta do *Cable Driven Parallel Robot*. Ambos os modelos matemáticos são o ponto de partida para o entendimento e para a modelagem mecânica e de posicionamento do conjunto.

Dentro do escopo dos Cable Driven Parallel Robots, existem diversas formas e configurações para a construção e operação do robô, baseados principalmente no número de cabos e de motores tensionadores do end-effector. Nesta tese, o CDPR em questão consiste de um end-effector rígido central, que é controlado por quatro (04) cabos e motores distintos entre si. Seguindo esta baseline, temos diversas configurações possíveis para a fixação dos cabos no end-effector, tendo como diferença a existência ou não de cruzamento entre os cabos, ou o end effector sendo um ponto “rígido” central, diferença está que pode ser vista na figura abaixo:

Figura 9 - Configuração de cabos cruzada, não cruzada e com ponto central



Fonte: Elaboração do Autor.

A escolha de qual método de fixação foi baseada nos limitantes encontrados no modelo sem cruzamento dos cabos, sendo ele capaz de fornecer movimentos de translação, mas não de rotação em torno do eixo Z, devido à momentos sobre este mesmo eixo. A configuração com cruzamento e consequente atrito entre os cabos fornece um bom acionamento em relação a translação, e resiste de forma geral a momentos em torno do eixo X, sendo o end effector modelado como um ponto central de encontro dos cabos.

As configurações e classificações deste tipo de robô são baseadas principalmente em relação à quantidade de cabos atuadores, como foi proposto por MING e HIGUCHI (1994) e VERHOEVEN et al. (1998) um método de classificação, conforme segue abaixo:

- a) Manipulador com $m \leq n$

Nesta classificação, o número de cabos (m) é inferior ou igual ao número de graus de liberdade (n), sendo denominada como **incompletamente restrita**.

- b) Manipulador com $m = n + 1$

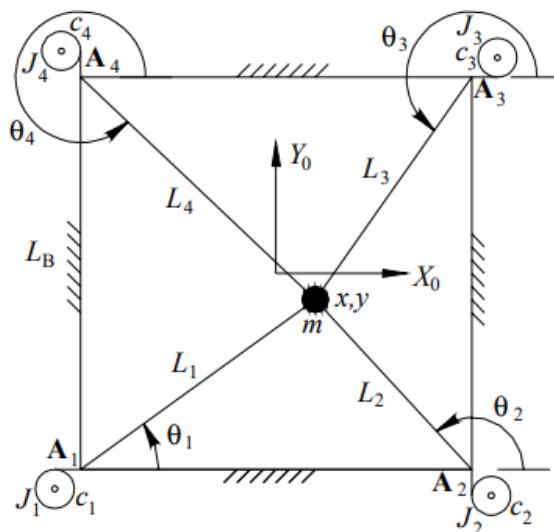
Nesta classificação, o número de cabos (m) é estritamente igual ao número de graus de liberdade (n) mais um, tendo como resultado uma completa determinação da posição do end effector devido a restrição imposta pelo cabo adicional, sendo denominada **completamente restrita**.

c) Manipulador com $m > n + 1$

Nesta classificação, o número de cabos (m) é sempre maior que o número de graus de liberdade (n) mais um, tendo como resultado uma completa determinação da pose do end effector devido a restrição cinemática imposta por cada cabo adicional, sendo denominado como **completamente restrito e redundante**.

Para o caso de dois graus de liberdade (2 GDL), compreendendo dois graus de translação, deve haver a presença de três cabos conectados ao end effector, e como os cabos somente trabalham sob tração, é necessária a presença de cabos adicionais que evitem a perda de controle do sistema e que haja um afrouxamento dos cabos entre o motor e o end effector. Desta forma, o sistema se torna redundante em termos de posicionamento já que o 4º cabo adiciona infinitas soluções de pose dos vetores para os três graus de liberdade, sendo a pose do end effector definida da forma $X = \{x \ y \ \alpha = 0\}^T$, como pode ser visto na figura 10 abaixo:

Figura 10 - Configuração genérica de CDPR de 2 GDL



Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2WW29Q5>

Além da pose do end effector, através da figura 10 é possível visualizar outros parâmetros do sistema, como o referencial inercial $\{0\}$ fixado no centróide da base do robô, bem como as dimensões da base denifidas por L_B . Os cabos de atuação e sustentação do end effector passam obrigatoriamente pelos vértices da base, com pontos fixos denominados $A_i = \{A_{ix} \ A_{iy}\}^T$. O comprimento e ângulo dos cabos são denotados como L_i e θ_i respectivamente, e os momentos de inércia e a massa do end effector denotadas por J e m respectivamente foram desconsideradas nesta modelagem. Em relação ao motor e a polia de transmissão de

movimento, temos parâmetros como o torque de cada motor denotado por $\tau_i = \{i = 1, \dots, 4\}$, os ângulos de rotação do motor denotados por $\beta_i = \{i = 1, \dots, 4\}$ e o raio das polias denotado por $r_i = \{i = 1, \dots, 4\}$.

3.1. INTRODUÇÃO CINEMÁTICA

Partindo da modelagem cinemática, podemos relacionar as variáveis de junta com a pose do end effector, e assim determinar as relações entre a pose com os comprimentos dos cabos de atuação do robô. De forma generalista, o cálculo de cinemática do CDPR, fornece a solução entre a pose do end effector com os vetores de comprimento que ligam o motor de acionamento na base até o ponto de fixação no end effector. Com a restrição referente aos CDPRs tida como válida e funcional no que diz respeito aos cabos estarem sempre sob tração, podemos admitir que o comprimento dos vetores de acionamento são equivalentes ao comprimento dos cabos de atuação, sendo tratados como restrições cinemáticas as duas pontas de ligação do cabo, o que nos remete a tratar o CDPR em questão como uma sistema multicorpos.

3.2. EQUACIONAMENTO CINEMÁTICO

A cinemática inversa aplicada à modelagem do CDPR, visa encontrar a correlação entre os comprimentos dos vetores de atuação (cabos) com a posição ou pose do end effector. Com essa modelagem é possível definir os comprimentos dos cabos ou os ângulos dos motores de forma a ter uma parametrização destes valores em função da pose do end effector, e com isso ter a definição de todo o movimento do CDPR no workspace pré definido.

A solução para os comprimentos é obtida de forma direta através do cálculo da norma euclidiana entre o ponto central do end effector, $X = \{x \ y\}^T$ e cada vértice A_i da base do robô:

$$L_i = \sqrt{(x - A_{ix})^2 + (y - A_{iy})^2} \quad (1)$$

Partindo da mesma linha de raciocínio, os ângulos dos cabos podem ser calculados da forma:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y - A_{iy}}{x - A_{ix}}\right) \quad (2)$$

Para encontrar as equações cinemáticas de velocidade do end effector, devemos considerar o sistema fechado de cabos e fazer o equacionamento da forma:

$$\{x \ y\}^T = \{A_{ix} + L_i \cdot \cos(\theta_i) \ A_{iy} + L_i \cdot \sin(\theta_i)\}^T \quad (3)$$

Derivando (3) em relação ao tempo, obtemos a matriz jacobiana, da forma:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -L_i \cdot \sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & L_i \cdot \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{L}_i \\ \dot{\theta}_i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Aplicando a inversa no sistema (4) de cabos acima, obtemos:

$$\begin{Bmatrix} \dot{L}_i \\ \dot{\theta}_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) \\ -L_i^{-1} \cdot \sin(\theta_i) & L_i^{-1} \cdot \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Extraindo do sistema (5) acima as relações entre \dot{L}_i e \dot{X} , obtemos a correlação entre as variações dos comprimentos dos cabos L_i com a posição cartesiana do end effector, da forma $\dot{L} = M \cdot \dot{X}$:

$$\begin{Bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \\ \dot{L}_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) \\ \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

