

Desenvolvimento de um robô de cadeia cinemática fechada em topologia Delta

Rodrigo Martini Riboldi¹ e Vítor Tumelero Valente²

TCC2 - Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha.
Farroupilha, Brasil

¹rodrigo.riboldi@gmail.com, ²vitor.valente@farroupilha.ifrs.edu.br

Resumo—Este trabalho corresponde ao Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS - Campus Farroupilha e tem por objetivo apresentar as características e passos iniciais a serem abordados para o desenvolvimento de um robô de arquitetura paralela de topologia Delta com três graus de liberdade, mais um grau de liberdade da ferramenta, para a função de pegar e reposicionar objetos. O robô teve seu projeto baseado na topologia original de um manipulador paralelo do tipo Delta de revolução desenvolvida por Reymond Clavel, sendo composto por três elos atuados por motores que movimentam uma plataforma móvel nos eixos X , Y e Z . Este documento descreve também sobre como ocorreu a construção de um protótipo funcional, integrando os passos de construção mecânica, eletrônica, e sistema de controle de um manipulador e apresenta as rotinas de testes executadas e os resultados obtidos.

Palavras-chave — Robótica, Arquitetura paralela, Cadeia cinemática fechada, Delta.

I. INTRODUÇÃO

Manipuladores paralelos, ou de cadeia cinemática fechada, recebem este nome devido ao posicionamento dos elos e atuadores que encontram-se dispostos em paralelo, criando pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes entre a ferramenta de trabalho e a base do robô [1] [2]. Os robôs de cadeia cinemática fechada normalmente apresentam maior rigidez e baixa inércia em relação aos de cadeia cinemática aberta. Porém, apresentam espaço de trabalho reduzido e modelos complexos cuja resolução dos cálculos de cinemática apresentam múltiplas soluções, requerendo maior processamento computacional [3]. Dentre as topologias de manipuladores paralelos, destaca-se a topologia Delta, desenvolvida por Reymond Clavel na década de 1980 [4], cujos elementos podem ser observados na Fig. 1. Dentre as principais características deste robô, destacam-se o fato de que a base móvel sempre permanece paralela em relação à base fixa e que o robô possui três juntas ativas, movimentadas por motores, e seis juntas passivas localizadas nas extremidades do segundo elo de cada um dos braços do manipulador.

A aplicação mais difundida de manipuladores paralelos de topologia Delta é a de embalagem de produtos e tarefas de pegar e reposicionar objetos, graças a sua alta velocidade e precisão, permitindo inclusive a manipulação de objetos frágeis [5]. O desenvolvimento de um manipulador dessa topologia torna-se relevante para a automatização, tendo em vista que a indústria brasileira carece desse tipo de tecnologia.

No ano de 2016 o Brasil adquiriu apenas 1207 manipuladores robóticos. As projeções de aquisição para até 2020 são de apenas 9300 unidades, valor muito abaixo em relação a países asiáticos e europeus, onde, apenas no ano de 2016 a China adquiriu 87000 unidades e a Alemanha cerca de 20000 [6].

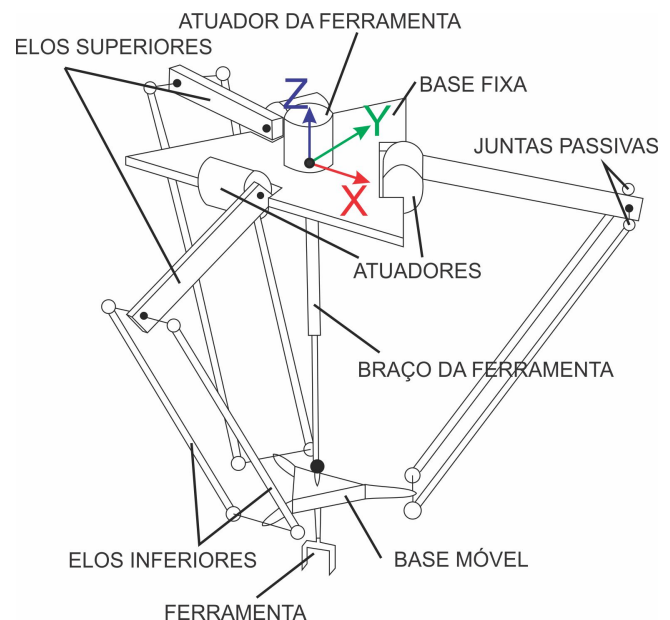


Fig. 1: Design original do robô Delta de Clavel. Adaptado de [7].

A maioria dos estudos localizados referentes a esta topologia de robô trabalham separadamente as partes do desenvolvimento de um manipulador. Esse trabalho tem como objetivo integrar os passos iniciais para o desenvolvimento de um robô de arquitetura paralela do tipo Delta com três graus de liberdade, mais um grau de liberdade do efetuador para aplicações de pegar e reposicionar objetos. Essa integração compreende a resolução da cinemática, estudo de singularidades e do espaço de trabalho e, para a comparação com os cálculos teóricos, a construção de um protótipo funcional em escala reduzida controlado por uma interface gráfica através de um computador.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cinemática é definida como o estudo do conjunto de relações entre posições, velocidades e acelerações dos elos

e juntas de um manipulador. A análise cinemática de um robô é válida apenas para corpos rígidos e é subdividida em cinemática direta e inversa. A cinemática direta busca solucionar a posição e orientação final da ferramenta de trabalho a partir dos valores das variáveis de junta do manipulador. Já, a cinemática inversa determina o valor das variáveis de junta, dada uma posição e orientação do efetuador [8].

Em [9], apresenta o equacionamento das cinemáticas inversa e direta para os três graus de liberdade de manipuladores do tipo Delta, além de indicar quais as singularidades ocorrem em sua resolução e os cálculos para a geração de trajetórias.

O espaço de trabalho é dividido por [10] em dois tipos: Espaço de trabalho alcançável e espaço de trabalho hábil. O primeiro é definido como o volume no espaço no qual a ferramenta do manipulador pode atingir com uma orientação fixa, e o segundo, como o volume no espaço no qual a ferramenta do manipulador pode atingir, com todas as orientações possíveis. Assim, uma dada posição só será válida se estiver contida dentro deste volume ou, em outros termos, se a cinemática direta e/ou inversa fornecerem soluções válidas. Em manipuladores de arquitetura paralela, as movimentações são restringidas por limites mecânicos nas juntas passivas, possíveis colisões com a estrutura, limitação dos atuadores e posições de singularidade [5].

No trabalho [11], é destacada a dificuldade e a alta carga computacional para obter-se graficamente o espaço de trabalho de manipuladores paralelos e sugere um algoritmo para otimizar a velocidade e a eficiência dessa operação, além de apresentar a convenção cinemática utilizada. Por fim, conclui que o método apresentado foi eficiente, minimizando o tempo de obtenção do espaço de trabalho em relação aos métodos tradicionais.

Em [12], é apresentado através de algoritmos genéticos, uma forma otimizada de dimensionar os componentes mecânicos de um robô do tipo Delta a partir de um espaço de trabalho predefinido. Onde conseguiu-se obter o menor tamanho de robô possível para atender ao espaço de trabalho predefinido.

Configurações singulares em robôs paralelos são definidas em [5] como posições no espaço de trabalho onde o robô pode perder sua rigidez ou onde a ferramenta de trabalho têm incontáveis graus de liberdade. É de suma importância o seu estudo para evitar problemas na utilização prática do robô. Ainda, os dois principais problemas citados pelo autor são problemas de controle da ferramenta de trabalho, pois a ferramenta possui incontáveis graus de liberdade ao atingir essas posições e problemas relacionados a segurança, sendo que os elos do manipulador podem perder sua rigidez em posições singulares e caso sejam submetidos à altos esforços, podem entrar em colapso.

Em [13], é apresentada uma análise de desempenho de um manipulador do tipo Delta baseado nas equações de cinemática e matrizes de Jacobiano, concluindo com as melhores configurações e posições para o trabalho do robô para evitar posições singulares e otimizar a execução de trajetórias.

No trabalho [14], apresenta-se o desenvolvimento de um robô do tipo Delta, passando pelos passos de resolução cinemática, dimensionamento e simulações mecânicas dos componentes, obtenção do espaço de trabalho e análises de ve-

locidade com modelos de Jacobiano. O resultado dos cálculos foi validado com a aplicação prática em um protótipo e a verificação de movimentação do mesmo.

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir serão apresentados os tópicos abordados para o desenvolvimento de um robô do tipo Delta, sendo divididos em Cinemática, Espaço de Trabalho e Singularidades.

A. Cinemática

O equacionamento da cinemática para robôs do tipo Delta utilizado neste estudo é apresentado por [9] e será abordado nesta seção. As Fig. 2, 3 e 4 indicam a convenção dos sistemas de referência (X, Y, Z) e elos utilizada ao longo do projeto. Os parâmetros L_i , l_i e θ_i são respectivamente o tamanho do elo superior, do elo inferior e o ângulo de rotação da junta, onde $i = 1, 2, 3$ representando cada um dos elos.

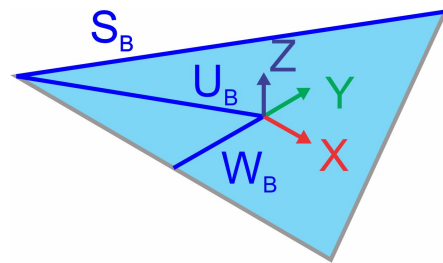


Fig. 2: Diagrama cinemático da base fixa (B) do robô Delta.

