

Projeto e Simulação de Movimentos e Espaço de Trabalho de um Braço Robótico Antropomorfo de 5 Graus de Liberdade Mais Efetuador

Ronaldo Battisti¹

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha
Farroupilha, Brasil
ronaldo.battisti@hotmail.com

Rodrigo Martini Riboldi²

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha
Farroupilha, Brasil
rodrigo.riboldi@farroupilha.ifrs.edu.br

Resumo — Este artigo corresponde ao Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS – Campus Farroupilha, e tem como objetivo desenvolver o modelo cinemático direto e inverso de um robô do tipo Scorbot, com 5 graus de liberdade mais o efetuador, bem como demonstrar o método de solução utilizado para solucionar as cinemáticas. Esses modelos permitem a simulação de posições e trajetórias do efetuador de acordo com os ângulos das juntas, ou o arranjo delas para que se atinja uma determinada posição e orientação de ferramenta pré-definida. Foram testados esses pontos do espaço para se ter autonomia em informar se são alcançáveis ou não. Também foi realizada a exportação do modelo para um software de simulação, o dimensionamento mecânico dos motores necessários para o robô, e o projeto mecânico completo deste, disponibilizando uma base para que se possa realizar uma interface de comunicação entre o modelo de simulação e um software de controle, criando uma bancada para simulação de robótica.

Palavras-chave — Scorbot; Robótica; Robô antropomorfo.

I. INTRODUÇÃO

A palavra “robô” provém do termo “robota”, que significa trabalho forçado, ou trabalho realizado por um servo. Esta palavra foi utilizada pela primeira vez por Karel Capek, no ano de 1920, aonde já se havia a ideia da construção de uma máquina capaz de realizar serviços que os humanos convencionalmente realizam [1] [2]. Hoje, muitos anos depois da criação desta palavra, e após o aprofundamento e melhor conhecimento sobre essa tecnologia, os robôs se mostram difundidos tanto em ambientes industriais, facilitando processos, como em ambientes residenciais, realizando tarefas como limpeza de chão, e até mesmo refeições [3].

Robôs são equipamentos que fornecem muita lucratividade para as empresas, com um serviço de alta qualidade, agilidade e sem intermitência [4]. Segundo [2], a maior ambição para o futuro é que os robôs tenham inteligência, e isso pode ser facilmente percebido quando levamos em conta a necessidade de tomada de decisões perante às mudanças de mercado, devido ao crescente nível de tecnologia implementado nos processos de manufatura. Para realizar atividades mais próximas às realizadas por humanos, os robôs mais utilizados são os braços antropomorfos, que apresentam semelhanças com o braço humano. Esses robôs antropomorfos tanto se assemelham a um braço humano, que suas juntas e eixos são comparadas a partes de membros humanos, onde cada conjunto de um realiza o movimento de seu semelhante [5], como pode ser visto na Figura 1.

A possibilidade da evolução de diversas tecnologias, como robôs por exemplo, se dá em certa parte através de pesquisas

realizadas em universidades, através de bolsas, aonde alunos e professores dedicam seu tempo. As grandes dificuldades para instituições de ensino brasileiras manterem estas pesquisas são o alto custo de aquisição de um braço robótico [6].

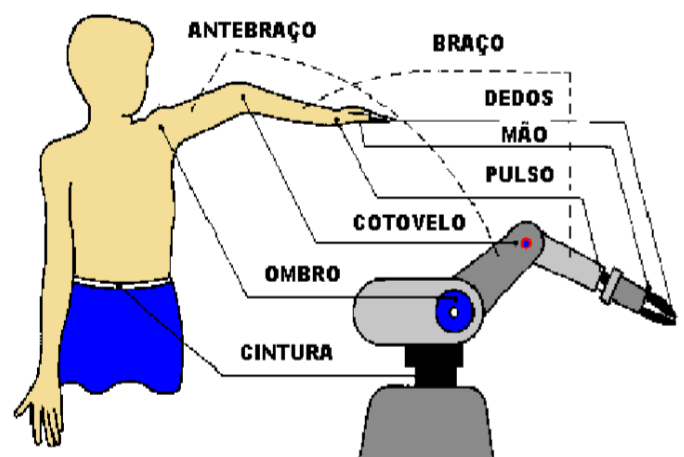


Figura 1: Conceitos básicos de um robô antropomorfo [4].

Para amenizar o problema da falta de recursos, e possibilitar a continuação de pesquisas na área de robótica, esse trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto de um robô de 5 graus de liberdade mais efetuador, para fins estudantis, contendo simulações de movimento, espaço de trabalho e o próprio projeto mecânico do manipulador. Através deste, será possível desenvolver um projeto partindo com toda a cinemática já pronta, e com a base do modelo de controle finalizada.

O objetivo geral desse trabalho será fornecer as cinemáticas direta e inversa calculada, o espaço de trabalho do robô definido, o projeto mecânico inteiramente realizado, e um modelo 3D do robô exportado para o Simulink.

O Scorbot é um robô para baixa carga (máximo de 2 kg), comumente utilizado para fins educacionais. Ele é desenvolvido pela Intelitek, e não possui revendedor no Brasil. Atualmente existem muitos projetos que integram esse robô a algum outro sistema simulado, como linha de produção, integração com processamento de imagem e acréscimo de ferramentas, por exemplo.

Durante esse projeto serão tratados do diagrama de movimentos, da orientação da ferramenta, das cinemáticas direta e inversa e do espaço de trabalho do robô proposto. Também será apresentado o projeto mecânico, a exportação realizada do modelo para o software de simulação, e a apresentação dos resultados.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O que nos permite indicar a direção para a qual um robô deverá se movimentar, é o estudo da cinemática. A cinemática de um robô pode ser direta ou inversa [4]. A cinemática direta consiste em descobrir a posição final do efetuador com base nos ângulos de cada junta deste. Já a cinemática inversa procura saber quais são os ângulos das juntas de um robô que levarão o efetuador nas posições e orientações desejadas. Tem-se então que quanto mais juntas o robô possuir, maior será sua complexidade e custo computacional [7].

Com as cinemáticas encontradas, pode-se descobrir algumas características fundamentais para o funcionamento do robô, como o espaço de trabalho, por exemplo [7]. O espaço de trabalho consiste no volume no qual o robô em questão conseguirá se mover. Para o Scorbot, esse volume é mostrado representativamente nas Figura 2 e Figura 3, adaptadas de [4], aonde pode-se ter uma melhor ideia das dimensões do robô que está sendo tratado.

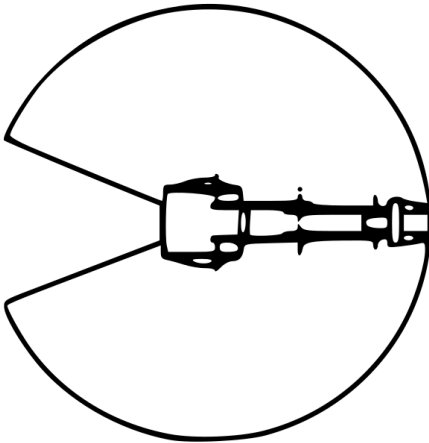


Figura 2: Demonstração do espaço de trabalho (vista superior) adaptado de [7].

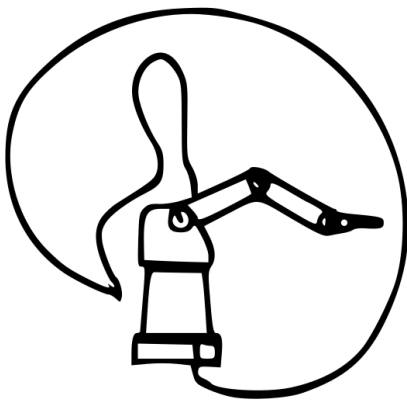


Figura 3: Demonstração do espaço de trabalho (vista lateral) adaptado de [7].

O espaço de trabalho pode ser classificado em hábil e alcançável: Espaço de trabalho hábil é definido pelo volume de trabalho no qual o robô pode alcançar independentemente da posição da ferramenta, já o espaço de trabalho alcançável se dá pelo volume de trabalho máximo que a ponta da ferramenta pode alcançar em uma única orientação [4]. Para

este trabalho, os espaços de trabalho, tanto para a cinemática direta quanto para a inversa, serão descobertos através de discretização de movimentos, variando cada junta e salvando um ponto em um espaço 3D, formando assim uma nuvem de pontos que representará os espaços de trabalho com as cinemáticas direta e inversa.