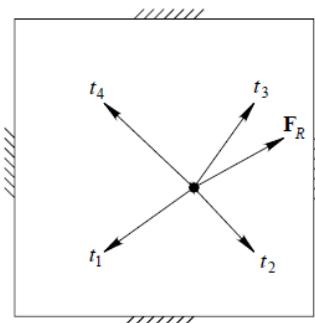
Para obter e resolver a cinemática direta em relação a velocidade do end effector, é necessária a inversão da matriz M do sistema (6), chegando ao sistema, $\dot{X} = M^{-1} \dot{L}$. Um dos problemas encontrados nesse procedimento está relacionado a uma característica da matriz M , sendo ela 4×2 , e portanto não sendo uma matriz quadrada, tendo como característica interna, o $[Posto(M) = 2] < 4$. Com essa relação do posto estabelecida, podemos adotar uma solução para a cinemática direta, utilizando como base o método de solução da inversa de M , através da operação de cálculo da pseudo inversa, da forma:

$$\dot{X} = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \cdot \dot{L} \quad (7)$$

3.3. EQUACIONAMENTO ESTÁTICO

Para encontrar o equilíbrio estático no end effector, temos como premissa que a soma das forças e os momentos exercidos no end effector por todos os cabos, deve ser igual a resultante das forças externas realizadas pelo ambiente do CDPR. A figura 11 abaixo mostra o diagrama de corpo livre do end effector.

Figura 11 - Diagrama de Corpo Livre do CDPR



Fonte: Disponível em <https://bit.ly/2WW29Q5>

A construção e escolha adotada para o CDPR desta tese consiste em um sistema paralelo ao “ground”, o que possibilita ignorar o efeito da gravidade tanto em termos de tensão nos cabos, como em efeitos viscosos de atrito, entre o end effector e a base, considerando portanto um coeficiente de atrito desprezível. As equações estáticas baseadas na figura 11 são:

$$\sum_{i=1}^n t_i = - \sum_{i=1}^n t_i \cdot \vec{L}_i = \vec{F}_R \quad (8)$$

A equação (8) acima relaciona as tensões t_i nos cabos, com os vetores de direção dos cabos $\vec{L}_i = \{\cos(\theta_i) \ \sin(\theta_i)\}^T$ baseados no referencial do end effector {0}, e o vetor resultante das forças $\vec{F}_R = \{F_x \ F_y\}^T$. Substituindo os termos acima na equação da forma $S \cdot T = F_R$, sendo $T = \{t_1 \dots t_n\}^T$ o vetor de tensões nos cabos, e $S = [L_1 \dots L_n]$ a matriz de translação estática, obtemos:

$$\begin{bmatrix} -\cos(\theta_1) & -\cos(\theta_2) & -\cos(\theta_3) & -\cos(\theta_4) \\ -\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_3) & -\sin(\theta_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} \quad (9)$$

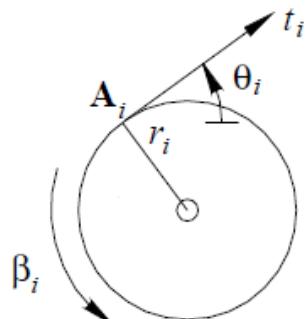
A matriz S da equação (09) acima demonstra a dualidade entre as equações de força e da inversa da velocidade, da forma que $S = -M^T$, sendo M presente nas equações (6). O resultado da equação (9) pode ser invertido afim de obter a relação entre as forças atuantes com as tensões nos cabos.

3.4. MODELAGEM E EQUACIONAMENTO DOS ATUADORES

Para o posicionamento do end effector é necessário o acionamento das bobinas através do controle de ângulo de rotação do eixo dos motores, e através de uma modelagem geométrica em relação aos comprimentos dos cabos com a quantidade rotacionada pelo eixo, podemos fazer a correlação entre o posicionamento do end effector e os ângulos dos motores.

A figura 12 abaixo mostra o diagrama de corpo livre do eixo do motor / bobina, da forma:

Figura 12 - Diagrama de Corpo Livre do eixo motor/bobina



Fonte: Elaboração do Autor.

Assumindo que β_i é igual a 0 na posição “home” do end effector, que consiste na posição $X = \{0 \ 0\}^T$, e partindo desta posição com o sistema acoplado, temos que uma variação angular nos motores/bobina causarão uma variação ΔL_i nos cabos, sendo ΔL_i definido da forma: $\Delta L_i = L_i - L_{0i}$, com $L_i = \sqrt{(x - A_{ix})^2 + (y - A_{iy})^2}$ e $L_{0i} = \sqrt{(A_{ix})^2 + (A_{iy})^2}$, sendo a trajetória angular definida da forma:

$$\beta_i \cdot r_i = L_{0i} - L_i \quad (13)$$

Assumindo que as bobinas são todas identicas, temos que os r_i são os mesmos para todas os motores, da forma $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$, e os ângulos definidos da forma:

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \cdot \begin{pmatrix} L_{01} - \sqrt{(x - A_{1x})^2 + (y - A_{1y})^2} \\ L_{02} - \sqrt{(x - A_{2x})^2 + (y - A_{2y})^2} \\ L_{03} - \sqrt{(x - A_{3x})^2 + (y - A_{3y})^2} \\ L_{04} - \sqrt{(x - A_{4x})^2 + (y - A_{4y})^2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção serão discutidas e apresentadas as configurações geométricas e os dados de simulação implementados em MATLAB® em relação ao CDPR acionado por quatro cabos. Definida a geometria a ser implementada, serão feitas simulações com a finalidade de validar a modelagem matemática obtida, e utilizar a simulação como base para a construção do modelo físico e comparação de resultados teóricos e físicos.

4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO EM MATLAB

Para a simulação do posicionamento e obtenção do parâmetros do CDPR, inicialmente foram definidos alguns fatores relacionados à geometria da base do robô, sendo necessário descrever a dimensão da base L_b , as coordenadas dos pontos de ancoragem $A_i = \{A_{ix} \ A_{iy}\}^T$, o raio das bobinas utilizadas, e a posição “home”, definida no centróide da base quadrada, como mostra a parte do algoritmo abaixo::

```
% Dados Gerais do Cable Driven Parallel Robot - Planar - 2DOF

% Dimensão da base.
H = 0.34;

% Coordenadas dos pontos de ancoragem.
A1 = [-H/2 -H/2];
A2 = [H/2 -H/2];
A3 = [H/2 H/2];
A4 = [-H/2 H/2];|

% Dimensão da "polia"
r = 0.019;

% Dimensões Iniciais dos cabos na posição X0 Y0
x = 0.0;
y = 0.0;
```