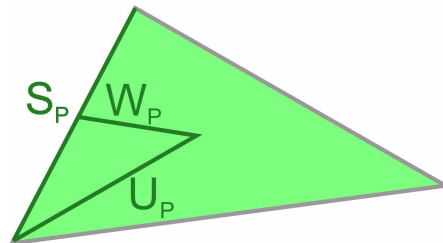


Fig. 3: Diagrama cinemático da base móvel (P) do robô Delta.

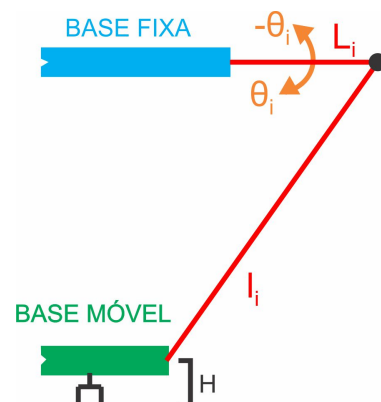


Fig. 4: Diagrama cinemático dos elos do robô Delta.

1) *Cinemática Inversa*: Como o comprimento de ambos os superiores e inferiores são iguais entre si, pode-se simplificar os seguintes parâmetros:

$$L = L_1 = L_2 = L_3 \quad (1)$$

$$l = l_1 = l_2 = l_3 \quad (2)$$

A solução da cinemática inversa passa pela representação dos elos em um mesmo sistema de referência, isto é, o sistema da base fixa. A partir da determinação do ponto da ferramenta (x, y, z) , define-se as variáveis intermediárias de (3) a (15).

$$a = W_b - U_p \quad (3)$$

$$b = \frac{S_p}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} W_b \quad (4)$$

$$c = W_p - \frac{1}{2} W_b \quad (5)$$

$$z' = z - H \quad (6)$$

$$E_1 = 2L(y + a) \quad (7)$$

$$F_1 = F_2 = F_3 = 2z'L \quad (8)$$

$$G_1 = x^2 + y^2 + Z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 \quad (9)$$

$$E_2 = -L[\sqrt{3}(x + b) + y + c] \quad (10)$$

$$G_2 = x^2 + y^2 + Z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(xb + yc) - l^2 \quad (11)$$

$$E_3 = L[\sqrt{3}(x - b) - y - c] \quad (12)$$

$$G_3 = x^2 + y^2 + z'^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(-xb + yc) - l^2 \quad (13)$$

Resultando em:

$$t_{i(1,2,3)} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad (14)$$

$$\theta_i = 2 \tan^{-1}(t_{i(1,2,3)}) \quad (15)$$

Assim, observa-se que existem duas soluções válidas para cada um dos ângulos de junta, uma positiva e uma negativa. Tratando-se de três ângulos, pode-se chegar a uma combinação de oito diferentes soluções [9]. A solução positiva da raiz quadrada fisicamente significa que a junção (ou joelho) dos elos de movimentação ficarão posicionadas para o lado externo do robô conforme representado na Fig. 1. Esta é a solução utilizada na programação, pois a escolha da solução negativa provocaria colisões com a base fixa do robô, limitando então o resultado para apenas uma solução.

2) *Cinemática Direta*: A solução da cinemática direta para manipuladores paralelos é geralmente mais complexa em relação aos manipuladores seriais, devido a necessidade de solucionar múltiplas equações algébricas não-lineares. Neste caso, para determinar a posição da ferramenta utiliza-se o algoritmo das esferas virtuais [9]. É possível determinar o centro da esfera virtual por meio de (16) a (18). Resolvendo algebricamente para cada um dos ângulos, obtém-se:

$${}^B A_{1v} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -W_b - L \cos \theta_1 + U_p \\ -L \sin \theta_1 \end{array} \right\} \quad (16)$$

$${}^B A_{2v} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\sqrt{3}}{2}(W_b + L \cos \theta_2) - \frac{S_p}{2} \\ \frac{1}{2}(W_b + L \cos \theta_2) - W_p \\ -L \sin \theta_2 \end{array} \right\} \quad (17)$$

$${}^B A_{3v} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{\sqrt{3}}{2}(W_b + L \cos \theta_3) + \frac{S_p}{2} \\ \frac{1}{2}(W_b + L \cos \theta_3) - W_p \\ -L \sin \theta_3 \end{array} \right\} \quad (18)$$

O raio da esfera será o comprimento do elo de ligação entre o joelho e a base (l). Assim, as esferas 1, 2 e 3 podem ser representadas por um centro e um raio, ou seja, $(\{{}^B A_{iv}\}, l)$, onde x_i, y_i, z_i são as componentes de ${}^B A_{iv}$. A Fig. 5 demonstra visualmente a aplicação do algoritmo, podendo ser observada a intersecção das circunferências na posição da ferramenta. Ainda segundo [9], (19) a (36) descrevem a resolução desse algoritmo.

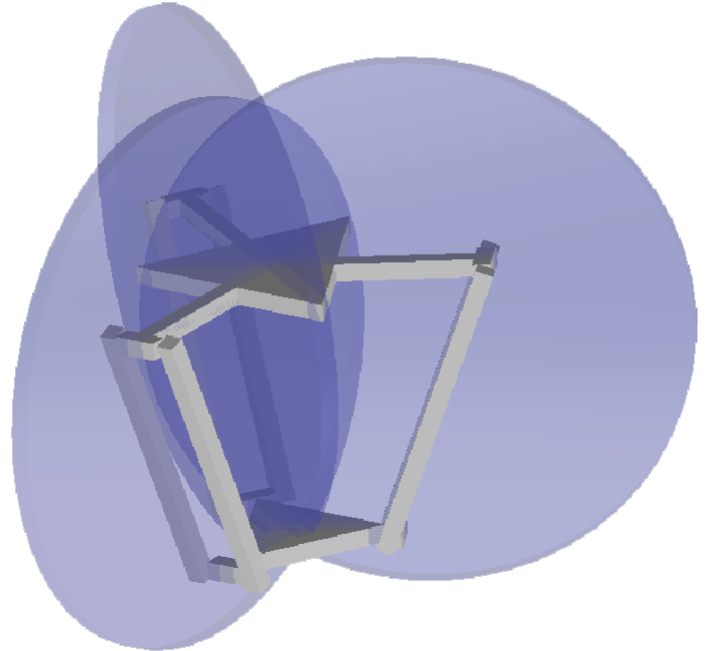


Fig. 5: Exemplificação do algoritmo das esferas virtuais.

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (19)$$

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (20)$$

$$r_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (21)$$

Onde r_1, r_2 e r_3 são os raios de cada uma das esferas. Para prosseguir, faz-se necessário a definição das variáveis intermediárias a_1 até a_9 , a , b e c para simplificar o entendimento do processo.

$$a_1 = r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (22)$$

$$a_2 = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (23)$$

$$a_3 = \frac{2(x_3 - x_1)}{2(z_3 - z_1)} - \frac{2(x_3 - x_2)}{2(z_3 - z_2)} \quad (24)$$

$$a_4 = \frac{2(y_3 - y_1)}{2(z_3 - z_1)} - \frac{2(y_3 - y_2)}{2(z_3 - z_2)} \quad (25)$$

$$a_5 = \frac{a_2}{2(z_3 - z_2)} - \frac{a_1}{2(z_3 - z_1)} \quad (26)$$

$$a_6 = -\frac{a_4}{a_3} \quad (27)$$

$$a_7 = -\frac{a_5}{a_3} \quad (28)$$

$$a_8 = \frac{-2(x_3 - x_2)a_6 - 2(y_3 - y_2)}{2(z_3 - z_2)} \quad (29)$$

$$a_9 = \frac{a_2 - 2(x_3 - x_2)a_7}{2(z_3 - z_2)} \quad (30)$$

$$a = a_6^2 + 1 + a_8^2 \quad (31)$$

$$b = 2a_6(a_7 - x_1) - 2y_1 + 2a_8(a_9 - z_1) \quad (32)$$

$$c = a_7(a_7 - 2x_1) + a_9(a_9 - 2z_1) + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - r_1^2 \quad (33)$$

Com a resolução de (34) a (36), encontra-se a solução para a posição da ferramenta.

$$x = \pm a_6 y + a_7 \quad (34)$$

$$y = \pm \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (35)$$

$$z = \pm a_8 y + a_9 - H \quad (36)$$

Caso a solução de (35) seja igual a zero, significa que existe uma solução única. Se a solução da raiz quadrada for um

número complexo, as esferas não se interceptam e não há solução válida para o ponto estabelecido. Para (36), deve-se escolher a solução negativa, uma vez que o sistema de referências está localizado na base fixa do robô. Existem também condições de singularidade, quando ocorre a divisão por zero, que serão abordadas detalhadamente na próxima seção. Para contornar esses problemas, deve-se utilizar as equações (46) a (48). Sendo (37) a (45) variáveis intermediárias.

$$d = 2(x_3 - x_1) \quad (37)$$

$$e = 2(y_3 - y_1) \quad (38)$$

$$f = r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_3^2 + y_3^2 \quad (39)$$

$$g = 2(x_3 - x_2) \quad (40)$$

$$h = 2(y_3 - y_2) \quad (41)$$

$$i = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_3^2 + y_3^2 \quad (42)$$

$$z_n = z_1 = z_2 = z_3 \quad (43)$$

$$E = -2z_n \quad (44)$$

$$F = z_n^2 - r_1^2 + (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (45)$$

$$x = \frac{fh - bf}{dh - eg} \quad (46)$$

$$y = \frac{di - fg}{dh - eg} \quad (47)$$

$$z = \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4F}}{2} - H \quad (48)$$

B. Espaço de Trabalho

Dentre os métodos para se obter o espaço de trabalho de um robô paralelo, são destacados os métodos geométrico, métodos numéricos e o método de discretização [5]. No método geométrico, pode-se determinar os limites do espaço de trabalho deduzindo as restrições influenciadas por cada braço do manipulador em um objeto geométrico que descreve todos os possíveis locais atingidos pelo mesmo. Assim, se obtém uma forma geométrica para cada braço do robô e o espaço de trabalho situa-se na intersecção de todas elas. O método numérico foi apresentado em [15], e é utilizado apenas para o cálculo de espaços de trabalho de robôs paralelos com seis graus de liberdade.