Existem diversas maneiras de se representar as cinemáticas de um braço robótico, entre elas, as principais são através dos Ângulos de Rolamento, Arfagem e Guinada ou Roll, Pitch, and Yaw (RPY) em inglês, Ângulos de Euler, Articulações e Representação de Denavit e Hartenberg.

Tanto a modelagem do robô quanto sua representação serão baseadas pela Representação de Denavit e Hartenberg, que foi escolhida por permitir a modelagem para qualquer tipo de robô com articulação de revolução ou translação, de seus elos e articulações, independentemente de sua complexidade [8]. Essa representação é precedida pela representação do robô com um sistema de referência, utilizado para preenchimento de uma tabela como a apresentada na Tabela 4, denominada de Parâmetros de Denavit e Hartenberg, ou simplesmente Parâmetros de D-H. Nesta figura, é importante frisar que os termos seguidos pelo símbolo “*” são variáveis de rotação ou translação.

Na tabela de Denavit e Hartenberg são observados os parâmetros “a”, que representa o comprimento do elo a ser movido, “ α ”, que representa o ângulo de rotação da junta em relação à junta anterior, “d”, que diz respeito a distância entre o eixo z anterior até uma normal comum, e por fim “ θ ”, sendo o ângulo em relação ao Z anterior, de rotação do eixo x da junta.

Tabela 1: Exemplo de Parametrização pelo método de Denavit e Hartenberg [10].

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*

A definição de orientação dos eixos do Diagrama de Movimento, como pode ser chamado o sistema de referência citado anteriormente [7], deve seguir diversas regras para que sua modelagem resulte em uma matriz correta. Os parâmetros de D-H são mostrados de tal forma que se podem extrair todas as informações de posição de eixo do robô, e possibilidades de rotação ou translação [10]. Utilizando de uma matriz homogênea genérica, pode-se obter a matriz de transformação de qualquer junta do robô, portanto, poderá ser encontrada também a matriz de transformação da ponta da ferramenta à base do braço, que é o que se necessita, conforme citado no início desse tópico.

Após as cinemáticas obtidas, deve-se saber as limitações do robô. Essas limitações podem ser físicas, como limitação de giro devido ao enrolamento dos cabos de alimentação dos motores, como elétricas, caso seja utilizado um servo motor, por exemplo. Outras limitações matemáticas, aonde um pequeno movimento na ferramenta gera um movimento muito rápido em uma junta, ou quando o jacobiano resulta em um valor infinito, por exemplo, são chamadas de Pontos de Singularidades. Os pontos de singularidades podem

representar, segundo [2], 3 limitações; Pontos no espaço nos quais o robô não é capaz de alcançar ou de efetuar um movimento arbitrário, regiões em que a cinemática retornará valores infinitos para a solução desta posição e regiões nas quais um pequeno movimento em um eixo gera uma grande velocidade na ponta do efetuador. Essas singularidades devem ser tratadas antes de o programa de controle do robô ser desenvolvido, pois matematicamente resultará em inconsistências matemáticas no momento de resolução das matrizes, como divisões por zero, por exemplo.

Com as regiões de singularidade identificadas e tratadas, pode-se então desenvolver trajetórias para o efetuador, e escolher posições ideais para posições de múltiplas soluções. Para este trabalho, a trajetória do robô será dada pela discretização de variações dos ângulos de cada junta do robô. Para esse método, será necessário saber os ângulos iniciais e finais de cada junta, mantendo a cinemática direta necessária.

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se chegar a um programa que permita simular a movimentação de um Scorbot, dever-se-á realizar alguns passos, que serão demonstrados abaixo.

A. Diagrama de movimentos

Antes de se desenvolver qualquer equacionamento, deve-se definir as posições iniciais do robô esquematizar seus movimentos de translação e rotação, conforme demonstrado na Fig. 4.

Essa representação do robô é necessária para conseguir extrair os parâmetros de Denavit e Hartenberg na forma como é apresentado na Tabela 2, e se encontrar as matrizes de transformação, conforme citado na seção anterior.

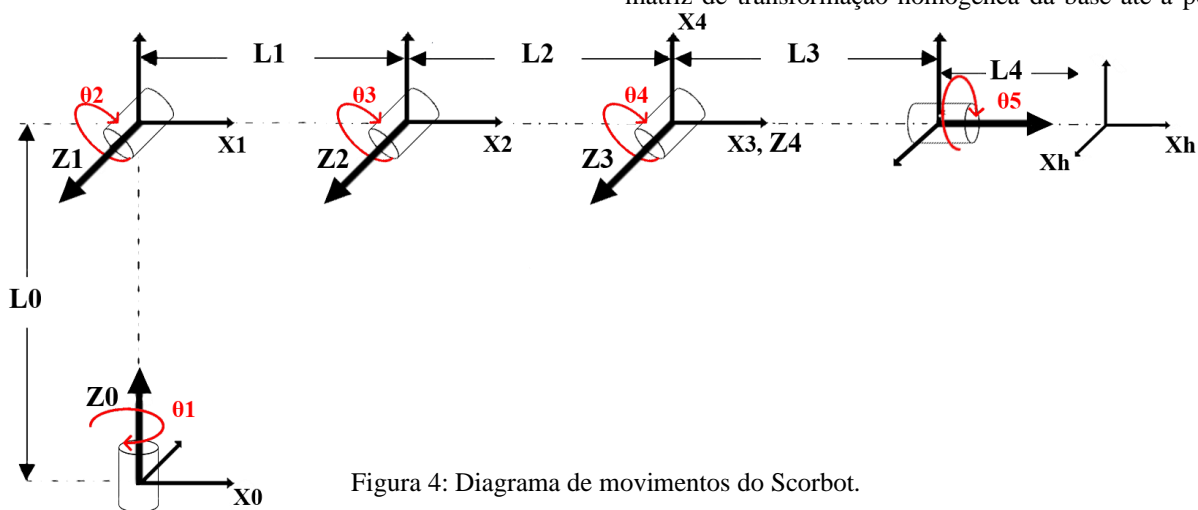


Figura 4: Diagrama de movimentos do Scorbot.

Tabela 2: Parâmetros de Denavit e Hartenberg para o robô da Fig. 4.

ELO	a	α	d	θ
0-1	0	$\pi/2$	L0	θ_1^*
1-2	L1	0	0	θ_2^*
2-3	L2	0	0	θ_3^*
3-4	0	$\pi/2$	0	$\pi/2+\theta_4^*$
4-h	0	0	L3+L4	θ_5^*

É importante frisar que no diagrama de movimentos o robô já deve estar na sua posição inicial, pois para cada posição inicial diferente, obter-se-á uma tabela de Denavit e Hartenberg diferente. Para esse robô, foi optada pela posição inicial demonstrada na Fig. 6 devido ao fato de que se tornará mais fácil a fixação das chaves de posicionamento no modelo físico.

B. Orientação da Ferramenta

Tanto para se encontrar a equação de Cinemática direta, quanto para ter a prova real de que o robô está se movendo corretamente, será necessário o uso na matriz mostrada em (1). Essa matriz representa a posição da ponta da ferramenta após um movimento, tanto em relação a origem do sistema quanto a rotação de cada vetor de direção desta. A matriz indicada, será também denominada [noap] a partir de agora.

Da matriz [noap], todos os elementos serão conhecidos, para tanto, é importante saber o que significa cada um destes. Os elementos “n”, de (1) representam os eixos normais aos vetores “o” e “a”, que são respectivamente os vetores de orientação e de direção na qual a pinça irá abordar a peça e são obtidos calculando os três cossenos diretores em relação aos eixos “x”, “y” e “z” da origem. Os elementos “p” representam a posição cartesiana na qual deverá estar a pinça. É importante frisar que o referencial de todos os termos explicitados acima é o mesmo da base do robô.[8]

C. Cinemática Direta

Para se conseguir calcular a cinemática inversa, que será responsável por posicionar o robô, deve-se calcular primeiramente a cinemática direta, para se conseguir obter a matriz de transformação homogênea da base até a ponta da

ferramenta do robô. Para realizar os cálculos, será utilizado o programa Matlab®.