Além dos dados geométricos, foi necessário gerar uma trajetória de testes para o CDPR, sendo esta trajetória discretizada em relação ao espaço para obter o posicionamento do end effector para cada ponto da trajetória, fazendo o traçado com base no cálculo de distâncias entre pontos, tendo como resultado final o acionamento dos cabos e posterior traçado por parte do end effector. Os valores de ângulação θ dos cabos em relação a base, e os parâmetros de rotação β dos eixos dos motores para atuação dos cabos no posicionamento do robô foram todos implementados no algoritmo para a obtenção dos valores em tempo de execução e para comparação com os resultados obtidos no protótipo.

```

% Comprimento dos cabos
L01 = sqrt((x - A1(1))^2 + (y - A1(2))^2);
L02 = sqrt((x - A2(1))^2 + (y - A2(2))^2);
L03 = sqrt((x - A3(1))^2 + (y - A3(2))^2);
L04 = sqrt((x - A4(1))^2 + (y - A4(2))^2);

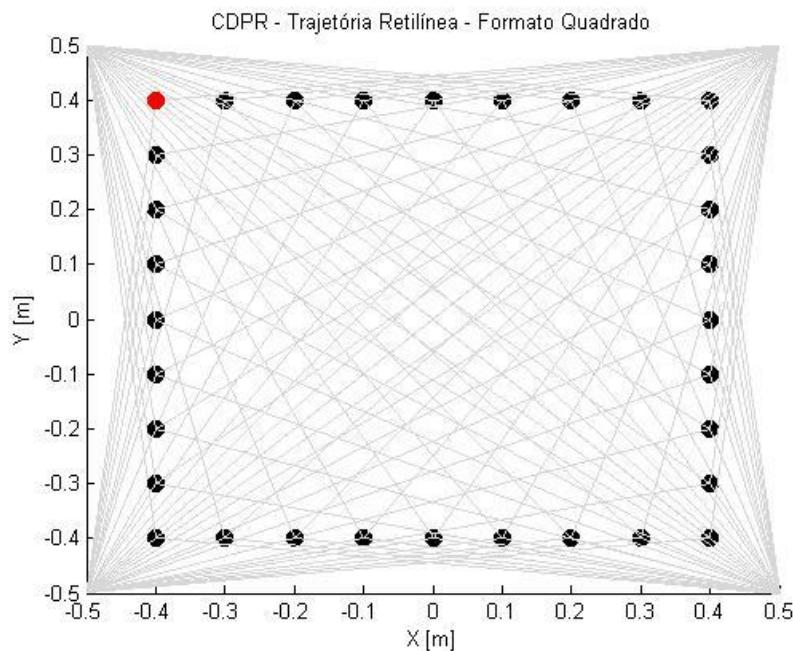
L1 = sqrt((x - A1(1))^2 + (y - A1(2))^2);
L2 = sqrt((x - A2(1))^2 + (y - A2(2))^2);
L3 = sqrt((x - A3(1))^2 + (y - A3(2))^2);
L4 = sqrt((x - A4(1))^2 + (y - A4(2))^2);

% Ângulo dos cabos
Tethal = radtodeg(atan((y - A1(2))/(x - A1(1)))); 
Tetha2 = radtodeg(atan((y - A2(2))/(x - A2(1)))); 
Tetha3 = radtodeg(atan((y - A3(2))/(x - A3(1)))); 
Tetha4 = radtodeg(atan((y - A4(2))/(x - A4(1))));
```

4.2. RESULTADOS OBTIDOS

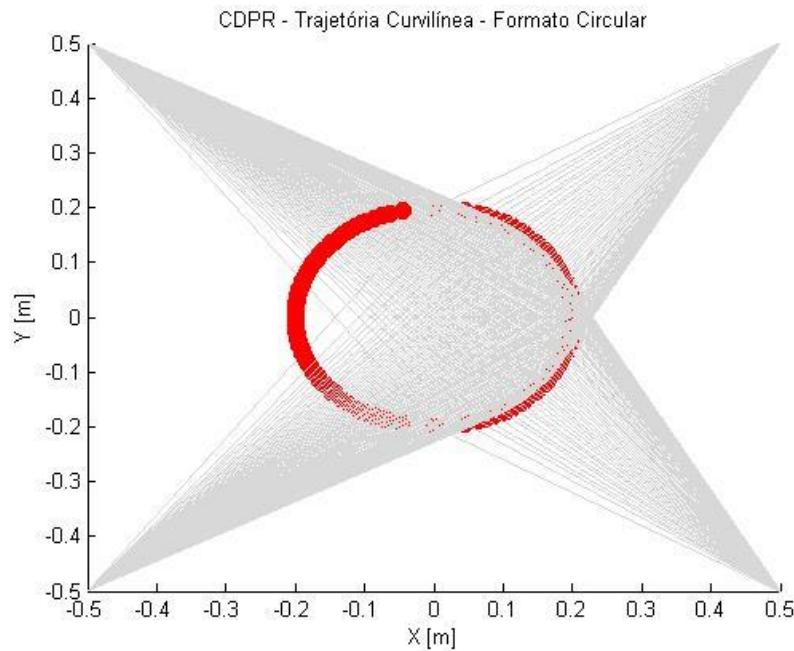
Através dos algoritmos implementados em MATLAB®, e através da implementação de trajetórias específicas foram obtidas algumas simulações de posicionamento do end effector seguindo os pontos das trajetórias, como seguem as figuras:

Figura 13 - Trajetória retilínea do end effector, com traçado em forma de quadrado, partindo e retornando ao ponto {-0.4 0.4}



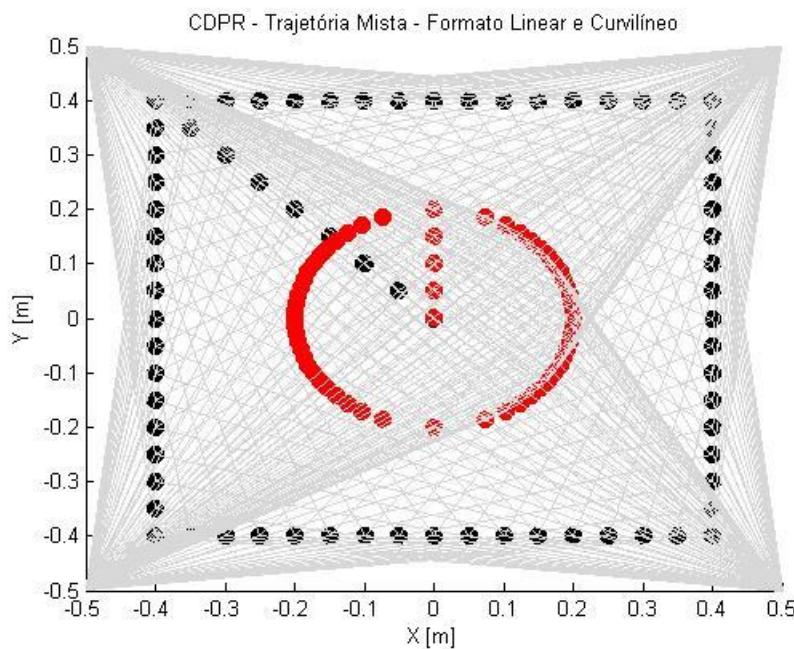
Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 14 - Trajetória curvilínea do end effector, com traçado em forma de circunferência, partindo e retornando ao ponto {0.0 0.2}



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 15 - Trajetória retilínea e curvilínea do end effector, com traçado em forma de quadrado e circunferência