O método utilizado neste trabalho é o de discretização. Este método consiste em gerar vários pontos em um volume e testar a resolução da cinemática inversa para cada um desses pontos. Existindo uma solução válida, o ponto é considerado

pertencente ao espaço de trabalho. Com isso, pode-se gerar um gráfico tridimensional com todos os pontos válidos encontrados e obter-se uma representação visual do espaço de trabalho hábil de um manipulador. Este método possui a vantagem de poder-se testar todas as posições onde podem ocorrer restrições, porém à custa de um alto gasto computacional, uma vez que quanto maior for a precisão requerida no processo, maior deve ser o número de pontos a serem testados.

Como mostra a Fig. 6, em manipuladores de arquitetura paralela do tipo Delta, o espaço de trabalho geralmente possui formato convexo, convergindo em sua extremidade inferior e, divergindo para três pontos localizados entre os elos em sua parte superior.

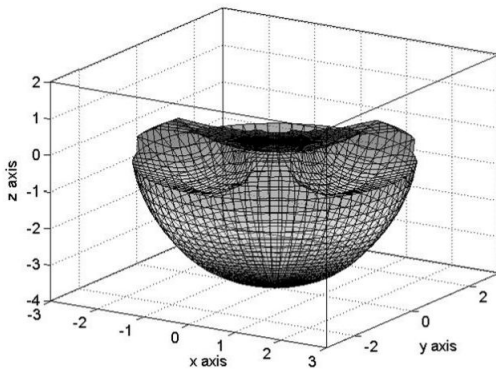


Fig. 6: Espaço de trabalho típico de um robô de arquitetura Delta [11].

A Fig. 7 apresenta o espaço de trabalho hábil do robô obtido na primeira etapa deste trabalho de conclusão, onde os quadrados azuis representam o espaço de trabalho proposto e os pontos pretos representam todo o espaço de trabalho hábil alcançado pelo robô. Apesar do espaço de trabalho ter apresentado uma forma hexagonal devido às restrições mecânicas impostas pelas peças selecionadas para o projeto, nessa figura pode-se verificar a semelhança com o espaço de trabalho típico de um robô do tipo Delta. Destaca-se na figura, um ponto convergente na extremidade inferior, em vermelho, e três pontos divergentes na extremidade superior em verde.

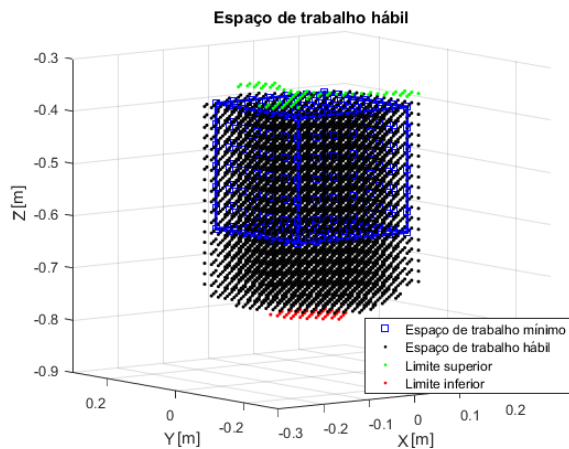


Fig. 7: Vista 3D do espaço de trabalho hábil do robô.

C. Singularidades

As principais posições singulares em robôs de topologia Delta ocorrem quando todos os elos estão paralelos com o eixo Z . Isso faz com que a base móvel possua um grau de liberdade indesejável, podendo rotacionar sobre o eixo Z . Esta situação só pode ocorrer quando as dimensões Wb e Up forem iguais. Outras posições singulares ocorrem quando dois elos estão paralelos entre si ou estão no mesmo plano, fazendo com que a plataforma móvel possua apenas um grau de liberdade. Estas posições geralmente estão localizadas nos limites do espaço de trabalho hábil [13].

Para a convenção cinemática utilizada, as posições singulares ocorrem quando há uma divisão por zero em (35), fazendo com que os centros das esferas virtuais 1 e 3 ou 2 e 3 possuam as mesmas coordenadas no eixo Z ou quando o centro das esferas for colinear com no plano XZ . Também ocorrem posições singulares quando houver uma divisão por zero em (46) e (47), que pode ser evitada respeitando o *design* original do projeto. Em (48), no caso da raiz quadrada apresentar um número complexo como solução, ocorrendo para pontos localizados fora do espaço de trabalho [9].

IV. PROPOSTA

Complementando o que foi apresentado e os resultados obtidos no Trabalho de Conclusão de Curso I (TCC I), para executar a tarefa proposta de pegar e reposicionar objetos de pequeno porte, faz-se necessário a adição de alguns elementos no projeto mecânico do manipulador, sendo estes relacionados a ferramenta de trabalho, a estrutura de sustentação do manipulador e no acoplamento entre o elo superior e o eixo dos motores.

Além das modificações no projeto mecânico do robô, esta seção apresenta os passos necessários para garantir funcionamento do manipulador, com os acoplamentos para os sensores de posição, funcionamento dos códigos no robô e do controle do protótipo por meio de um computador pessoal.

A. Projeto Mecânico

O projeto mecânico já desenvolvido no TCC I será mantido em sua totalidade, havendo apenas o acréscimo de novos componentes. Para que o robô execute a tarefa proposta, faz-se necessário a adição de uma ferramenta. Com a inserção dessa ferramenta, também há a necessidade de atualizar o torque necessário para o atuador.

Além da inserção de um efetuator, ocorreram algumas modificações na estrutura de sustentação para garantir uma maior rigidez da mesma.

1) *Ferramenta de trabalho*: Para o grau de liberdade da ferramenta de trabalho do robô foi utilizado um servo motor de posição. O modelo escolhido foi o PDI 6621MG com 180 graus de excursão e torque de aproximadamente $17,25 \text{ kgf.cm}$ com uma tensão nominal de 5 V .

Por ser um sistema independente ao sistema de posicionamento do manipulador, o ângulo de orientação da ferramenta (θ_4) deve ser informado junto com os parâmetros de posição ou ângulos na resolução das cinemáticas. O ângulo será medido em relação ao eixo X do manipulador, localizado na base

fixa, onde sua posição inicial encontra-se paralela ao sentido positivo do eixo, podendo excursionar até 90 graus para ambos os lados. O diagrama da Fig. 8 apresenta seu funcionamento.

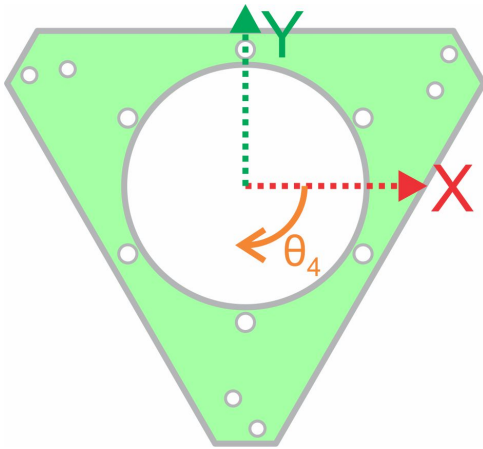


Fig. 8: Diagrama de posicionamento da ferramenta.

Juntamente com o servo motor que controla o quarto grau de liberdade do robô, deve-se utilizar uma ferramenta para que a função de pegar e reposicionar objetos possa ser executada. Essa ferramenta teve seu projeto baseado em um modelo de livre acesso, obtido na comunidade *GrabCAD* e está apresentada na Fig. 9. A massa completa desse sistema é de aproximadamente 250 g.