A matriz de transformação homogênea é expressa em (7), e nela estão contidas informações de rotação e translação de um sistema de coordenadas para outro em relação a um sistema de coordenadas fixo [8]. Eq. (3) a (5) são demonstradas respectivamente, as matrizes de rotação de um vetor em torno do eixo x, de rotação em torno do eixo y, em torno do eixo z, e de translação puras, que compõe (2) [8].

A partir desse momento, as expressões “cos(θ1)” e “sen(θ1)” serão substituídas por “C₁” e “S₁”, respectivamente, pois serão geradas matrizes muito extensas.

$$[noap] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_x \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_h^0 = \begin{bmatrix} -C_1 C_5 S_{234} + S_1 S_2 & -C_5 S_1 + C_1 S_{234} S_5 & C_1 C_{234} & C_1 (L_1 C_2 + L_2 C_{23} + C_{234} (L_3 + L_4)) \\ -C_5 S_1 S_{234} - C_1 S_5 & -C_1 C_5 + S_1 S_{234} S_5 & S_1 C_{234} & S_1 (L_1 C_2 + L_2 C_{23} + C_{234} (L_3 + L_4)) \\ C_5 C_{234} & -S_5 C_{234} & S_{234} & L_0 + L_1 S_2 + L_2 S_{23} + S_{234} (L_3 + L_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} n_x C_1 + n_y S_1 & o_x C_1 + o_y S_1 & a_x C_1 + a_y S_1 & p_x C_1 + p_y S_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z - L_0 \\ n_x S_1 - n_y C_1 & o_x S_1 - o_y C_1 & a_x S_1 - a_y C_1 & p_x S_1 - p_y C_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_5 S_{234} & S_5 S_{234} & C_{234} & L_1 C_2 + L_2 C_{23} + C_{234} (L_3 + L_4) \\ C_5 C_{234} & -S_5 C_{234} & S_{234} & L_1 S_2 + L_2 S_{23} + S_{234} (L_3 + L_4) \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} -S_{234} (n_x C_1 + n_y S_1) & -S_{234} (o_x C_1 + o_y S_1) & -S_{234} (a_x C_1 + a_y S_1) & C_{234} (p_z - L_0) + L_1 S_{23} + L_2 S_4 \\ +n_z C_{234} & +o_z C_{234} & +a_z C_{234} & -S_{234} (p_x C_1 + p_y S_1) \\ n_x S_1 - n_y C_1 & o_x S_1 - o_y C_1 & a_x S_1 - a_y C_1 & p_x S_1 - p_y C_1 \\ C_{234} (n_x C_1 + n_y S_1) & C_{234} (o_x C_1 + o_y S_1) & C_{234} (a_x C_1 + a_y S_1) & S_{234} (p_z - L_0) - L_1 C_{23} - L_2 C_4 \\ +n_z S_{234} & +o_z S_{234} & +a_z S_{234} & +C_{234} (p_x C_1 + p_y S_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 + L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Como citado anteriormente, para se encontrar a matriz que define a cinemática direta, devemos encontrar antes todas as matrizes de rotação e translação da ponta da ferramenta até a base dela. Sendo assim, utilizando (6) pode ser encontrado a matriz da base até o elo 1, ou o “ELO 0-1”, representado na Fig. 6, e posteriormente as demais matrizes homogêneas entre cada elo. Com essas informações, utilizando (7), encontra-se a matriz de transformação da ponta da ferramenta a base do robô. Para o Scorbot, essa matriz está representada em (9), aonde A_1^0 é a matriz de transformação da junta 1 para a junta 0, A_2^1 é a matriz de transformação da junta 2 para a junta 1 e assim por diante [9].

$$A_h^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_h^4 \quad (6)$$

Com a matriz homogênea obtida, e sendo os valores de L0, L1, L2, L3, L4 e Lh (representando a ferramenta) dados, basta se inserir os ângulos, e se terá a posição final da ponta do robô, sendo que a coordenada em relação ao eixo ‘X’ será extraída da posição (1,4), da Equação 2, em relação ao eixo ‘Y’ será extraída da posição (2,4) e em relação ao eixo ‘Z’ da posição (3,4) conforme a [noap].

D. Cinemática Inversa

Para calcular a cinemática inversa deste robô, não poderá ser utilizado um método genérico, como feito na seção anterior. O método mais viável para se utilizar é o método da Solução Geral [8], que também pode ser chamado de Método do Desacoplamento. Esse método assim é chamado pois, para facilitar a extração das equações em função dos ângulos θ, sempre que houver rotação no eixo de referência o braço será desacoplado quantas vezes forem necessárias, formando outros subsistemas. Em (10) e (11), são apresentadas as duas equações de desacoplamento que serão utilizadas para a resolução.

O método do desacoplamento tem como base a igualdade apresentada em (8), e consiste em pré-multiplicar ambos lados desta pela matriz de transformação A_n^{-1} , aonde “n” é o último elo desacoplado, ou seja, o elo no qual o eixo “z” tem seu sentido trocado.

$$[RHS] = [noap] \quad (10)$$

$$A_1^{0^{-1}} * [noap] = A_1^{0^{-1}} * A_h^0 \quad (11)$$

$$A_4^{3^{-1}} * A_3^{2^{-1}} * A_2^{1^{-1}} * A_1^{0^{-1}} * [noap] = A_4^{3^{-1}} * A_3^{2^{-1}} * A_2^{1^{-1}} * A_1^{0^{-1}} * A_h^4 \quad (12)$$

A partir da igualdade apresentada em (8) e demonstrada em sua forma completa em (9), é possível extrair algumas relações para se criar um sistema de equações apenas dependente da matriz [noap].

Para todas as igualdades em que se for necessário o uso de arco tangente, será realçada a substituição dessa função matemática pela função do Matlab® “atan2”. Essa função realiza o mesmo cálculo da função matemática convencional, porém retorna apenas um valor testando se o retorno esperado está presente em um intervalo de $-\pi$ a π , sendo que este deverá ser real. [11]. Isso facilita para que não tenhamos 2 possibilidades de posicionamento para cada junta do robô, de forma a ter menor peso computacional na hora de realizar os cálculos das matrizes das cinemáticas.

Em primeiro momento será analisada a equação apresentada em (10). A partir dos elementos (3,4) da Equação 1, pode-se extrair a relação (15) e descobrir o valor do ângulo da junta representada por θ_1 na Fig. 4.

$$\theta_1 = atan2(P_y, P_x) \quad (13)$$

Para extrair o valor de θ_{234} (16), que será usado posteriormente, serão utilizados os elementos (1,3) e (2,3), da Equação 2, gerando as equações (14) e (15).

$$S_{234} = a_z \quad (14)$$

$$C_{234} = a_x C_1 + a_y S_1 \quad (15)$$

$$\theta_{234} = atan2(S_{234}, C_{234}) \quad (16)$$

Para θ_5 (19) serão utilizados (3,1) e (3,2) para se obter as relações (17) e (18).

$$S_5 = n_x S_1 - n_y C_1 \quad (17)$$

$$C_5 = o_x S_1 - o_y C_1 \quad (18)$$

$$\theta_5 = atan2(S_5, C_5) \quad (19)$$

Através de (1,4) e (2,4), encontrando (20) e (21), para se encontrar θ_3 (22).

$$C_3 = \frac{(p_x C_1 + p_y S_1 - (L_3 + L_4) C_{234})^2 + (p_z - L_0 - (L_3 + L_4) S_{234})^2}{2L_1 L_2} \quad (20)$$

$$S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2} \quad (21)$$

$$\theta_3 = atan2(S_3, C_3) \quad (22)$$

Através das mesmas equações utilizadas para encontrar θ_{234} , mas isolando termos diferentes, pode-se chegar às equações apresentadas em (23) e (24), permitindo com que se encontre θ_2 (25).

$$S_2 = \frac{(C_3 a_3 + a_2)(p_z - S_{234} a_4) - S_3 a_3 (p_x C_1 + p_y S_1 - C_{234} a_3)}{(C_3 a_3 + a_2)^2 + S_3^2 a_3^2} \quad (23)$$

$$C_2 = \frac{(C_3 a_3 + a_2)(p_x C_1 + p_y S_1 - C_{234} a_4) - S_3 a_3 (p_z - S_{234} a_4)}{(C_3 a_3 + a_2)^2 + S_3^2 a_3^2} \quad (24)$$

$$\theta_2 = atan2(S_2, C_2) \quad (25)$$

Por fim, utilizando-se da propriedade apresentada em (26), pode-se obter o valor do último *theta* esperado através da equação mostrada em (27).

$$\theta_{234} = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (26)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \quad (27)$$

Na Equação 9, é apresentado o desacoplamento da junta 5 do restante do robô. Mesmo já tendo sido obtidas todas as equações para os *thetas* necessários, essa matriz possibilita novas relações, caso seja necessário, como por exemplo, a busca de θ_5 com entradas diferentes, como pode ser observado no elemento (1,2) desta figura.