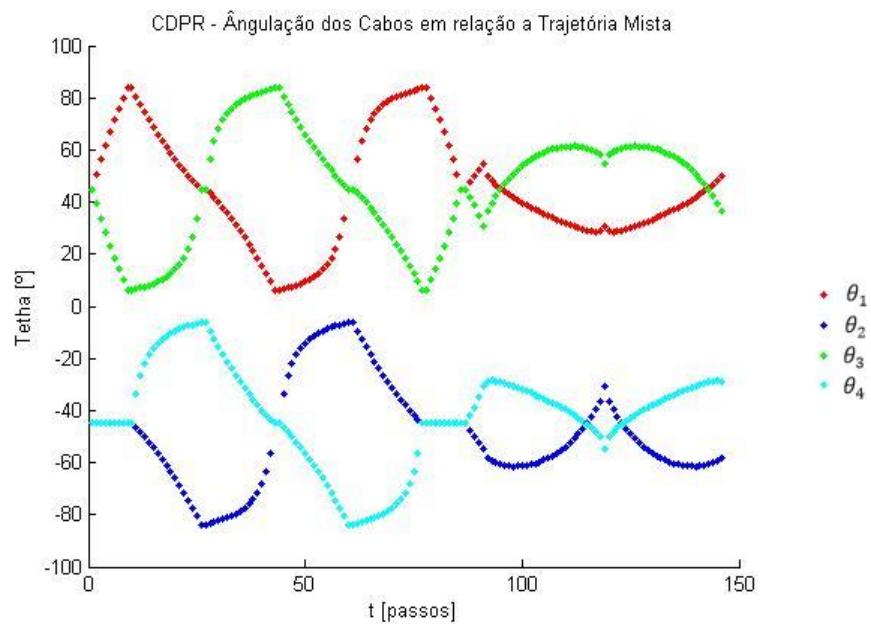


Fonte: Elaboração do Autor.

Para o caso acima, de trajetória mista, consistindo em uma mescla de movimento linear na diagonal, mais movimentos lineares em relação aos eixos XY, e o traçado da circunferência,

foram traçados os gráficos dos ângulos entre os cabos com a base, sendo denotado na figura 16 abaixo:

Figura 16 - Ângulos entre os cabos e a base fixa na trajetória mista

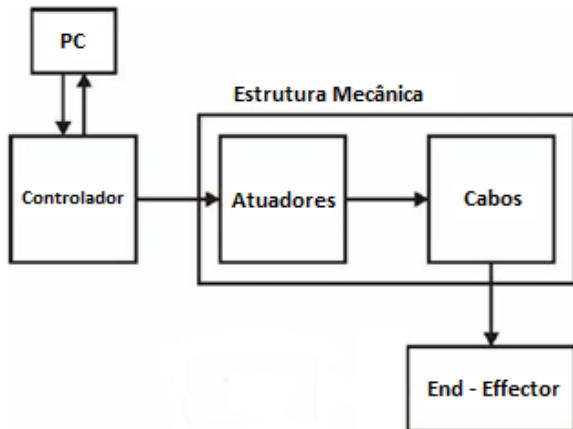


Fonte: Elaboração do Autor.

5. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo do CDPR de 2 GDL teve como base a modelagem matemática elaborada e a simulação implementada em MATLAB®, sendo o fluxo de atuação definido pelo diagrama abaixo:

Figura 17 - Diagrama de etapas de atuação do end effector do CDPR



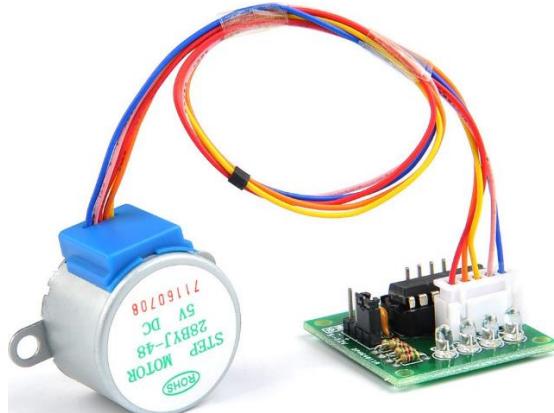
Fonte: Elaboração do Autor.

5.1. CÓDIGO DE ATUAÇÃO NO MICROCONTROLADOR

Para o controle e atuação do robô, foi implementado um algoritmo utilizando a IDE do Arduino, sendo utilizado o microcontrolador Arduino Mega 2560 como controlador central dos motores e a interface serial como interface entre o microprocessador e a API desenvolvida em C++ para o posicionamento do end effector.

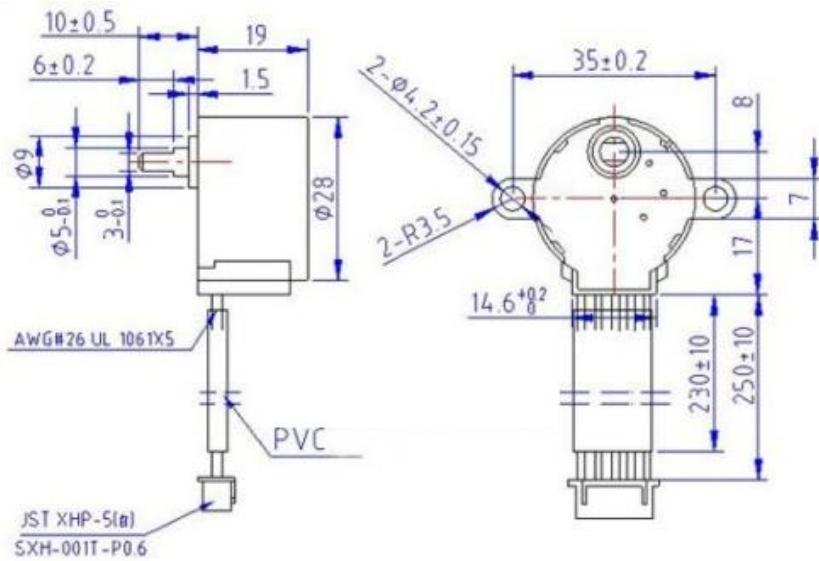
Para acionamento e manipulação dos cabos foram utilizados quatro motores de passo (“Step Motors”), modelo 28BYJ-48 junto a quatro drivers modelo ULN2003, como seguem as figuras com dimensões e configurações dos motores:

Figura 18 - : Motor de passo e driver utilizados no protótipo



Fonte: Disponível em <https://amzn.to/2TSdsHa>

Figura 19 - Dimensões do Motor de Passo 28BYJ-48



Fonte: Disponível em <http://robocraft.ru/files/datasheet/28BYJ-48>

Tabela 1 - Especificação do Motor de Passo 28BYJ-48

28BYJ-48
Tensão: 5VDC
Número de fase: 4
Número de vias: 5
Caixa de Redução: 1/64
Diâmetro do eixo: 5mm
Ângulo do Passo: 5,625°
Frequência: 100Hz
Resistência DC: 50Ω ± 7%(25°C)
Torque: 34,3 mN.m
Peso: 40g

Fonte: Elaboração do Autor.

Inicialmente no desenvolvimento do código de controle e manipulação dos motores, foi utilizada a biblioteca Stepper.h, sendo ela de fácil entendimento e controle, porém inviável para a aplicação do CDPR, tendo em vista a necessidade de acionamento e controle simultâneo de mais de uma motor de passo. A biblioteca em si possui diversas funções de acionamento para os motores de passo, porém devido sua implementação, a aplicação somente consegue controlar um motor por vez, devido ao travamento do Arduino quando em execução.

Após uma pesquisa sobre bibliotecas relacionadas a motores de passo, foi escolhida como biblioteca final para o controle e acionamento dos motores a biblioteca “AccelStepper.h” e “Math.h” em conjunto, sendo elas responsáveis pela definição dos pinos de conexão de sinais, definição das velocidades e atuação dos motores com base nos cálculos de posicionamento do end effector e angulação necessária dos eixos dos motores.