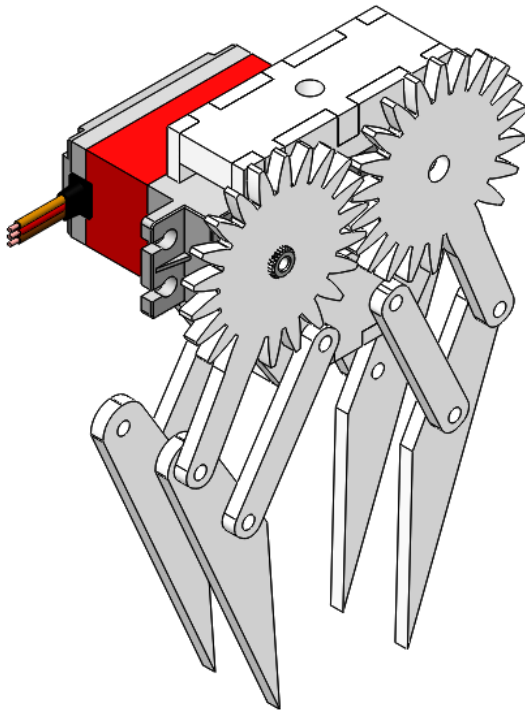


Fig. 9: Projeto da ferramenta de trabalho do manipulador.

2) *Dimensionamento dos motores:* Com a inserção de novos componentes na ferramenta de trabalho do manipulador, foi preciso atualizar o valor de torque necessário do atuador do robô. Para esse dimensionamento, deve-se considerar a posição

mais crítica da movimentação do robô, onde o elo inferior fique a 90 graus do elo superior, assim toda a força provocada pelas partes inferiores do robô encontram-se na vertical, como mostra o diagrama de corpo livre da Fig. 10.

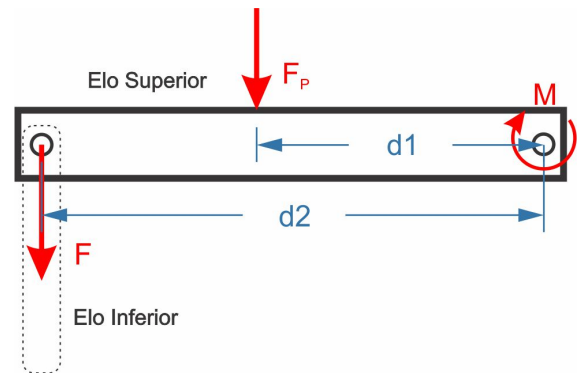


Fig. 10: Diagrama de corpo livre do elo superior.

O motor deve possuir um torque mínimo para que o sistema fique em equilíbrio e não ocorram problemas mecânicos no funcionamento do manipulador. Dimensiona-se o motor utilizando as equações de equilíbrio de um corpo rígido [16] em duas dimensões (49) a (51):

$$\sum M = 0 \quad (49)$$

$$\sum M = F_p \times d1 + F \times d2 - M' = 0 \quad (50)$$

Onde F_p representa a massa do elo superior; $d1$ o centro de massa do elo superior, sendo este igual a 13 cm; F representa a massa do elo inferior somada às massas dos acoplamentos, da base móvel, da ferramenta de trabalho e da carga a ser movimentada, onde as duas últimas devem ser divididas por três devido a simetria do robô; a medida $d2$ representa a distância de F em relação ao ponto onde está o momento, sendo esta igual a 25 cm e M' representa o momento do motor para que o sistema fique em equilíbrio. Obtendo-se então o seguinte resultado:

$$M' = 0,2 \times 13 + \left(0,35 + \frac{0,36 + 0,5 + 0,25}{3} \right) \times 25 \quad (51)$$

$$M' = 20,6 \text{ kgf.cm}$$

O torque mínimo necessário para cada motor deste manipulador para que o sistema fique em equilíbrio na pior condição esperada é de 20,6 kgf.cm. É desejável que se use um motor com torque superior ao encontrado pela equação por questões de segurança. O motor escolhido no Trabalho de Conclusão de Curso I foi um motor de passo NEMA 34, modelo WS34-0500-56-8 com 50 kgf.cm fabricado pela *Wotiom*, o qual não necessitará de uma substituição, visto que seu torque nominal é maior do que o novo valor encontrado pela equação, permitindo um coeficiente de segurança de aproximadamente 2,4.

3) *Estrutura de sustentação*: Como proposto pelo TCC I, a sustentação do conjunto se dará por meio de uma estrutura construída com o perfil 3060 de alumínio estrutural onde agora foi adicionado ao projeto cantoneiras fabricadas em aço carbono SAE 1020 de 3 mm de espessura na junção de dois perfis. No centro da estrutura, onde ocorre a junção tripla dos perfis de alumínio, será utilizado um suporte também fabricado em aço carbono SAE 1020 de 3 mm, para fixar e reforçar a estrutura, evitando possíveis colapsos.

A Fig. 11 apresenta o projeto finalizado da estrutura de sustentação do manipulador.



Fig. 11: Projeto da estrutura de sustentação.

Com os motores fixos aos suportes, é necessário o projeto de um acoplamento para o elo superior, que deve ser fixado ao eixo do motor de maneira que não se movimente longitudinalmente em relação ao mesmo. A solução para isso está apresentada na Fig. 12, onde o elo superior é fixo ao eixo utilizando duas chapas e fica travado pela chaveta do motor.

Após o dimensionamento e projeto de todos os componentes, pode-se realizar sua montagem em *Software CAD*. A Fig. 13 apresenta a montagem completa do projeto do robô juntamente com uma plataforma para a colocação de objetos a serem utilizados nos testes de movimentação.

B. Funcionamento do manipulador

Após o projeto mecânico do manipulador ser concluído, foi necessário iniciar o projeto eletrônico e as rotinas de

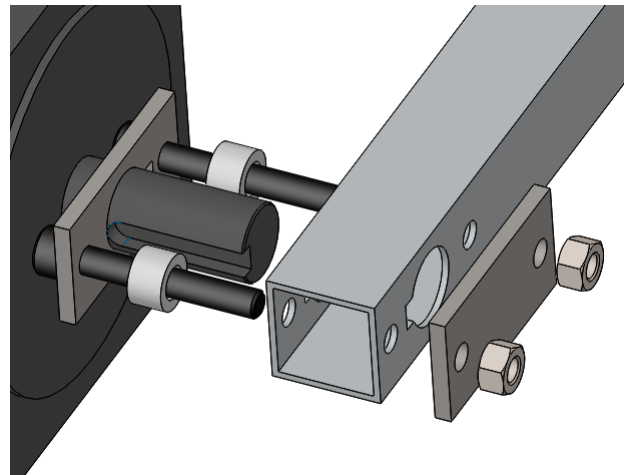


Fig. 12: Vista explodida do acoplamento do elo superior com o motor.

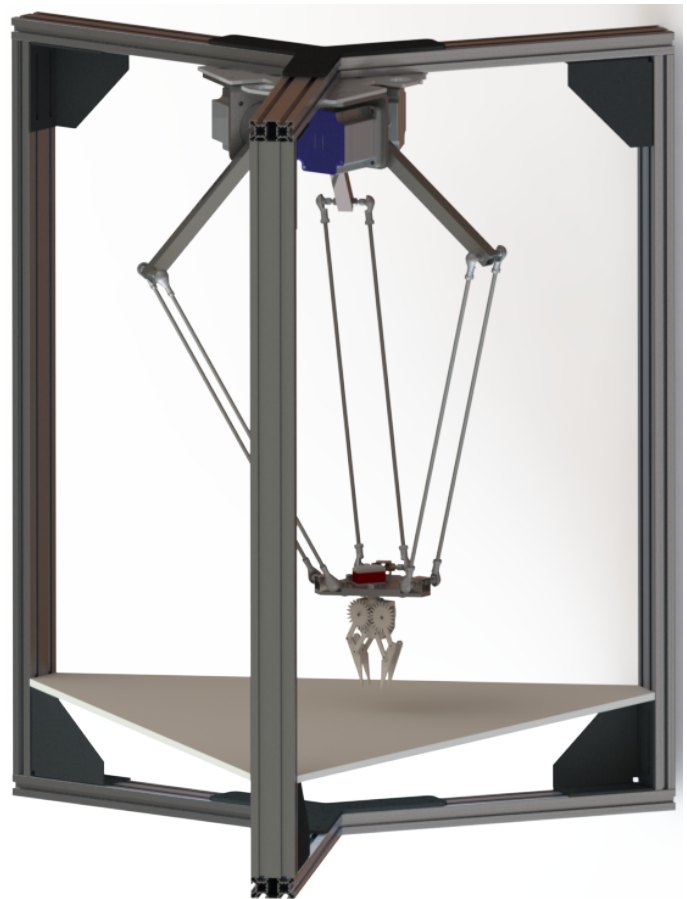


Fig. 13: Projeto do robô Delta.

programação, os quais tratam de todo o acionamento dos motores e sistemas de controle do posicionamento do manipulador. Além disso, ainda foi necessário o desenvolvimento da interface de movimentação no *Software MatLab®*, a qual funciona como interface homem-máquina na utilização do robô, podendo realizar os cálculos de cinemática direta, cinemática inversa, exibição de erros e envio de informações para o robô.

O conjunto eletrônico do manipulador é composto por um microcontrolador *STM32 F103C8* fabricado pela *STMicroelectronics*, um conversor serial, três *drivers* para motor de

passo, três motores de passo, três *encoders* do tipo absoluto e dois servo motores de posição da ferramenta. Todo o conjunto foi alimentado com uma fonte de 24 V e será utilizado um conversor para 5 V na alimentação do servo motor de posição da ferramenta, com a disposição em um painel próprio para a instalação de equipamentos eletrônicos, o qual foi fixado na estrutura de sustentação do robô. Além disso, um computador para executar a interface de movimentação também deve integrar o conjunto.