E. Espaço de Trabalho

Para se saber os limites de atuação de um braço robótico, deve-se primeiramente ter noção do espaço de trabalho deste. Neste artigo, o espaço de trabalho será utilizado para realizar

um teste e saber se a posição e orientação determinadas para o efetuador do robô são atingíveis, evitando assim colisões e danos à estrutura mecânica. Nas Fig. 2 e 3 são apresentados espaços de trabalho representativos, no momento em que se plota os limites físicos do robô é observada uma nuvem de pontos em 3 dimensões.

Através das Fig. 5, 6 e 7, pode ser observado o espaço de trabalho construído através das equações de cinemática direta, ou seja, os limites inseridos para esse modelo são limites aproximados, bem como o comprimento dos elos. Nesse caso, pode-se dizer que é uma aproximação do espaço de trabalho que poderá ser realizado com as limitações corretas do robô através do equacionamento de cinemática inversa.

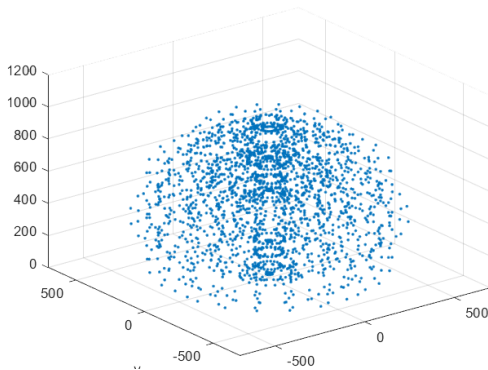


Figura 5: Espaço de trabalho obtido através das equações de cinemática direta, similar a uma meia-esfera.

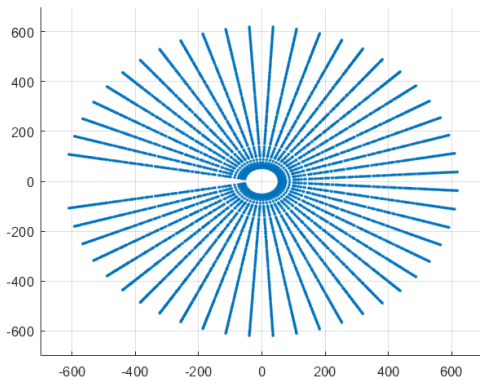


Figura 6: Vista superior do espaço de trabalho obtido através das equações de cinemática direta

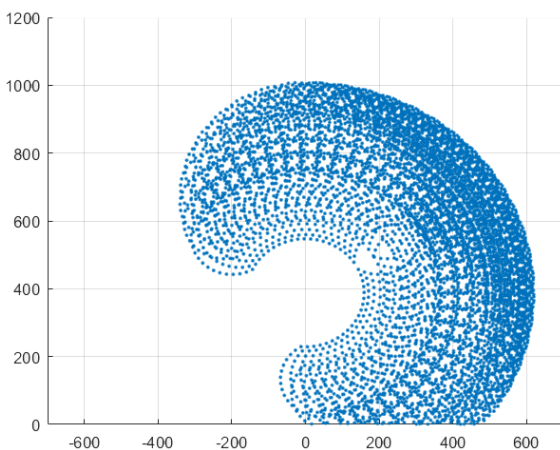


Figura 7: Vista lateral do espaço de trabalho obtido através das equações de cinemática direta.

F. Dimensionamento de componentes mecânicos

Para poder realizar o correto dimensionamento dos motores que serão responsáveis por realizar o movimento de cada uma das juntas, deverá ser resolvido o diagrama de corpo livre deste braço robótico, levando-se em conta a carga máxima permitida para o braço robótico e as massas dos conjuntos fabricados e dos componentes [13].

Nesse momento, para cada uma das juntas do robô, deverá ser calculado o momento angular, com o viés de se descobrir o torque mínimo do motor para as movimentações. Para os casos apresentados nas equações abaixo, será considerado a velocidade angular máxima de $1^\circ/\text{seg.}$, conforme manual de robôs didáticos similares ao projetado neste trabalho [14].

Para descobrir os torques necessários por cada junta, partiremos de (28) e (29). Para (28), temos o torque como função do raio e do módulo da força causada pelo corpo, ou seja, será encontrado o torque necessário para manter o corpo em equilíbrio rotacional, ou com velocidade constante/nula [15], essa é a equação que define o torque. Já em (29) é apresentado o torque como função do momento de inércia e da aceleração angular do corpo, ou seja, a quantidade de movimento necessária para que um corpo com determinado momento de inércia atinja uma velocidade angular em certo tempo [16], aonde o momento de inércia pode ser descrito por (30), tomando os elos como barras com massa distribuída. Como em todas as juntas do robô há um requisito de aceleração angular mínimo, partiremos de (31).

$$\tau = F * d * \sin(\theta) \quad (28)$$

$$\tau = I * \alpha \quad (29)$$

$$I = \frac{1}{3} * m * R^2 \quad (30)$$

$$\tau = \sum F * d * \sin(\theta) + I * \alpha \quad (31)$$

IV. PROPOSTA

Após a resolução dos cálculos de cinemática do manipulador, inicia-se o delineamento da proposta deste trabalho, que fica dividido nas seguintes seções:

A. Projeto mecânico

Para se ter dimensões do tamanho do robô e para que seja possível calcular o torque necessário em cada junta, foi adaptado um esboço de projeto disponibilizado por Luiz Valdes, através da plataforma gratuita GrabCAD [12]. É bom ressaltar que no modelo apresentado na sequência, por se tratar de um pré-projeto, será apenas apresentada a montagem dos componentes sem qualquer fixação ou transmissão, apenas realmente para visualização. Na Fig. 8 é apresentada uma vista isométrica do projeto, enquanto nas Fig. 9 e 10 são apresentadas as vistas lateral esquerda e superior.



Figura 8: Vista isométrica do pré-projeto mecânico.

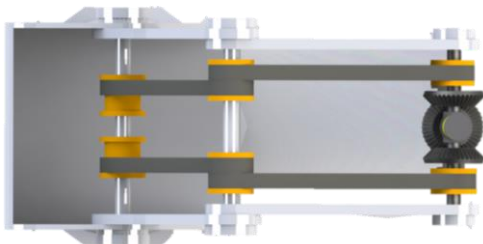


Figura 9: Vista superior do pré-projeto mecânico.

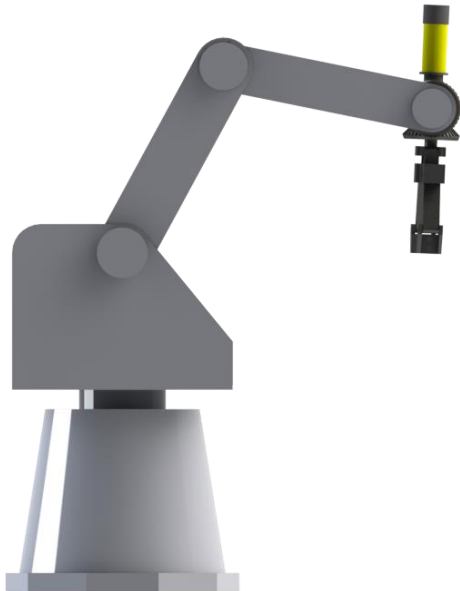


Figura 10: Vista lateral esquerda do pré-projeto mecânico.