Como o motor tem um ângulo de passo fixado em 5.625° com uma caixa de redução de $\frac{1}{64}$, temos que a relação angulo-passos, é da casa de 0.0878° por passo, o que exige do motor executar um total de 4100 passos para completar uma volta completa no eixo.

```
//#include <Stepper.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <SPI.h>
#include <math.h>

// Nº de passos para 360° no eixo do motor
const int stepsPerRevolution = 4100;

// ##### SENTIDO ANTI HORÁRIO = + POSITIVO O VALOR DE GIRO #####
// ##### SENTIDO HORÁRIO = - NEGATIVO O VALOR DE GIRO #####

// Inicialização dos motores de passo nas portas digitais passadas como parâmetro
AccelStepper Motor_A1(8,6,8,7,9);
AccelStepper Motor_A2(8,10,12,11,13);
AccelStepper Motor_A3(8,2,4,3,5);
AccelStepper Motor_A4(8,24,28,26,30);
```

Tendo como base o esquemático do protótipo desenvolvido, foram implementados os dados gerais do CDPR, tendo como parâmetros as dimensões da base junto às coordenadas dos pontos de ancoragem dos motores, e as dimensões da “bobina” dos cabos, sendo eles definidos da forma:

```
// Dados Gerais do Cable Driven Parallel Robot - Planar - 2DOF
// Dimensão da base.
double H = 0.34;

// Coordenadas dos pontos de ancoragem.
double A1x = -H/2;
double A1y = -H/2;
double A2x = H/2;
double A2y = -H/2;
double A3x = H/2;
double A3y = H/2;
double A4x = -H/2;
double A4y = H/2;

// Dimensão das "polias iguais"
double r = 0.019;

// Variáveis dinâmicas de posição do end effector
double x=0;
double y=0;

//Variáveis do tipo string para tratamento e captura das coordendas de forma separada.
String ax;
String ay;
```

Dada a implementação das funções da biblioteca AccelStepper.h, é necessário fazer uma pré definição das características dos motores, sendo essa configuração realizada na função void setup(), presente em todo algoritmo utilizado via IDE do Arduino, da forma:

```
void setup()
{
    //Define entrada para visualização no plotter serial
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Digite as coordenadas X e Y de destino do end effector: ");
    //Determina a velocidade inicial dos motores
    Motor_A1.setMaxSpeed(1000.0);
    Motor_A1.setAcceleration(1000.0);
    Motor_A1.setSpeed(1000);
    Motor_A1.moveTo(4100); // 2048 = 1 revolution

    Motor_A2.setMaxSpeed(1000.0);
    Motor_A2.setAcceleration(1000.0);
    Motor_A2.setSpeed(1000);
    Motor_A2.moveTo(4100); // 2048 = 1 revolution

    Motor_A3.setMaxSpeed(1000.0);
    Motor_A3.setAcceleration(1000.0);
    Motor_A3.setSpeed(1000);
    Motor_A3.moveTo(4100); // 2048 = 1 revolution

    Motor_A4.setMaxSpeed(1000.0);
    Motor_A4.setAcceleration(1000.0);
    Motor_A4.setSpeed(1000);
    Motor_A4.moveTo(4100); // 2048 = 1 revolution
}
```

Com base na modelagem geométrica realizada no capítulo 03, foram implementadas as equações para cálculo dos ângulos dos eixos para posicionamento do end effector, sendo implementadas as funções de cálculos de ângulo dos cabos em relação a base cartesiana, as normas dos vetores de posição (cabos) e os ângulos de rotação dos eixos, da forma:

```
// ##### Processo Iterativo de Calculo #####
// Comprimento dos cabos na posição especificada
double L1 = sqrt(pow((x - A1x), 2) + pow((y - A1y), 2));
double L2 = sqrt(pow((x - A2x), 2) + pow((y - A2y), 2));
double L3 = sqrt(pow((x - A3x), 2) + pow((y - A3y), 2));
double L4 = sqrt(pow((x - A4x), 2) + pow((y - A4y), 2));

// Ângulo dos cabos na posição especificada
double Tethal = ((atan((y - A1y)/(x - A1x)))*(180/PI));
double Theta2 = ((atan((y - A2y)/(x - A2x)))*(180/PI));
double Theta3 = ((atan((y - A3y)/(x - A3x)))*(180/PI));
double Theta4 = ((atan((y - A4y)/(x - A4x)))*(180/PI));

// Ângulo de giro dos motores para posicionamento do end effector
double Betal = ((l/r)*(L01 - sqrt(pow((x - A1x), 2) + pow((y - A1y), 2)))*(180/PI));
double Beta2 = ((l/r)*(L02 - sqrt(pow((x - A2x), 2) + pow((y - A2y), 2)))*(180/PI));
double Beta3 = ((l/r)*(L03 - sqrt(pow((x - A3x), 2) + pow((y - A3y), 2)))*(180/PI));
double Beta4 = ((l/r)*(L04 - sqrt(pow((x - A4x), 2) + pow((y - A4y), 2)))*(180/PI));

aciona_motores(Betal,Beta2,Beta3,Beta4);
```

A função aciona_motores() tem como função principal o acionamento dos motores de forma individual, através da chamada da função ang2pas() de cálculo de transformação entre ângulo em Graus para a quantidade relativa em passos (steps) no motor, da forma:

```
void aciona_motores( double Beta1,double Beta2,double Beta3, double Beta4)
{
    double Pas1, Pas2, Pas3, Pas4;

    // Conversão entre os ângulos de polia calculados para a quantidade passos
    Pas1 = ang2pas(Beta1);
    Pas2 = ang2pas(Beta2);
    Pas3 = ang2pas(Beta3);
    Pas4 = ang2pas(Beta4);

    // Gira os motores com base no valor dos ângulos calculados para o ponto destino do end effector

    Motor_A1.moveTo(Pas1);
    Motor_A1.run();
    Motor_A2.moveTo(Pas2);
    Motor_A2.run();
    Motor_A3.moveTo(Pas3);
    Motor_A3.run();
    Motor_A4.moveTo(Pas4);
    Motor_A4.run();

}

double ang2pas(double Beta)
{
    return ((Beta*4100)/360);
}
```

No contexto do código na IDE do arduino, foi implementa a funcionalidade de recepção de dados via porta serial para referenciamento da coordenada de destino do end effector, sendo ela baseada em uma captura de String de forma única, em série com uma divisão de caracteres e posterior conversão para o formato Double para fins de cálculo e posicionamento, da forma:

```
// ##### Processo Iterativo de Captura de Coordenadas #####
while(Serial.available())
{
    // Variável de captura das coordenadas - Formato: [sinal]X.XX[sinal]Y.YY
    inputString = Serial.readString();
    ax = inputString.substring(0,5);
    Serial.println("\nX = " + ax);
    ay = inputString.substring(5,10);
    Serial.println("Y = " + ay);
    x = ax.toDouble();
    y = ay.toDouble();
}
```

A interface usuário – máquina, responsável pela troca de informações foi realizada através do acesso via monitor serial com o arduino, sendo as informações trocadas via terminal.