O diagrama de blocos da Fig. 14 apresenta o esquemático de funcionamento do manipulador como um todo.

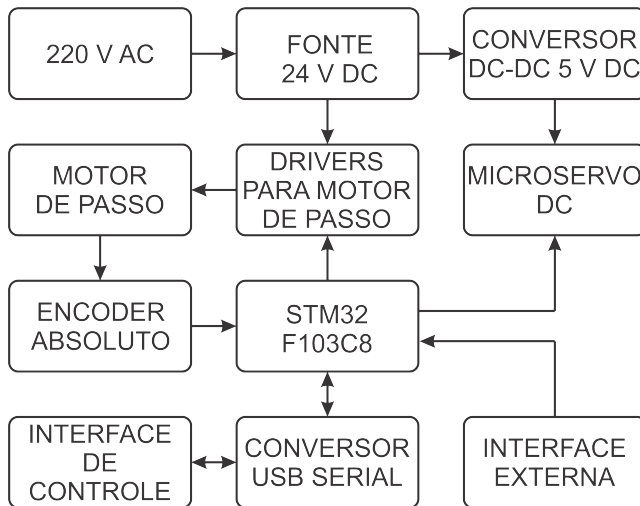


Fig. 14: Diagrama de blocos do funcionamento do robô.

1) *Controle de posicionamento*: A partir do diagrama da Fig. 14, pode-se observar que o controle de posicionamento dos motores é feito em malha fechada utilizando um *encoder* absoluto magnético AS5040, fabricado pela AMS.

Este componente funciona utilizando um ímã cilíndrico de neodímio do tipo diametral, que deve estar fixado ao eixo do motor, de forma que seu circuito detecte os polos norte e sul do campo magnético para realizar o cálculo de posição. Este *encoder* possui resolução de 10 *bits*, e incerteza de posicionamento de 0,5 graus caso o centro do ímã esteja perfeitamente centralizado com o CI. O erro máximo é de 0,9 graus caso o ímã esteja desalinhado, mas dentro dos limites de detecção do campo magnético [17].

Os erros de posicionamento devem ser minimizados, sendo necessário que o *encoder* seja posicionado concentricamente ao eixo do motor, onde está fixado o ímã de neodímio. Para conseguir um bom alinhamento, foi projetado um acoplamento que permita o ajuste de altura do ímã e que mantenha o *encoder* concentricamente posicionado com o eixo do motor.

A Fig. 15 apresenta a vista explodida do acoplamento proposto. Este acessório é fabricado em acrílico. Pode-se observar a possibilidade de ajuste da altura do *encoder* adicionando mais chapas de acrílico caso seja necessário. A altura do ímã também pode ser ajustada, uma vez que o mesmo é fixado a um parafuso e o acoplamento foi projetado de maneira que se permita a utilização de uma chave para o ajuste de sua altura. Este parafuso será rosqueado a uma chapa cilíndrica de *nylon* permitindo aproveitar quase todo o seu curso nesse ajuste.

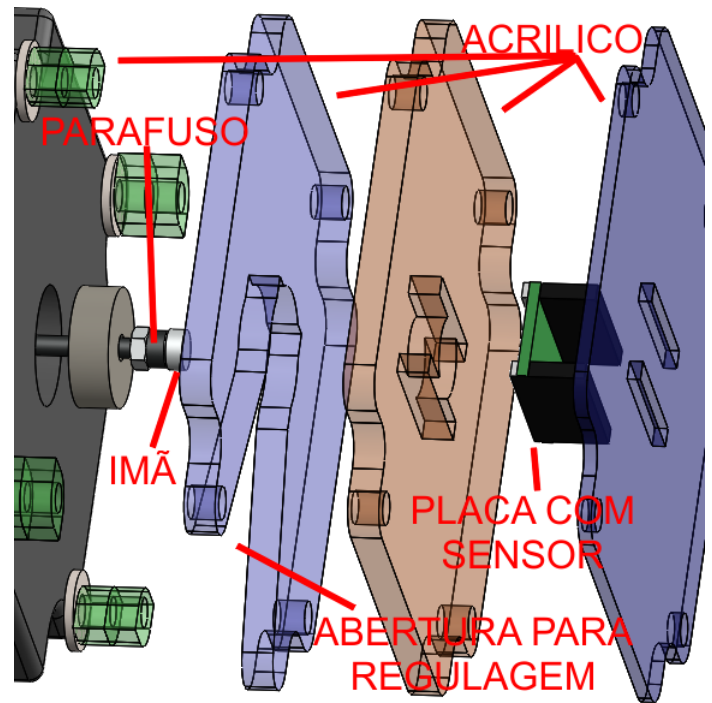


Fig. 15: Vista explodida do acoplamento do *encoder*.

2) *Controle do manipulador*: Para o controle do acionamento dos motores e do posicionamento, foi utilizado um microcontrolador, que recebe os ângulos do robô por meio da comunicação serial e faz a atuação dos motores para a posição desejada. A Fig. 16 apresenta o fluxograma do funcionamento do código principal do microcontrolador.

A verificação dos dados enviados ocorre por meio de *checksum*, somando todos os valores enviados e obtendo um resultado em 2 *bytes*. Sempre que houver algum erro com o *checksum* das informações enviadas pela serial, o processo de envio será repetido pelo computador, para que a informação não seja perdida, como pode ser visto nos fluxogramas da Fig. 16.

Quando o microcontrolador receber alguma informação válida pela serial, ele faz o acionamento dos motores, comparando com a posição lida no *encoder*. O fluxograma da Fig. 17 apresenta o funcionamento dessa rotina, onde o erro utilizado nos cálculos é o da resolução do *encoder* de 0,35 graus.

É importante frisar que o código no microcontrolador é executado linearmente, e os três motores do robô precisam ser movimentados simultaneamente. Para que isso ocorra, não se pode apenas enviar os ângulos da posição desejada para o microcontrolador, é necessário enviar os ângulos intermediários aos da posição em que o robô encontra-se no momento e a nova posição desejada, fazendo com que a cada quadro enviado o robô faça movimentos menores que 1 grau em cada motor.

O fluxograma da Fig. 18 apresenta o funcionamento do código de envio, que faz com que o microcontrolador execute a rotina de atuação dos motores para pequenos ângulos a cada vez, fazendo com que a movimentação dos três motores ocorra de maneira quase simultânea.

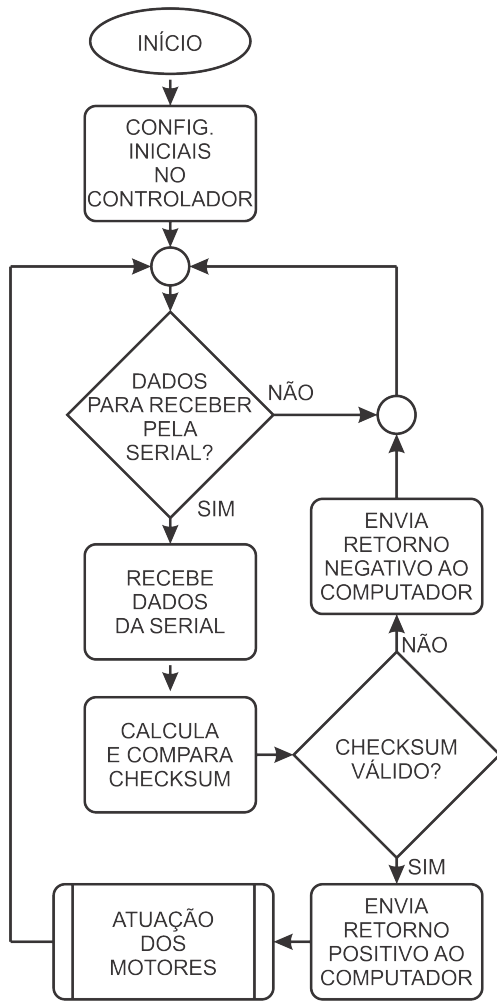


Fig. 16: Fluxograma explicativo do código do microcontrolador.

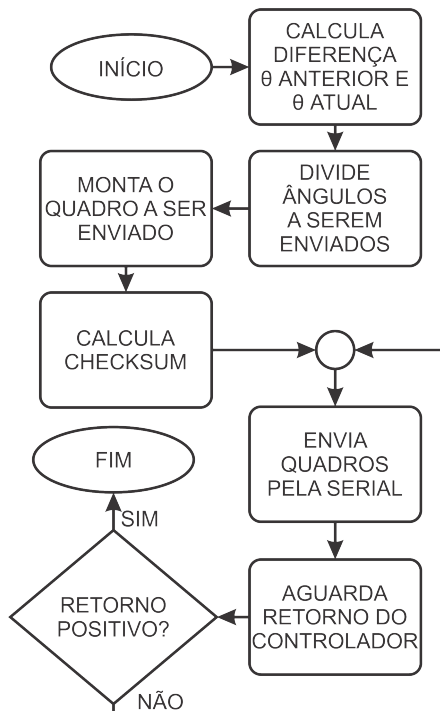


Fig. 18: Fluxograma explicativo do processo de envio de dados pela serial.