B. Exportação de 3D para Matlab

A simulação foi realizada através da importação dos componentes desenhados no SolidWorks®, aonde a exportação foi realizada através do modelo do pré-projeto apresentado na seção anterior com pequenas alterações, pois quanto menos componentes contidos em uma montagem, menor o peso computacional para a simulação, evitando travamentos e falhas.

A versão simplificada do braço robótico 3D foi exportada para o Matlab®, onde será disponibilizado o modelo já integrado para que seja realizada a comunicação entre o modelo de controle do braço robótico com o modelo 3D já exportado.

Para ser possível realizar a exportação do SolidWorks® para um modelo com uma extensão legível para o Matlab®, foi necessária a utilização de uma extensão chamada de SimscapeMultibody™, desenvolvida pela MathWorks.

C. Projeto mecânico

Em primeiro momento, será necessário definir o tempo no qual se deseja para o motor atingir sua velocidade máxima, permitindo assim calcular a aceleração que o conjunto deve ter, e por consequência, a força/torque necessários para realizar o movimento. Para esse caso, o tempo para atingir a velocidade máxima será de 1 s, e através de (32) e (33), que se referem a conversão de graus para radianos e cálculo da aceleração angular, poderá ser calculado o valor da aceleração angular necessária para que o sistema atinja os valores mínimos requeridos nas unidades de $\text{rad}^*\text{s}^{-2}$.

$$\text{rad} = \frac{^\circ * \pi}{180} \quad (32)$$

$$\omega = \frac{\Delta V}{t} \quad (33)$$

É importante ressaltar que as distâncias citadas acima (31) se referem a distâncias o eixo de aplicação o torque e o comprimento final do objeto movido. Com essa informação e observando o diagrama da Fig.4, pode-se concluir que os elos 0 e 4 possuem um braço de alavanca igual a zero, ou seja, sua inércia teórica independe do movimento e das massas dos outros elos, mas apenas do momento necessário para tirar o conjunto referido da inércia nas condições pré-dispostas.

Outra informação importante de se observar através da Fig. 4 é que, ao se calcular o torque necessário para realizar movimento na junta 3 deverá ser levado em conta a pior situação presente na junta 4, e para calcular o momento necessário para a junta 2, será necessário levar em consideração os momentos atuantes nas piores situações das juntas 3 e 4, sendo que a pior condição para esse caso se dá quando o vetor velocidade da massa movida estiver no mesmo sentido que a força da gravidade, porém em direção oposta.

Tomando como exemplo uma movimentação do robô desenvolvido neste artigo, em sua capacidade máxima de carga. Se todas as juntas do robô estiverem fixas, com exceção da junta 2, será necessário um determinado torque para tirar esse conjunto da inércia, conforme Fig. 11. Agora, se enquanto a junta 2 estiver realizando o movimento, a junta 3 começar a se movimentar no mesmo sentido, conforme Fig. 12, o torque apresentado anteriormente já não será o suficiente para manter a velocidade constante, então terá de ser aumentado, e o mesmo vale se a junta 2 começar a se movimentar também.



Figura 11: Vista lateral representativa do robô com torque atuante na junta 2.

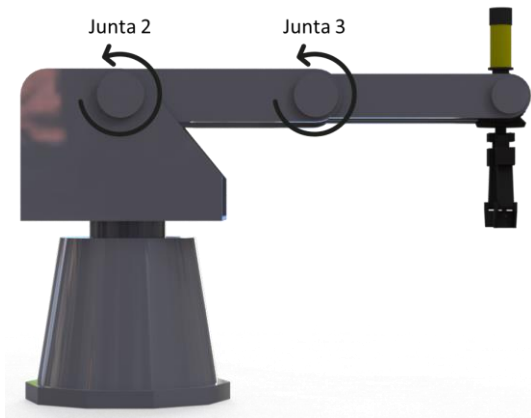


Figura 12: Vista lateral representativa do robô com torques atuantes nas juntas 2 e 3.

Com os torques mínimos necessários para cada uma das juntas discriminado, será possível determinar qual o torque dos motores e qual a relação de polias deverá ser usada para realizar os movimentos sem travamentos ou com sobrecarga de componentes.

V. RESULTADOS

Este trabalho está dividido em dois projetos, um projeto simplificado utilizado para simulação, visualização e entendimento do modelo, e o outro um projeto completo, contando com todos os componentes necessário para a operação do braço que será apresentada na sequência

A. Projeto Mecânico

Visando realizar o projeto de um robô de fabricação simples, ou seja, que não exija maquinário de precisão para manufaturar suas peças e de simples montagem, com itens de fácil obtenção, o robô deverá possuir o maior número de componentes industrialmente padronizados possíveis.

Como exemplo de economia no momento da manufatura, ao invés de se usar encaixes usinados para rolamento, foram optados por se utilizar mancais com rolamentos, conforme demonstrado na Fig. 13, e como exemplo para os componentes tem-se as polias e as correias, que foram utilizadas o modelo GT2, facilmente encontrados em lojas e comércios de peças para produtos eletrônicos ou em e-

commerces, por estarem presentes na maioria dos projetos de impressoras 3D e de mini routers CNC.

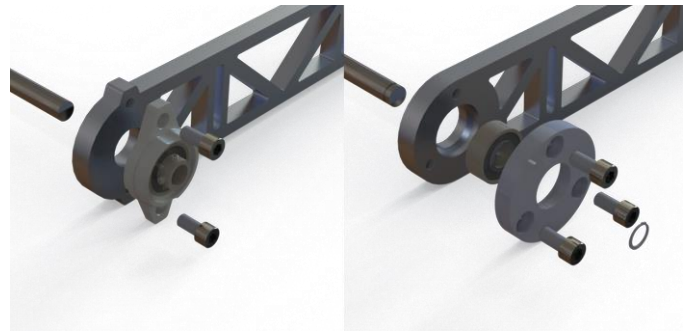


Figura 13: Comparação entre duas possibilidades de montagem de elo, sendo uma simples(esquerda) e outra complexa(direita).

O sistema de transmissão utilizado fora através de polias e correias, aonde o torque sai dos motores localizados na base do robô, esse torque é transmitido através de polias rolamentadas, até que este chegue à polia responsável por realizar a movimentação no eixo, estando essa fixada no eixo movido através de um parafuso sextavado interno sem cabeça, com rosca $M5 \times 0,7mm$. Na Fig. 14 podem ser observados os elementos de transmissão, aonde as correias estão destacadas na cor vermelha.

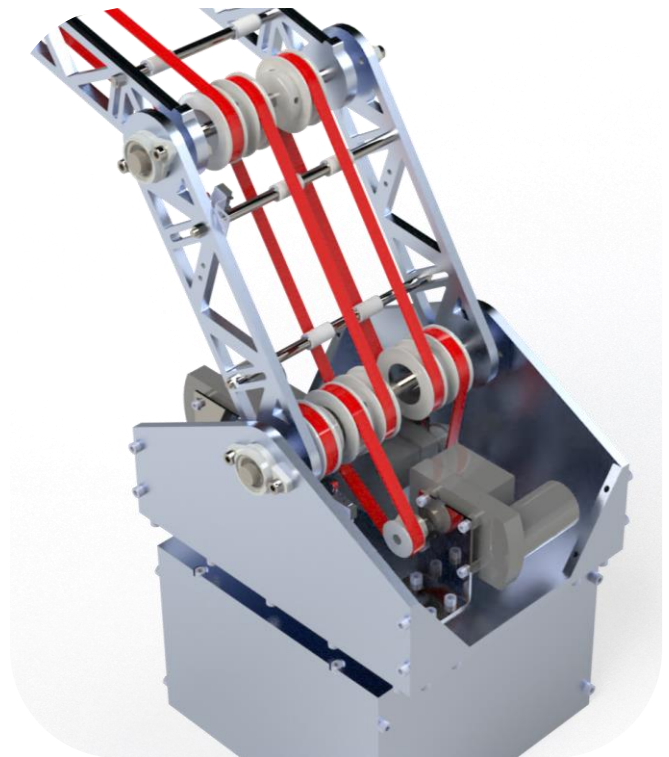


Figura 14: Demonstração dos elementos de transmissão de torque do robô.