Figura 20 - Comunicação Serial para informação de Coordenadas.

```
Digitas as coordenadas X e Y de destino do end effector: - Formato [sinal]X.XX[sinal]Y.YY
X = +0.05
Y = +0.05
X = -0.12
Y = +0.09
X = +0.01
Y = -0.14
```

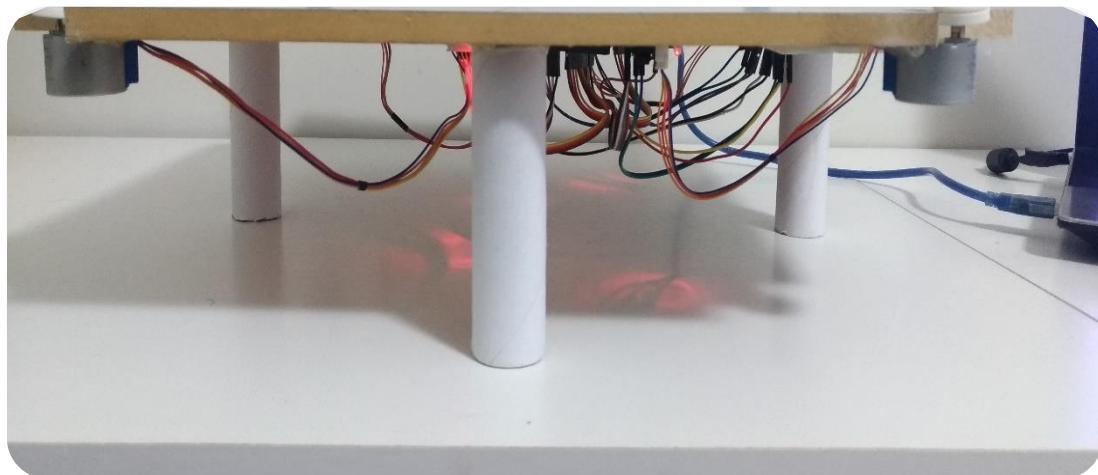
Fonte: Elaboração do Autor.

O formato da mensagem foi definido de forma a se ter a informação completa tanto de sinais como os valores numéricos todos em uma unica string, sendo a string definida com tamanho máximo igual a 10 caracteres, com formato: **[sinal]X.XX[sinal]Y.YY**, sendo obrigatório o preenchimento de todos os campos.

5.2. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a fixação dos motores e componentes eletrônicos foi escolhida uma base rígida de madeira com 0.116 m^2 , correspondendo a um quadrado de lados $0.34 \times 0.34\text{ m}$. Na parte inferior da base foram fixados todos os componentes eletrônicos do CDPR, incluindo os motores, drivers, microcontrolador Arduino, protoboard para ligações elétricas, assim como três “pés” de sustentação do CDPR, como segue a figura abaixo:

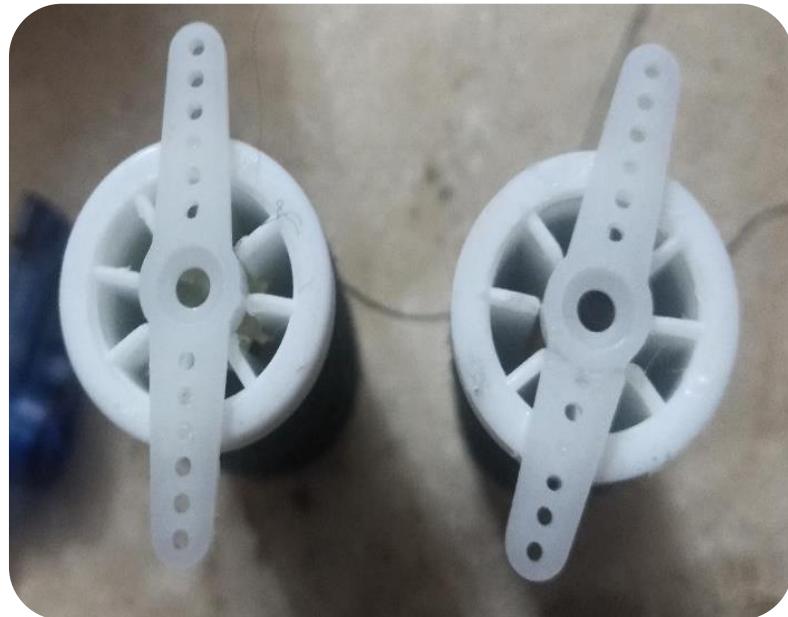
Figura 21 - Base do protótipo com componentes e suportes



Fonte: Elaboração do Autor.

Para a finalização da construção do protótipo, foi necessária a escolha de um sistema de “bobinas” e cabos, sendo escolhido carretéis de linha de costura devido sua baixa massa e valor. A fixação dos carretéis aos eixos dos motores de passo foi possível graças ao acoplamento de um sistema de hélices nas bases dos carretéis, e graças ao aumento dos furos centrais das hélices, até obter um ajuste interferente no acoplamento eixo – hélice/carretel, como ilustra as figuras abaixo:

Figura 22 - Fixação Hélice - Carretel.



Fonte: Elaboração do Autor.

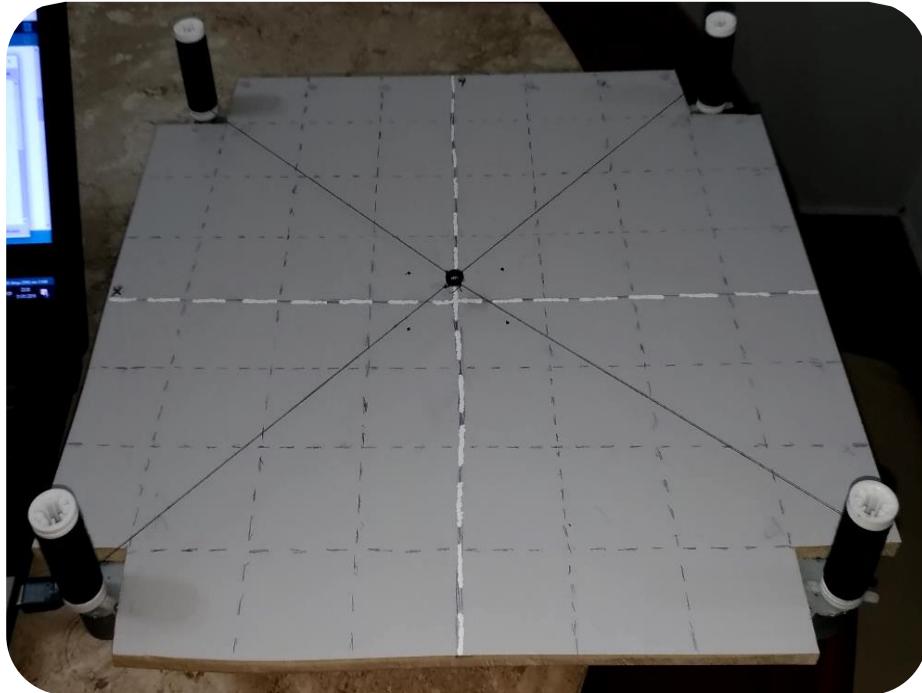
Figura 23 - Fixação Hélice/Carretel – Eixo do Motor.



Fonte: Elaboração do Autor.