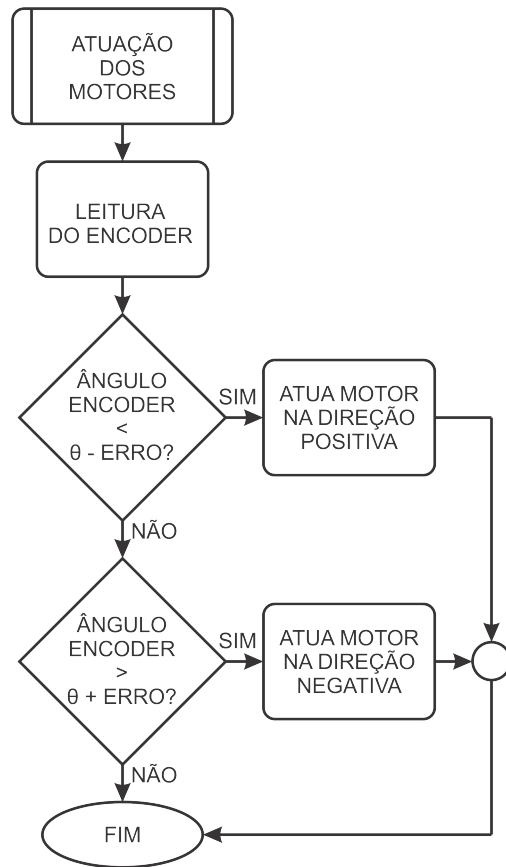


Fig. 17: Fluxograma explicativo do processo de atuação dos motores.

O envio de informações do computador para o microcontrolador ocorre por comunicação serial, com a utilização de um conversor *USART USB para TTL*.

A Fig. 19 apresenta o quadro enviado ao microcontrolador. Os quadros são enviados do computador ao microcontrolador com um *baudrate* de 250000 *bps*. O *checksum* é enviado duas vezes para aumentar a segurança da informação no caso de alguma falha durante a comunicação.

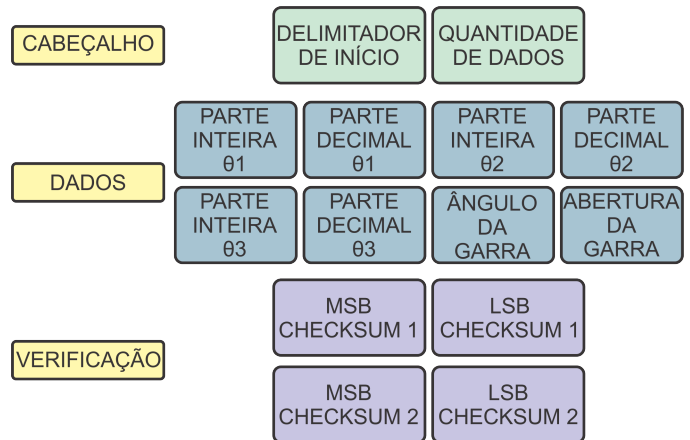


Fig. 19: Quadro enviado pela serial.

Todos os ângulos a serem enviados têm um *offset* de 50 graus, pois não é possível o envio de valores negativos pela comunicação serial. Quando a menor posição válida do robô, que foi limitada em -50 graus anteriormente, for enviada,

no quadro constará o valor zero. Quando o microcontrolador recebe esses dados, ele retira esse *offset* no tratamento dos dados.

3) *Interface de Movimentação*: Após a finalização dos códigos para envio de dados no computador e para o tratamento de dados e acionamento dos motores no microcontrolador, foi necessário o desenvolvimento de uma interface gráfica para o controle da movimentação do manipulador. Essa interface foi programada utilizando a ferramenta *GUIDE* do *Software MatLab®* e é apresentada na Fig. 20.

Nessa interface é possível entrar com dados de ângulos ou de uma posição desejada para a resolução das cinemáticas direta ou inversa, respectivamente. Caso haja uma solução válida, o desenho representativo é atualizado e a posição é enviada para o robô. Se a solução for inválida é apresentada uma mensagem com o erro ocorrido e não é possível enviar a posição para o robô, evitando assim quaisquer problemas de singularidades ou de pontos fora do espaço de trabalho que possam danificar o manipulador em uma tentativa de forçar o posicionamento.

A interface ainda permite a realização de alguns testes pré programados, como uma variação entre os limites superior e inferior de altura, dos limites do espaço de trabalho proposto para o manipulador e de uma movimentação pegando e reposicionando objetos na plataforma apenas para facilitar verificações de calibração e alinhamento.

Incluiu-se também uma opção para exibição da incerteza da posição, a qual será explicada mais detalhadamente na próxima seção.

V. RESULTADOS

Juntamente com o desenvolvimento do projeto eletrônico e das rotinas de programação, ocorreu a etapa de fabricação das peças e da montagem mecânica do manipulador. Nas seguintes seções serão explicados os resultados obtidos da fabricação das peças, os ajustes necessários em relação ao que foi proposto, a montagem do robô, os resultados de movimentação mecânica e a análise de incertezas do posicionamento do manipulador.

A. Fabricação das peças

As peças do manipulador foram fabricadas de acordo com o que foi proposto no TCC I. Porém, ocorreram algumas diferenças na massa em relação ao que foi calculado pelo *software* e da massa real das peças produzidas. A Tabela I mostra a massa obtida para as partes do robô.

Tabela I: Massa obtida na fabricação das peças

Peça	Massa projetada	Massa obtida
Elo superior	200 g	243,22 g
Elo inferior	350 g	376,45 g
Cabeçote	360 g	281,32 g
Ferramenta	250 g	242,58 g

Devido a essa diferença foi preciso atualizar o valor do torque necessário para a atuação. Atualizando os valores em (51), obtêm-se o torque mínimo de $21,11 \text{ kgf.cm}$, o que não acarretará em nenhuma mudança em relação ao o motor escolhido.

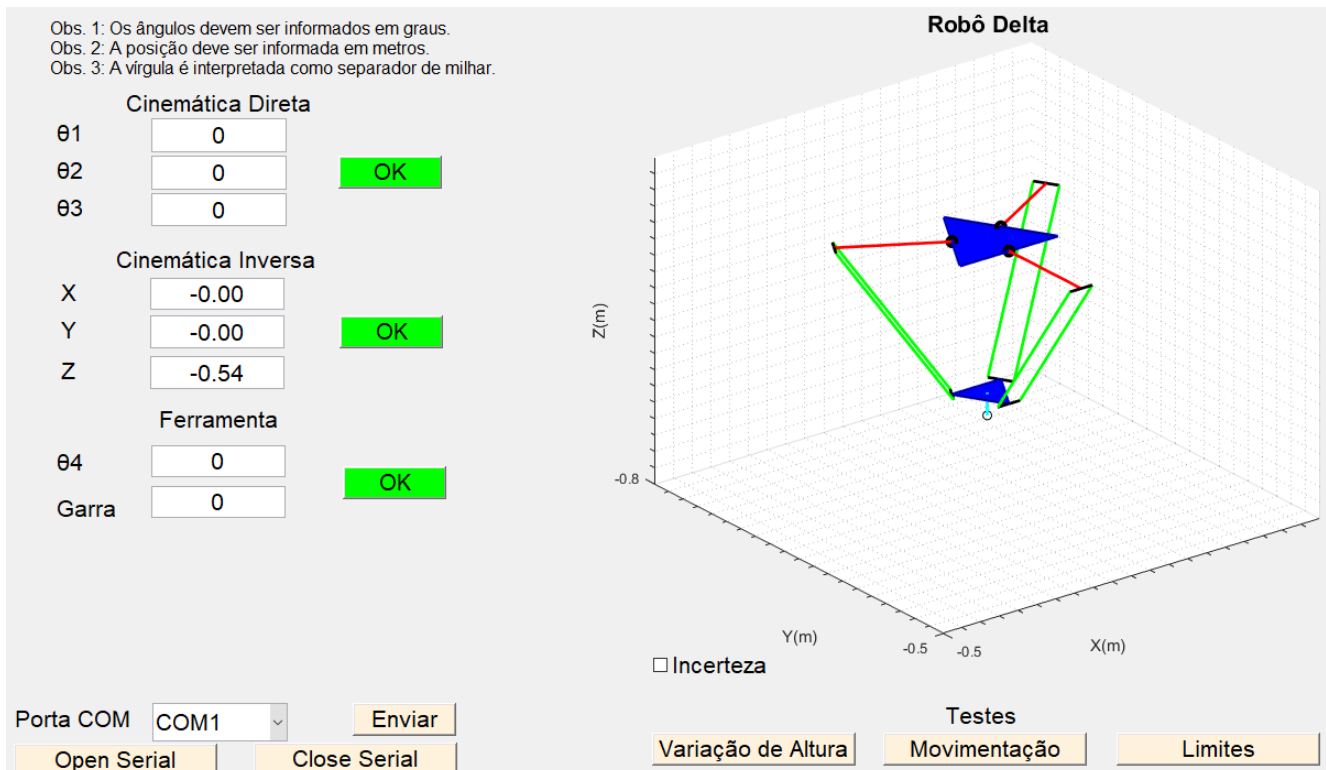


Fig. 20: Interface para controle de movimentação.

B. Montagem

Após a fabricação de todas as peças necessárias, iniciou-se a montagem do manipulador. Os principais detalhes e peças que precisaram ter mais atenção em sua fabricação e montagem estão apresentados nessa seção.