Também pensando em simplificação de projeto e redução de custo, foram projetados os esticadores de correia presos diretamente na estrutura do robô, e no lugar de rolamentos para permitir que o esticador funcione de maneira eficaz, fora usado tubos de PTFE presos por anéis elásticos, conforme pode ser visualizado na Fig. 15.

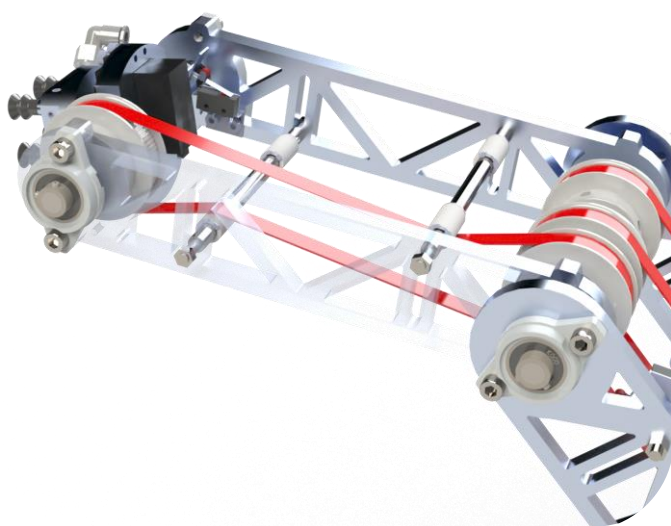


Figura 15: Demonstração dos esticadores de correia.

Permitindo a flexibilidade de utilização de motores com encoder incremental, motores com encoder absoluto, motores de passo ou até mesmo servomotores, foram previstas chaves mecânicas para zeramento das posições. Essas chaves são apresentadas na Fig. 16.

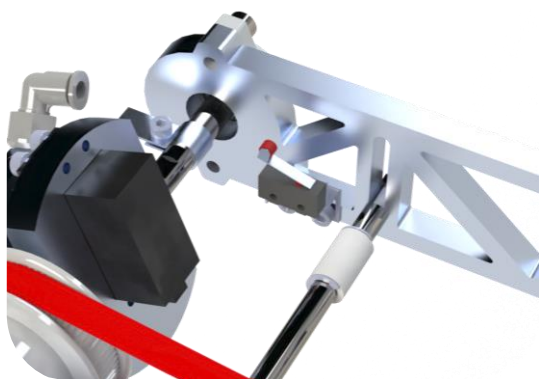


Figura 16: Sistema de zeramento de posição através de chave mecânica.

No efetuador, foi proposta a instalação de um ferramental com ventosas, para manipulação de objetos através de vácuo, conforme Fig. 17.

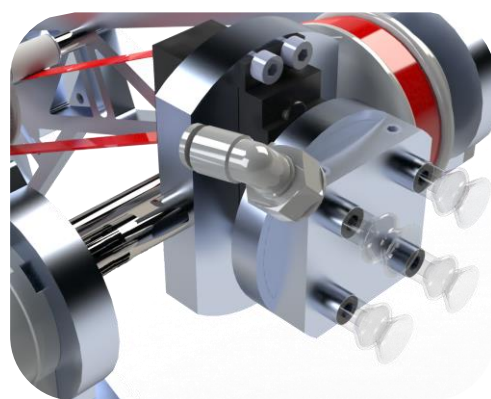


Figura 18: Ferramental para efetuador com ventosas.

Por fim, na Fig. 18 é apresentada uma imagem do robô em diferentes posições, para visualização do modelo criado, e da proposta a qual este realizaria seus movimentos.

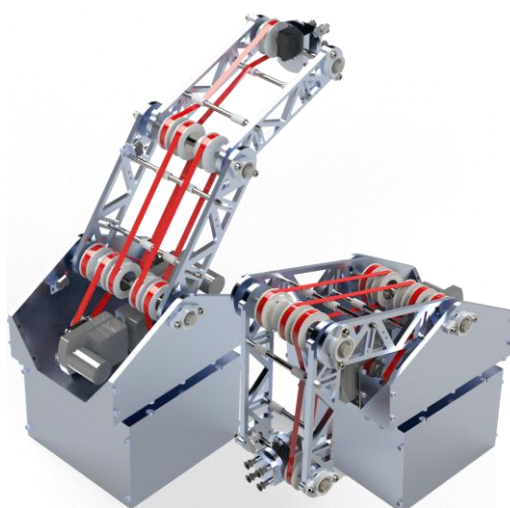


Figura 19: Demonstração do projeto completo em duas posições alcançáveis distintas.

B. Exportação

Na Fig. 19 pode-se observar o modelo criado através do *Simulink*TM, aonde estão presentes os blocos para controle do braço robótico, bem como os blocos para orientação do braço e os blocos de representação do modelo 3D adaptado. Também estão presentes os blocos que representam ações externas, como a força da gravidade, por exemplo.

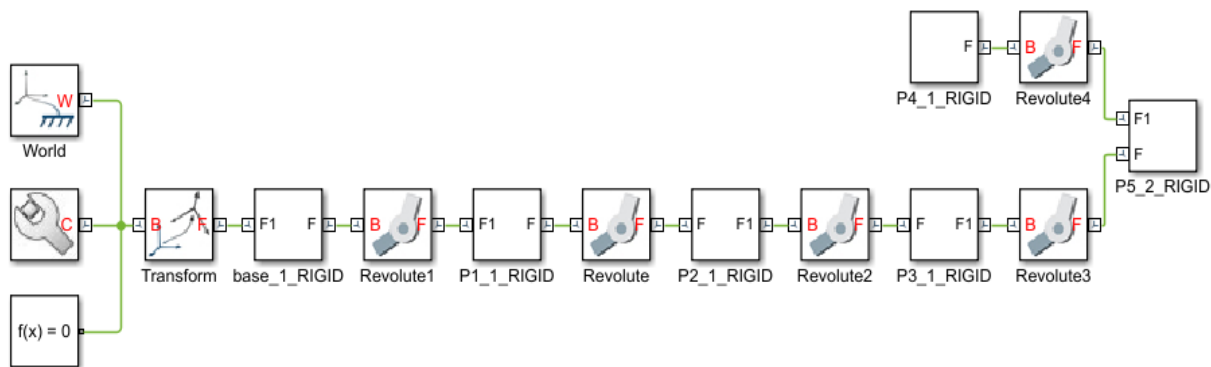


Figura 17: Diagrama de controle base para o braço robótico proposto

Através do modelo apresentado acima, e com os modelos 3D exportados do SolidWorks®, é possível realizar a simulação de movimentos do braço robótico. Utilizando-se os blocos apresentados acima, com controles padrões e sem qualquer comando ou interface de controle, o robô irá realizar movimentos aleatórios. Nas Fig. 20 e 21, são apresentadas duas imagens do braço robótico em seu ambiente de simulação, visando mostrar que seus movimentos contemplam todos os graus de liberdade previstos para este desde o início do projeto.

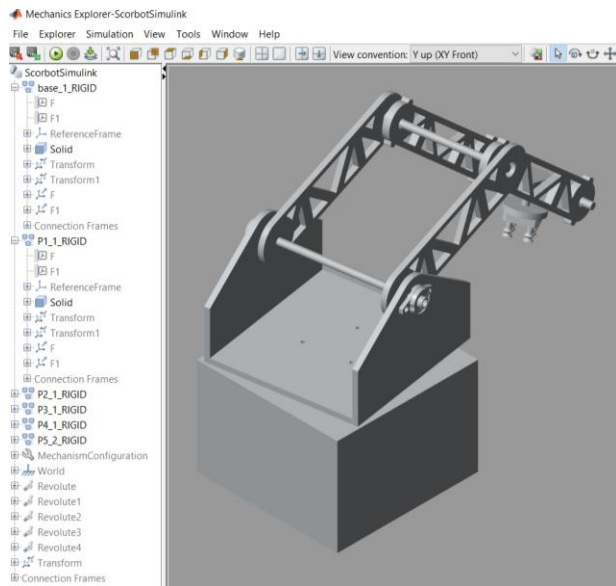


Figura 20: Representação do braço robótico em seu ambiente de simulação em uma posição aleatória.