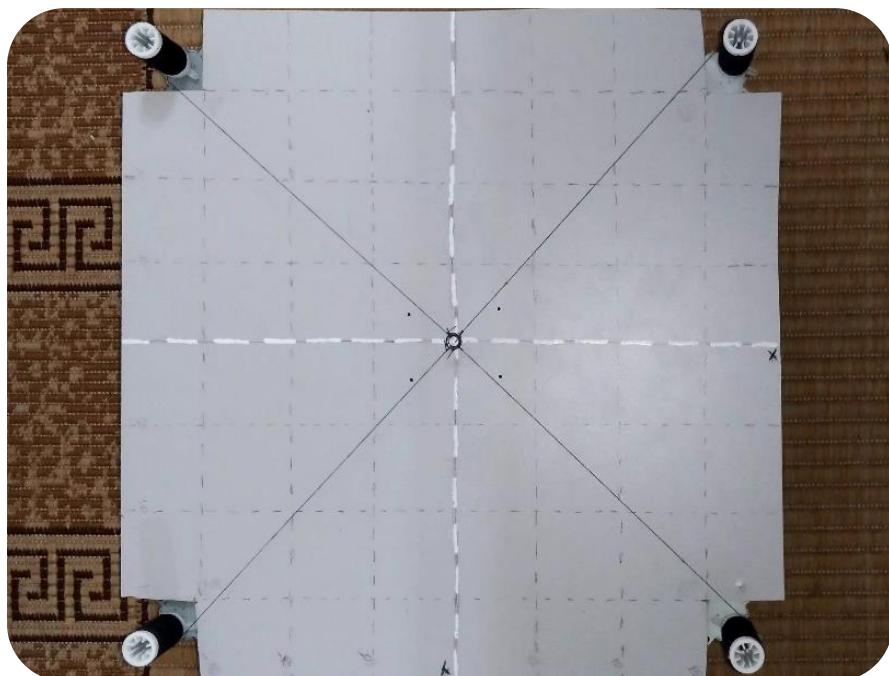
O end effector foi definido na modelagem como um ponto central de ligação dos cabos, sendo utilizado na prática um “anel” para fixação das linhas, representando o end effector. O protótipo final do CDPR construído pode ser visto na figura abaixo:

Figura 24 - Protótipo final do CDPR Planar – Posição Home



Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 25 - Protótipo final do CDPR Planar – Posição (0.05 , 0.05)



Fonte: Elaboração do Autor.

5.3. RESULTADOS OBTIDOS: COMPARAÇÃO TEÓRICA x REAL

A fim de verificar a operação do protótipo e comparar o cenário teórico em relação ao prático foram calculados alguns valores de comprimento dos cabos, e os ângulos em relação a base fixa. Algumas coordenadas foram simuladas através do código em MATLAB, sendo os parâmetros de comprimento e ângulo utilizados como base de comparação e de operação desejada para o posicionamento do end effector, e através de medidas diretas no CDPR foram obtidos os ângulos e comprimentos dos cabos para os mesmos pontos simulados, sendo possível correlacionar os dados, da forma:

Tabela 2 - Valores Teóricos de comprimento dos cabos - Simulação

	(X,Y)				
	(0 , 0)	(0.05 , 0.05)	(0.1 , 0.1)	(0.14 , 0.14)	(0.05 , 0.1)
L_1 (m)	0,2404	0,3111	0,3818	0,4384	0,3483
L_2 (m)	0,2404	0,2506	0,2789	0,3114	0,2955
L_3 (m)	0,2404	0,1697	0,099	0,0424	0,1389
L_4 (m)	0,2404	0,2506	0,2789	0,3114	0,2309

Tabela 3 - Valores Teóricos de ângulos dos cabos - Simulação

	(X,Y)				
	(0 , 0)	(0.05 , 0.05)	(0.1 , 0.1)	(0.14 , 0.14)	(0.05 , 0.1)
θ_1 (°)	45	45	45	45	50,8263
θ_2 (°)	45	61,3895	75,4655	84,4725	66,0375
θ_3 (°)	45	45	45	45	30,2564
θ_4 (°)	45	28,6105	14,5345	5,5274	17,6501

Tabela 4 - Valores Práticos de comprimentos dos cabos - Operação

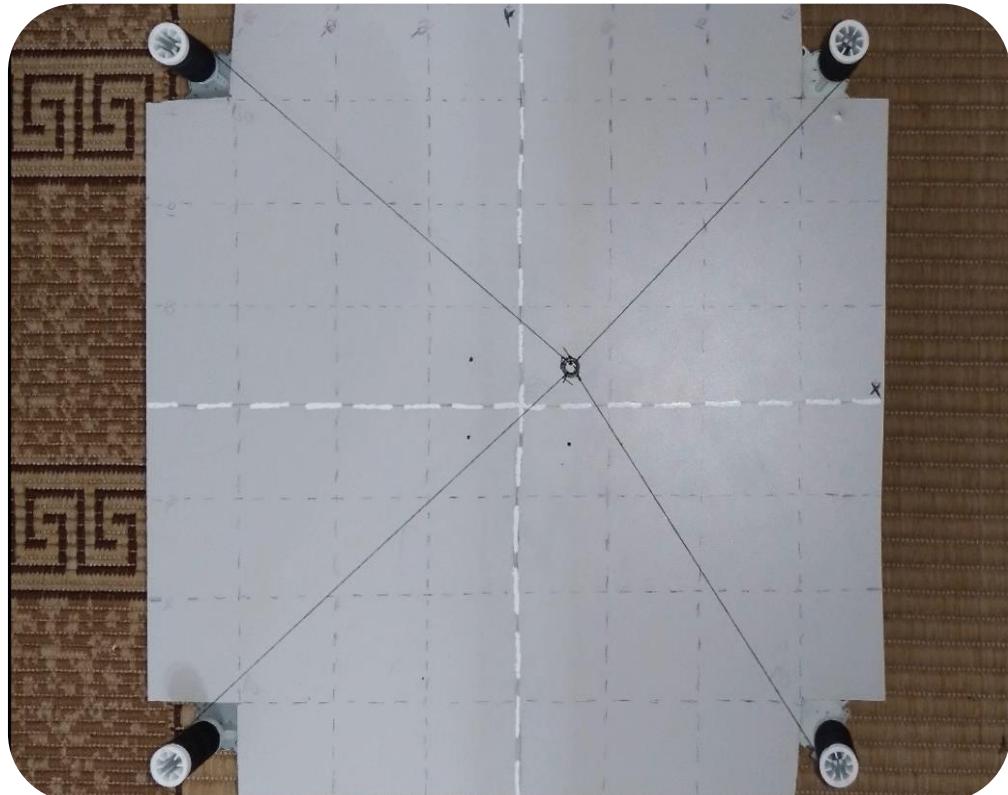
	(X,Y)				
	(0 , 0)	(0.05 , 0.05)	(0.1 , 0.1)	(0.14 , 0.14)	(0.05 , 0.1)
L_1 (m)	0,24	0,275	0,323	0,346	0,29
L_2 (m)	0,24	0,258	0,273	0,317	0,254
L_3 (m)	0,24	0,205	0,176	0,152	0,198
L_4 (m)	0,24	0,235	0,221	0,206	0,234

Tabela 5 - Valores Práticos de ângulos dos cabos - Operação

	(X,Y)				
	(0 , 0)	(0.05 , 0.05)	(0.1 , 0.1)	(0.14 , 0.14)	(0.05 , 0.1)
θ_1 (°)	45	50,5	51,7	55,9	48,6
θ_2 (°)	45	54,8	59,1	62,5	60,5
θ_3 (°)	45	43,6	39,6	27,4	44,5
θ_4 (°)	45	33,8	27,8	17,2	31,1

Através da correlação das medições acima e evidenciado visualmente no protótipo, ficou clara a presença de erros no posicionamento e consequente comprimentos e ângulos dos cabos, sendo o erro proporcional a distância da posição “home” (0.0 , 0.0). O end effector estando delimitado pelas posições 0.05 [m] em todos os quadrantes e eixos tem um **erro** aproximado na casa de **19%** no posicionamento, para valores maiores no posicionamento o erro aumentou consideravelmente, chegando aproximadamente na casa de **32%**.