A Fig. 21 apresenta o acoplamento entre o elo superior e o eixo do motor, o qual foi produzido de acordo com o que foi apresentado anteriormente e se mostrou funcional, impedindo o elo de se deslocar longitudinalmente em relação ao eixo do motor e não existindo quaisquer folgas no sentido da movimentação realizada pelo atuador.

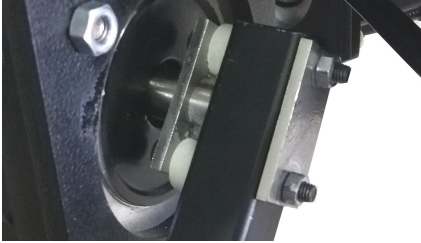


Fig. 21: Acoplamento do elo superior ao eixo do motor.

Na Fig. 22 é mostrado a junção entre o elo superior e o elo inferior, feita apenas pelas juntas esféricas utilizadas. Essa junção funcionou como o esperado, permitindo a livre movimentação da junta em todos os sentidos a qual precisa se movimentar e tendo a rigidez necessária no sentido de impossibilitar folgas ou problemas de alinhamento na extremidade dos elos do manipulador.



Fig. 22: Junção dos elos superior e inferior.

A junção entre o elo inferior e o cabeçote do robô está apresentada na Fig. 23. A montagem se deu de forma semelhante à junção anterior, apenas utilizando as juntas esféricas e porcas como modo de fixação. Essa junção se mostrou adequada, uma vez que permitiu movimentação livre da junta esférica, sem ela colidir com o cabeçote do manipulador e teve a rigidez necessária para não ocorrerem folgas ou desalinhamento das partes inferiores do robô.

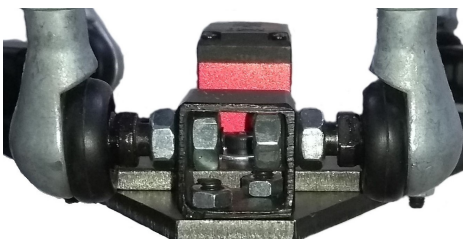


Fig. 23: Junção do elo inferior com a base móvel do robô.

Como apresentado anteriormente, o *encoder* necessitou de um acoplamento cuidadosamente projetado para que se pudesse obter a medida de ângulo com menor erro possível. As Fig. 24 e 25 apresentam o acoplamento fabricado. Nestas imagens é possível observar o parafuso para o ajuste de altura do ímã e a colocação do ímã na cabeça do parafuso. Essa etapa precisou ser feita de forma manual, não conseguindo obter-se um alinhamento perfeito. Ao realizar um teste de giro de 360 graus no motor, o ímã pode ser detectado pelo *encoder* em todos os pontos, significando que ele está dentro dos limites de detecção do campo magnético do *CI*, mas acarretando em uma incerteza de posicionamento maior que 0,5 graus.



Fig. 24: Acoplamento do *encoder*.



Fig. 25: Detalhe do parafuso de ajuste com ímã.

A Fig. 26 mostra a garra utilizada como efetuator do manipulador. Sendo fabricada em *MDF*, demonstrou-se eficiente na tarefa de pegar e reposicionar pequenos objetos.



Fig. 26: Efetador do manipulador.

A Fig. 27 apresenta a montagem completa do robô.

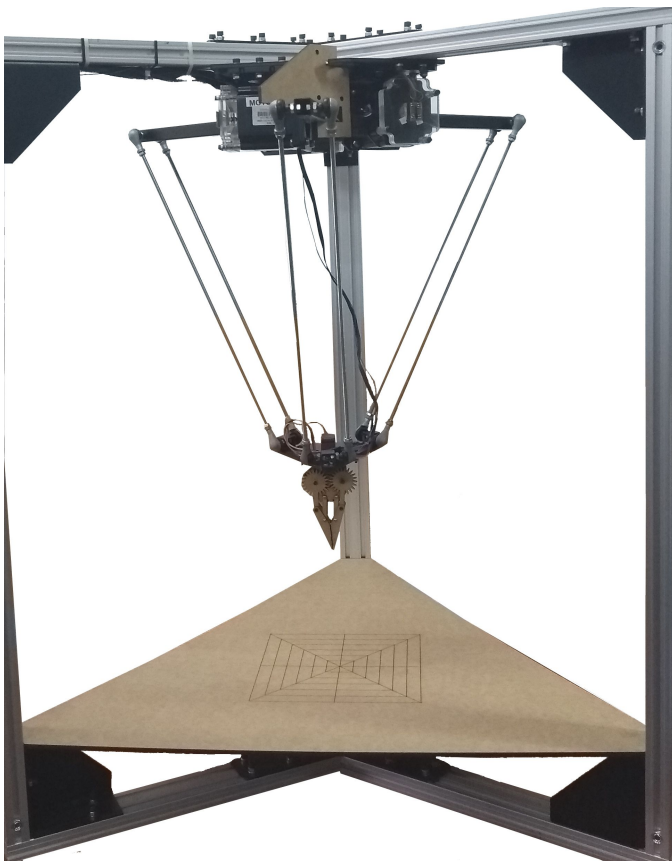


Fig. 27: Robô completo.

C. Análise de incertezas de posicionamento

Como o *encoder* possui uma incerteza associada a sua medição angular de 0,5 graus para um alinhamento perfeito

do ímã com o *CI* e de 0,9 graus para o caso do ímã estar desalinhado mas ainda dentro dos limites de detecção do campo magnético [17], é necessário calcular o quanto essa incerteza afeta no posicionamento do robô.

Para esta etapa, foi desenvolvida uma rotina que faz uma varredura de todas as posições que cada um dos motores podem assumir e qual o resultado do posicionamento com a combinação da incerteza de cada um dos *encoders*. O fluxograma da Fig. 28 apresenta o funcionamento desse código. Para a execução dessa rotina, foi utilizado a incerteza máxima do *encoder* de 0,9 graus, uma vez que o ímã foi posicionado manualmente no parafuso de ajuste, e executando um giro de 360 graus. Não houve nenhum ponto onde o não houvesse detecção pelo *CI*, indicando que estava totalmente dentro dos limites da detecção do campo magnético, mas ainda assim, não ficou perfeitamente alinhado, impedindo a redução da incerteza para 0,5 graus.

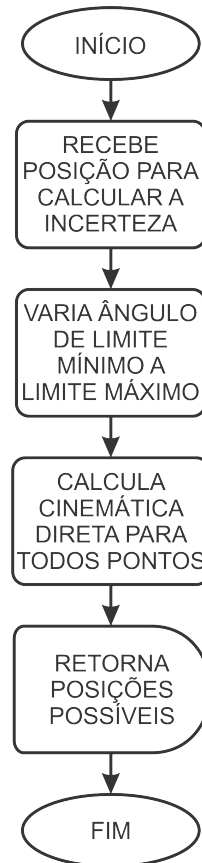


Fig. 28: Fluxograma explicativo do código para o cálculo da incerteza de posição.

É importante ressaltar que a incerteza de posicionamento não é linear e depende da resolução dos cálculos de cinemática direta para cada ponto desejado. Sendo assim, não existe um valor de incerteza padrão para o robô, havendo a necessidade de se executar essa rotina para cada ponto onde deseja-se conhecer os limites de posição que o robô poderá assumir. A Fig. 29 apresenta o resultado obtido na execução dessa rotina para a posição inicial do robô, onde os ângulos dos três motores é igual a zero.