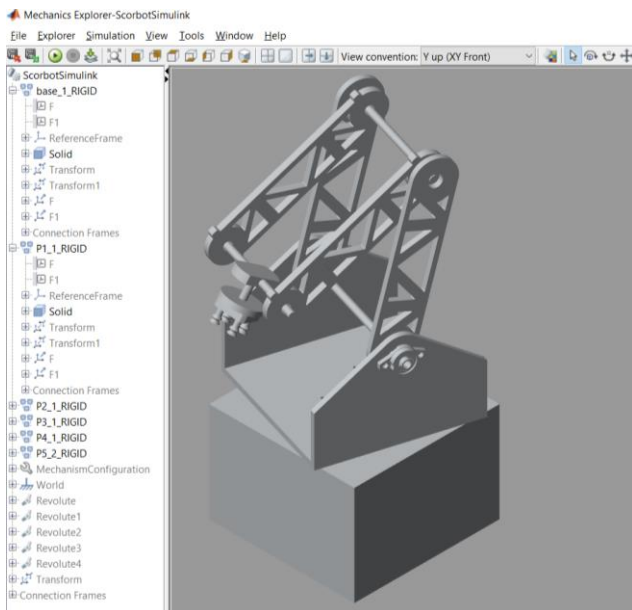


Figura 21: Representação do braço robótico em seu ambiente de simulação em outra posição aleatória.

Nesse momento, utilizando-se dos blocos do modelo de controle e das cinemáticas resolvidas do robô, é possível realizar a integração entre ambos para que seja possível simular um movimento controlado deste braço.

C. Momentos

Para realizar esses cálculos, deverá ser analisado cada um dos elos individualmente, então será realizado o diagrama de corpo livre para cada um dos casos do robô, em seu ponto de pior condição para o torque, ou seja, com os pesos paralelos à força da gravidade. Os elos serão discriminados conforme apresentado na Fig. 6.

Iniciando-se pelo Elo L4, pode-se observar no diagrama de corpo livre na Fig. 22 que o centro de massa do conjunto movido se encontra no eixo de rotação, portanto, o torque necessário para mover esse conjunto depende apenas do momento de inércia deste (34). Para fins de simplificação, será usado o momento de inércia de um cilindro com eixo no centro de seu raio, e massa igualmente distribuída (35).

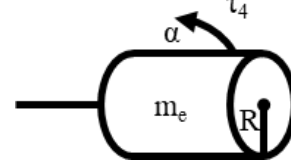


Figura 22: Diagrama de corpo livre para cálculo do torque mínimo na junta 4.

$$\tau_1 = IE_1 * \alpha \quad (34)$$

$$IE_1 = \frac{1}{2} * (m_e + m_4) * R^2 * \alpha \quad (35)$$

Na sequência, será calculado o momento para movimentação do elo L3. Abaixo, na Fig. 23, pode ser visualizado o diagrama de corpo livre deste, aonde pode-se observar que estão presentes as informações do elo L4, pois a massa deste tem influência direta na quantidade de movimento necessária para que seja possível realizar a rotação do mesmo. Através do diagrama da Fig. 19 obtém-se (36), que é a equação para determinar o torque mínimo necessário para o movimento da junta 3 nas condições especificadas.

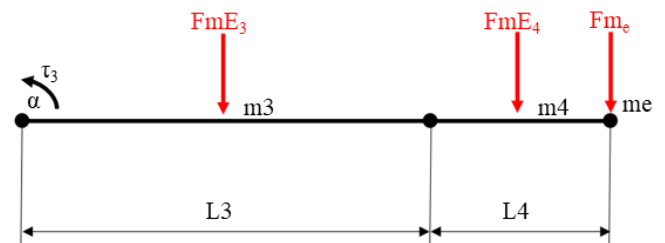


Figura 23: Diagrama de corpo livre para cálculo do torque mínimo na junta 3.

$$\tau_3 = \left[FmE_3 * \frac{L_3}{2} + FmE_4 * \left(L_3 + \frac{L_4}{2} \right) + Fm_e * (L_3 + L_4) \right] + \left[\frac{1}{2} * (m_3 + m_4 + m_e) * (L_3 + L_4)^2 * \alpha \right] \quad (36)$$

Agora será calculado, partindo-se do mesmo princípio do elo L3, o elo L2. Para cálculo deste elo, levando em conta que estão sendo analisadas as piores condições para movimentação, deverá ser considerado o torque resultante da máxima aceleração de L3, ou seja, o torque τ_3 . Na Fig. 24 é apresentado o diagrama de corpo livre do elo L2, aonde pode

ser observado a presença do torque anteriormente calculado, permitindo que se chegue a (36), e juntando (36) com (37), temos a equação completa (38).

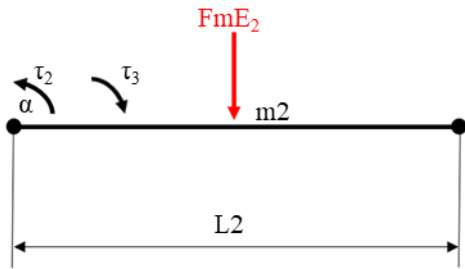


Figura 24: Diagrama de corpo livre para cálculo do torque mínimo na junta 2.

$$\tau_2 = FmE_2 * \frac{L_2}{2} + IE_2 * \alpha + \tau_3 \quad (37)$$

$$\tau_2 = FmE_2 * \frac{L_2}{2} + \frac{1}{2} * m_2 * L_2^2 * \alpha + \left[FmE_3 * \frac{L_3}{2} + FmE_4 * \left(L_3 + \frac{L_4}{2} \right) + Fme * (L_3 + L_4) \right] + \left[\frac{1}{2} * (m_3 + m_4 + m_3) * (L_3 + L_4)^2 * \alpha \right] \quad (38)$$

Assim como feito para realizar o cálculo do momento do elo L2, utilizando o momento do elo posterior, será realizado para cálculo do momento do elo 1. Na Fig. 25 é apresentado o diagrama de corpo livre do elo 1, aonde pode-se perceber a presença do Elo 2. Na sequência estão apresentadas a equação do torque em função de τ_2 (39), e a função do torque em sua versão completa, com todas as constantes presentes no projeto (40).

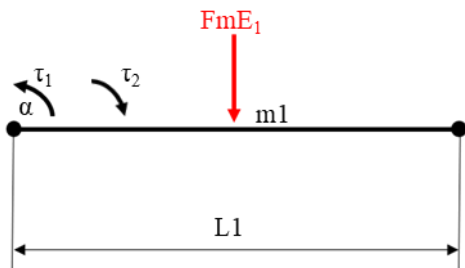


Figura 25: Diagrama de corpo livre para cálculo do torque mínimo na junta 1.

$$\tau_1 = FmE_1 * \frac{L_1}{2} + IE_1 * \alpha + \tau_2 \quad (39)$$

$$\tau_1 = FmE_1 * \frac{L_1}{2} + \frac{1}{2} * m_1 * L_1^2 * \alpha + \left[FmE_3 * \frac{L_3}{2} + FmE_4 * \left(L_3 + \frac{L_4}{2} \right) + Fme * (L_3 + L_4) \right] + \left[\frac{1}{2} * (m_3 + m_4 + m_3) * (L_3 + L_4)^2 * \alpha \right] \quad (40)$$

Por fim, será calculado o momento para movimentação do elo 0. Esse elo, diferentemente dos elos 1 e 2 não possui alteração de momento em função da movimentação dos elos posteriores, pois não há a força gravitacional atuando em sentido contrário à força do movimento causado pelo torque. Com isso, analisando a Fig.26, é possível se chegar a (41), mas deve-se ter atenção de ao calcular o torque τ_0 a partir do

momento do conjunto, o momento de L0 também deve ser considerado, e o momento de L0 pode ser expresso por (42), aonde "R0" é o raio considerado para cálculo da inércia do corpo. Por fim, somando ambos os momentos, τ_0 será expresso por (43).