Figura 26 - Erro de posicionamento do end effector – Posição (0.05 , 0.05)

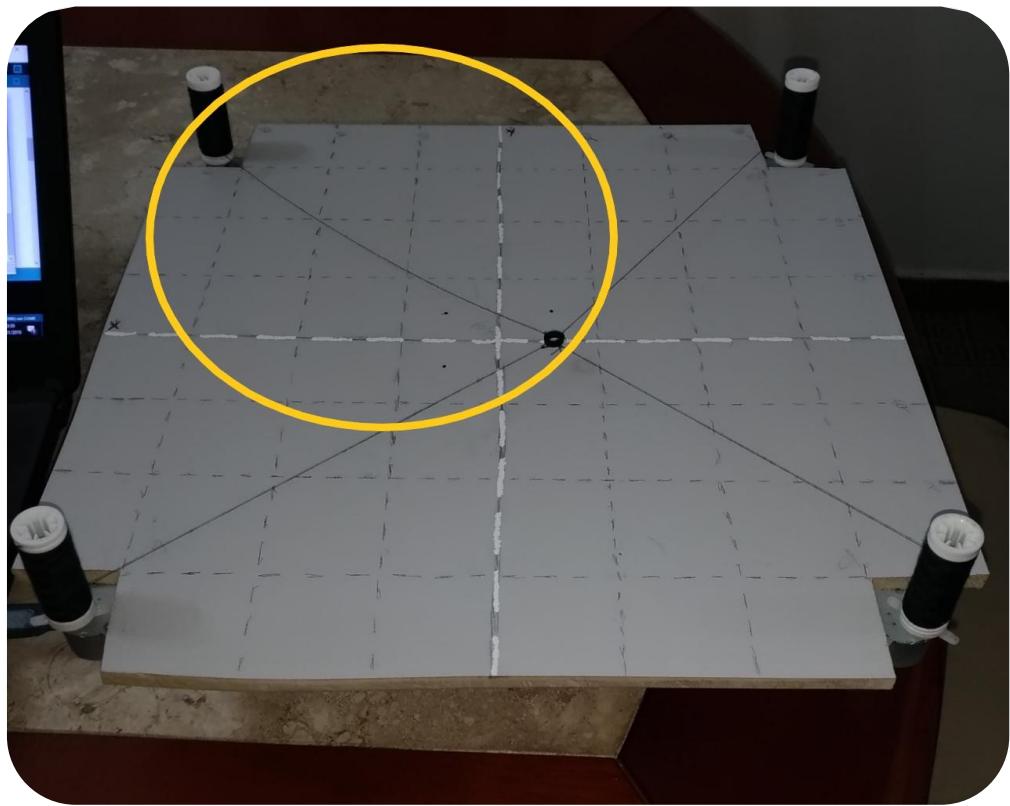


Fonte: Elaboração do Autor.

Em posições mais distantes das coordenadas “home”, o posicionamento não correspondeu ao esperado, havendo erros em relação aos giros dos motores, e consequente posicionamento do end effector, sendo evidenciado o “patinamento” das bobinas acopladas aos eixos dos motores, devido a geração de momentos nos carretéis causados pelos demais motores tracionando as linhas.

Outro problema encontrado foi no controle dos motores de forma síncrona em relação ao tempo de operação, havendo alguns casos em que o movimento de dois motores eram encerrados enquanto os outros dois restantes ainda estavam operando. Este problema foi encontrado devido a diferença de angulação necessária para os diferentes motores afim de atingir um ponto específico no espaço de trabalho do CDPR. Essa condição causou uma perda de tração na linha correspondente aos motores com funcionamento interrompido anteriormente aos demais.

Figura 27 - Exemplo de perda de tração em uma das linhas



Fonte: Elaboração do Autor.

6. CONCLUSÃO

Através do desenvolvimento do protótipo do CDPR, foi possível verificar as dificuldades relacionadas ao desenvolvimento de produtos, passando por diversas partes pertinentes ao desenvolvimento e implementação. A elaboração dos estudos teóricos e revisão bibliográfica foi de suma importância para o entendimento do contexto de execução do robô, e para a abordagem correta na execução da modelagem matemática do robô, bem como na implementação do algoritmo de atuação e construção física.

Através do trabalho, se tornou mais claro e evidente a importância e o cenário promissor que esta classe de robôs carregam, sendo aplicável em diversos cenários industriais, otimizando o transporte de cargas sensíveis, bem como facilitando e promovendo uma maior segurança na execução de tarefas que muitas das vezes gerariam riscos a seres humanos.

Por fim, espera-se que o trabalho em questão também sirva como alicerce para promover a discussão e incentivo de robôs atuados a cabos no Brasil e na Academia, sendo este um assunto com pouca visibilidade e desenvolvimento no atual cenário educacional do país.

7. TRABALHOS FUTUROS E RECOMENDAÇÕES

Ao final do trabalho, e com base em tudo que foi desenvolvido e todos os problemas encontrados, algumas recomendações para trabalhos futuros são plausíveis de ser indicadas como parâmetros de futuros estudos e de escolhas de projeto, como por exemplo a escolha de um sistema de cabos mais eficiente em relação a tração e que tenha uma maior tenacidade e maior tensão de ruptura.

Outro fator importante a se levar em conta em futuros projetos na área, está na possibilidade de fabricação de um sistema de bobinas mais específicas, que garantam um acoplamento interferente com maior resistência em relação a momentos ocasionados devido a tração gerada nos cabos, de modo que seja garantida a execução correta e alinhada do sistema motor-bobina, e que consequentemente garanta um melhor e mais eficiente posicionamento do end effector.

Tendo em vista a forma como foi proposto o projeto e a modelagem geométrica utilizada tanto na modelagem matemática como no posicionamento do end effector, como próximos passos, seria ideal realizar o desenvolvimento e parametrização do CDPR realizando um estudo da dinâmica envolvida no CDPR, envolvendo aplicação de teorias de controle, para implementar um controle ótimo em termos de posicionamento e de velocidade de operação, garantindo uma melhor sincronia entre as execuções dos motores de forma paralela.

8. BIBLIOGRAFIA

1. G. Barette and C.M. Gosselin, 2000, “*Kinematic Analysis and Design of Planar Parallel Mechanisms Actuated with Cables*”, ASME Design Technical Conferences, Baltimore, MD.
2. R.L. Williams II and P. Gallina, 2002, “*Planar Cable-Direct-Driven Robots: Design for Wrench Exertion*”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 35(2): 203-219.
3. Ottaviano, Erika et al. “*A Low-Cost Easy Operation 4-Cable Driven Parallel Manipulator.*” *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2005): 4008-4013.
4. Bayani, Hassan et al. “*On the control of planar cable-driven parallel robot via classic controllers and tuning with intelligent algorithms.*” *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)* (2015): 623-628.
5. González Alvarez, Natalia Ximena, and Marco Alexander Carpio Alemán. *Desarrollo De Un Entorno De Simulación Para Un Robot Paralelo Activado Por Ocho Cables.* 2017.
6. Russ, Dolores H. et al. “*Planar Cable Direct Driven Robot : Hardware Implementation.*” (2003).
7. G. Barrette and C. Gosselin, “*Kinematic Analysis And Design Of Planer Parallel Mechanisms Actuated With Cables*”, *ASME 2000, Proceedings of DETC'00, DETC2000/MECH-14091*
8. Montgomery, F. & Vaughan, J. (2016). *Modeling and Control of a Cable-Driven Robot for Inspection of Wide-Area Horizontal Workspaces*, *Proceedings of the ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference DSAC2016 October 12-14, 2016, Minneapolis, Minnesota, USA* (pp. 1-7). DSAC2016-9678