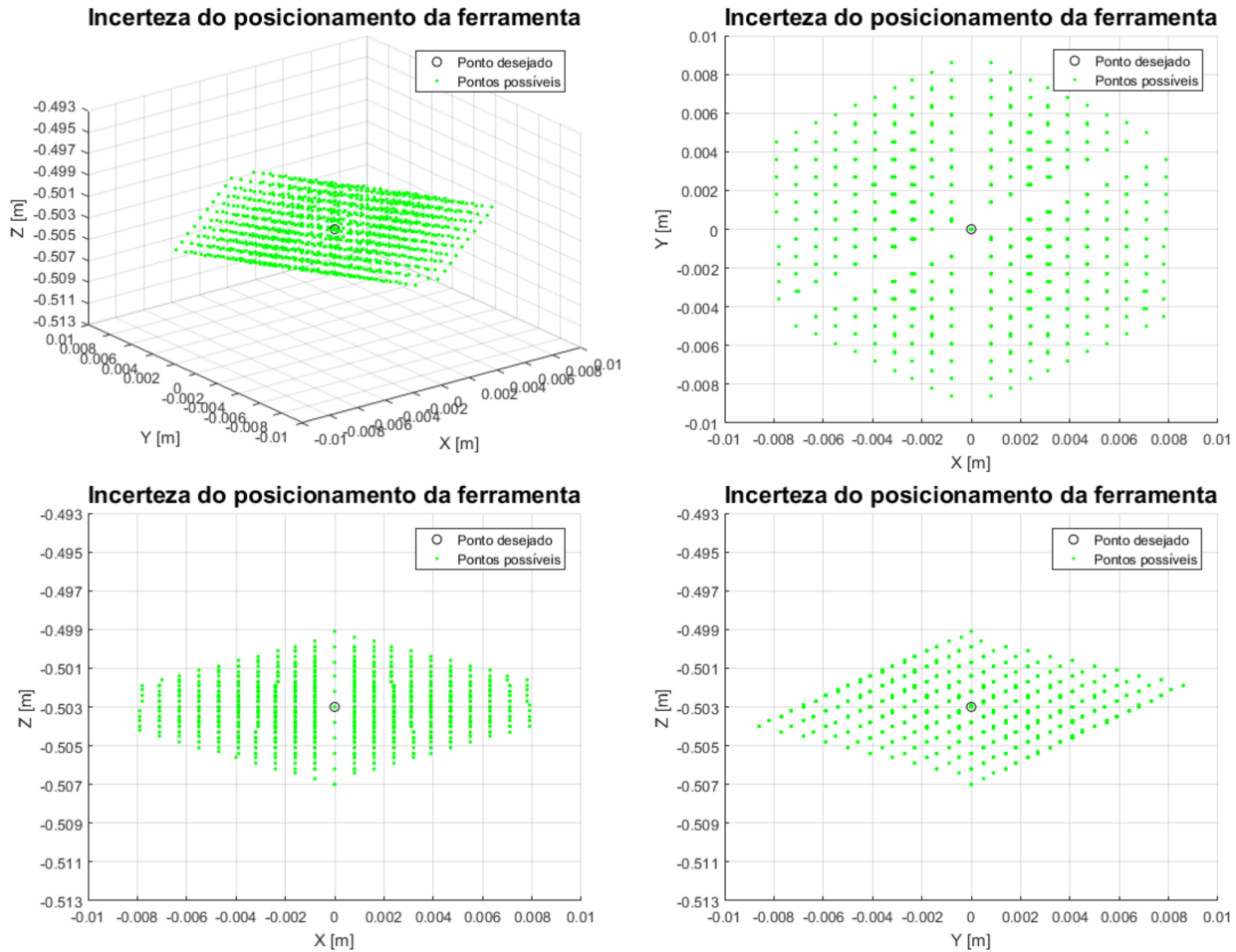


Fig. 29: Resultado obtido no cálculo da incerteza de posição para a posição inicial do robô.

Pode-se perceber que nos eixos X e Z houve uma incerteza máxima de até 8 mm e no eixo Y de aproximadamente 9 mm . Esses valores são considerados elevados para aquelas tarefas que exigem precisão, como por exemplo impressão 3D. Porém, para a tarefa a qual o robô foi designado, essa incerteza não deve apresentar problemas.

D. Testes de movimentação

Após a montagem e o sistema de controle do manipulador estarem concluídos e funcionando da forma esperada, foram realizados testes de movimentação mecânica do robô, com base nas rotinas mostradas anteriormente, na interface de movimentação.

Desta forma, toda a montagem mecânica e os códigos elaborados para o controle do manipulador puderam ser testados. A movimentação se mostrou satisfatória e condizente com o que era esperado pelas simulações no *Software MatLab®* e da movimentação manual no *Software CAD*.

Com o teste de limites do espaço de trabalho, pode-se verificar que o manipulador consegue atingir totalmente o espaço de trabalho mínimo delimitado de um cubo com 24 cm de lado. Possui, também, uma variação de altura de aproximadamente 40 cm .

Com o teste de movimentação, pode-se testar o reposicionamento de um objeto sobre a plataforma do robô utilizando a

ferramenta de trabalho. Este teste foi essencial para comprovar o funcionamento do manipulador como ferramenta de pegar e reposicionar objetos, com desempenho satisfatório e boa repetibilidade.

Com o auxílio de instrumentos de medição, pode-se avaliar as posições e ângulos de juntas alcançada pelo efetador do robô, que se mostraram coerentes com o que foi obtido nos cálculos das cinemáticas inversa e direta, e também dentro da incerteza de posicionamento do *encoder*, encontrando variações menores que $0,9$ graus, isso indica que os cálculos apresentam um resultado válido e possível de se obter na prática.

Como apenas os cálculos de cinemática inversa e direta foram resolvidos e aplicados neste protótipo, todas as movimentações ocorreram com velocidade de $0,75\text{ RPM}$ e sem a aplicação de cálculos de trajetórias com perfis de velocidade e aceleração variáveis. Para que seja possível controlar a velocidade e aceleração, é necessário resolver o modelo dinâmico e equações de Jacobiano do manipulador, as quais não serão abordadas neste trabalho.

Sem a resolução do modelo dinâmico não foi possível atingir velocidades superiores a 1 RPM , uma vez que com a realimentação da posição no controlador ocorrem instabilidades causadas pela velocidade de atuação. A resolução

de um modelo dinâmico e de cálculos de Jacobiano são melhorias essenciais para o desenvolvimento do manipulador, permitindo movimentações mais suaves e atingir velocidades mais próximas a de um modelo industrial de robô Delta

VI. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos corroboraram com o que foi apresentado pelas simulações. Os resultados foram bastante satisfatórios em todos os testes realizados e condizentes com o que se espera de um robô de topologia Delta.

Com os testes executados pode-se reafirmar a eficácia dos cálculos de cinemática e do método utilizado para a obtenção do espaço de trabalho, apresentado no trabalho anterior.

O microcontrolador escolhido se mostrou capaz de realizar todas as rotinas necessárias. A velocidade da transmissão de dados na comunicação serial se mostrou adequada, permitindo realizar o controle dos atuadores sem quaisquer atrasos que pudessem impactar no desempenho do manipulador.

O *Software MatLab®* foi de fundamental importância para a realização de todos os cálculos de cinemática do manipulador. Seu desempenho e utilização ficaram dentro do esperado, com alta velocidade de processamento e comunicação não causando nenhum problema que pudesse afetar a movimentação e o desempenho do robô.

Apesar de andar a passos mais lentos do que países asiáticos e europeus, a utilização de robôs na indústria brasileira vem crescendo nos últimos anos [6] e o desenvolvimento de novos manipuladores para atender diferentes segmentos do mercado é de grande importância para impulsionar esse crescimento. Este projeto desenvolveu uma solução para reposição de objetos, que com algumas adaptações e melhorias, pode ser aplicado em diversos segmentos industriais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao IFRS pela bolsa auxílio e pela disponibilização de todos os *Softwares* necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecimento ao professor Vitor Tumelero Valente pela orientação, auxílio físico e financeiro e pela motivação.

Agradecimentos a Bruno Nonemacher e Gilmar da Luz com o auxílio na fabricação das peças.

Agradecimento aos bolsistas Marcelo Schardong e Matheus Simao Alves na ajuda com o desenvolvimento do projeto.

Agradecimentos ao professor Adelano Esposito pelo auxílio no cálculo do torque necessário para o motor, à professora Juliana Menegotto pelo auxílio no cálculo da restrição mecânica na junta esférica e ao professor Giacommo Soares pelo auxílio na fabricação das peças.

REFERÊNCIAS

- [1] L.-W. Tsai, *Mechanism design: enumeration of kinematic structures according to function*. CRC press, 2000.
- [2] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Kinematics*. Springer, 2009.
- [3] F. Pierrot, C. Reynaud, and A. Fournier, "Delta: a simple and efficient parallel robot," *Robotica*, vol. 8, no. 2, pp. 105–109, 1990.
- [4] R. Clavel, "Device for the movement and positioning of an element in space," dec " 11"1990. US Patent 4,976,582.

- [5] J.-P. Merlet, *Parallel robots*, vol. 128. Springer Science & Business Media, 2006.
- [6] I. International Federation of Robotics, "Executive summary world robotics industrial robots 2017," tech. rep., 2018. Disponível em: <https://ifr.org/free-downloads/>.
- [7] R. Clavel, "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté," 1991.
- [8] V. ROMANO, "Robótica industrial: Aplicação na indústria de manufatura de processos. edgard blucher Ltda, 2002," tech. rep., ISBN 85-212-0315-2.
- [9] R. L. W. II, "The delta parallel robot kinematics solutions," *Internet Publication*, 2016.
- [10] J. J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control*, vol. 3. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
- [11] A. Gharahsofloo and A. Rahmani, "An efficient algorithm for workspace generation of delta robot," *International Journal of Robotics*, 2015.
- [12] M. Laribi, L. Romdhane, and S. Zeghloul, "Analysis and dimensional synthesis of the delta robot for a prescribed workspace," *Mechanism and machine theory*, vol. 42, no. 7, pp. 859–870, 2007.
- [13] K. Hsu, M. Karkoub, M.-C. Tsai, and M. Her, "Modelling and index analysis of a delta-type mechanism," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 218, no. 3, pp. 121–132, 2004.
- [14] J. R. Erazo Fernández, "Diseño y construcción de un robot paralelo de configuración "delta" de cuatro grados de libertad," B.S. thesis, QUITO/UIDE/2017, 2017.
- [15] D.-Y. Jo and E. J. Haug, *Workspace analysis of closed-loop mechanisms with unilateral constraints*. Center for Simulation and Design Optimization and Department of Mechanical Engineering, University of Iowa, 1989.
- [16] P. Kaminski, "Mecânica geral para engenheiros: Ed," *Edgard Blücher Ltda. 1ª edição São Paulo*, 2000.
- [17] A. Austriamicrosystems, "10-bit 360 programmable magnetic rotary encoder data sheet, 2018," *austriamicrosystems AG, Schloss Premstätten, Austria*.