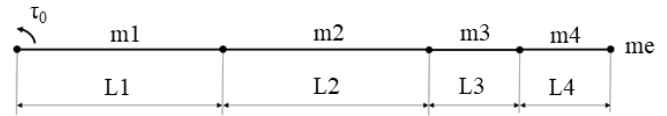


Figura 26: Diagrama de corpo livre para cálculo do torque mínimo na junta 0.

$$\tau_{L_1, L_2, L_3, L_4} = \frac{1}{3} * (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) * (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)^2 * \alpha \quad (41)$$

$$\tau_{L_0} = \frac{1}{3} * m_0 * R_0^2 * \alpha \quad (42)$$

$$\tau_{L_0} = \frac{1}{3} * [(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) * (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)^2 * \alpha] + m_0 * R_0^2 * \alpha \quad (43)$$

Com os dados acima e com as informações de massas presentes em cada um dos elos do robô presentes na Tabela 3, que é a tabela que relaciona as massas e as distâncias de cada um dos elos em relação a origem de seu braço de alavanca, podem ser encontrados os momentos necessários para realizar as movimentações do robô, e levando-se em conta que a máxima carga permitida no efetuador será de 2 kg, será possível obter o valor do torque mínimo necessário para que cada um dos motores possa realizar as movimentações desejadas.

Tabela 3:Relação de massas e distâncias entre juntas do robô.

Referência	Cor	Distância	Massa
Base	Amarelo	-	4,07 kg
L0	Vermelho	0,00 m	9,02 kg
L1	Azul	0,22 m	1,39 kg
L2	Verde	0,22 m	1,14 kg
L3	Rosa	0,22 m	0,49 kg
L4	Branco	0,06 m	0,20 kg
Carga	-	0,30 m	2,00 kg

Para facilitar a consulta a tabela, será usada a Fig. 27, a qual apresenta o projeto do robô com as cores discriminadas na tabela, podendo consultar quais os componentes foram tomados em conta no momento em que a massa dos conjuntos fora extraída do SolidWorks®.

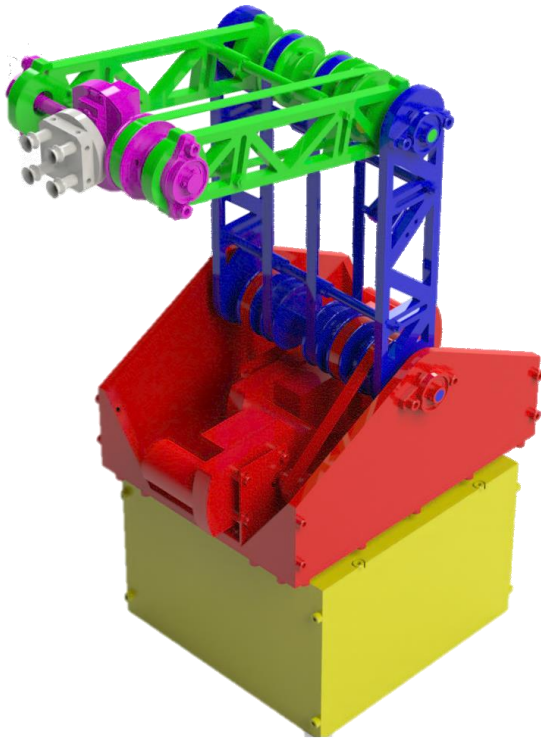


Figura 27: Demonstração do robô separado por cores para visualização dos subconjuntos.

Na sequência, na Tabela 4, são apresentados os resultados dos cálculos de torque realizados para cada uma das juntas do robô.

Tabela 4: Resultados dos torques mínimos por junta.

Junta	Torque
4	0,002 N.m
3	12,407 N.m
2	13,637 N.m
1	15,138 N.m
0	0,129 N.m

Além de calcular os torques mínimos, devem ser levados em consideração mais alguns fatores antes de se definir os motores que serão utilizados, como o rendimento das transmissões e rolamentos, e o coeficiente de segurança que será aplicado sobre todo o sistema como forma de garantia do dimensionamento. Para as transmissões envolvendo polias e correias, será considerado um rendimento de 97% por transmissão, e para os rolamentos de 90%, e como coeficiente de segurança, será usado 115% [17].

Como cada uma das juntas passa por diferentes quantidades de componentes de transmissão, na Tabela 5 é apresentada uma síntese desses componentes por junta, bem como o resultado final de torque requerido, já levando em conta o Fator de Segurança. É importante frisar que para o cálculo da eficiência total, serão considerados apenas os rolamentos que estiverem em série.

Tabela 5: Torques necessário nos motores para cada junta.

Junta	Torque	η Rolamentos em série	η Polias em série	Torque final
4	0,002 N.m	1,00	1,00	0,002 N.m
3	12,407 N.m	0,73	0,91	19,380 N.m
2	13,637 N.m	0,81	0,94	19,590 N.m
1	15,138 N.m	0,90	0,97	19,672 N.m
0	0,129 N.m	0,90	0,97	0,168 N.m

VI. CONCLUSÃO

O projeto de um braço robótico antropomorfo requer conhecimento em diversas áreas distintas para ser executado, tornando essa uma tarefa de alta complexidade, e deixa esse tipo de tecnologia inacessível para os campos da aprendizagem e da indústria. Desenvolver um projeto que deixa uma base sólida para a construção de uma bancada de robótica é um grande passo para o aperfeiçoamento de profissionais referente ao tema, e para a maior acessibilidade a equipamentos desse tipo.

Esse trabalho buscou relatar os métodos utilizados para se realizar análises numéricas referentes ao espaço de trabalho de um robô antropomorfo de 5 graus de liberdade mais efetuator, bem como os cálculos para dimensionamento dos motores necessários, e o projeto mecânico de forma a reduzir custos de montagem.

Os resultados de simulações de espaço de trabalho foram satisfatórios, apresentando resultados esperados e semelhantes a bibliografias realizadas através de braços semelhantes. Como esperado, as juntas que não possuíam a força da gravidade concorrente necessitaram um torque substancialmente menor do que as demais.

A exportação do modelo 3D simplificado criado no SolidWorks® para o Simulink™ atendeu as expectativas, fornecendo um modelo de controle de juntas dependentes conforme o esperado, sem nenhum erro de posicionamento.

O resultado do dimensionamento dos motores necessários para cada uma das juntas fora realizado com êxito, sendo todas as variáveis calculadas em função de valores conhecidos do robô.

Para que o projeto possa ser melhorado, pode ser realizado um código para integrar as informações de espaço de trabalho calculadas no Matlab® com o modelo do Simulink™, permitindo que seja realizada uma simulação das movimentações do robô conforme caminho solicitado através desta interface. Outra melhoria passível de ser realizada é implementar um sistema de controle para as movimentações de cada uma das juntas do robô, suavizando seus movimentos e melhorando a precisão do posicionamento.

Com isso, têm-se toda a base necessária para realizar uma bancada de simulação virtual para robótica, bastando implementar uma interface para comunicação entre o Matlab® e o Simulink™. Também se possui uma boa base para se fabricar um robô funcional, com os cálculos de cinemáticas realizados, e projeto realizado e dimensionado.

REFERÊNCIAS

- [1] Martín FM, S., Rodríguez F. M., Bayarri J. S., Redorta J. P., Escovar F. R., Fernández S. E. and Mavrich H. V. (2007). *Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci (Parte II)*. 1st ed. Actas Urológicas Españolas.
- [2] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, "*Robotics: Modelling, Planning and Control*", 1st ed. Springer, 2010, pp. 1-3.
- [3] C. Müller, "International Federation of Robotics", *IFR International Federation of Robotics*, 2019. [Online]. Available: <https://ifr.org>. [Accessed: 20- Sep- 2019].
- [4] J. Craig, *Robótica*, 3rd ed. Distrito Federal: Pearson Educación, 2006.
- [5] Maurício Rosário, *Robótica Industrial I*, 1st ed. São Paulo: Baraúna, 2010.
- [6] M. Teresa Orlandini Fernandes, "Capital, neoliberalismo e seus impactos no ensino superior paranaense: o desmonte da universidade pública", *Revista Cocar*, no. 26, 2019.
- [7] R Kumar and P. Chand, "Inverse Kinematics Solution for Trajectory Tracking using Artificial Neural Networks for SCORBOT ER-4u", in *International Conference on Automation*, Nova Zelândia, 2015, pp. 364-369.
- [8] S. Niku, *Introduction to Robotics*, 2nd ed. New York: JOHN WILEY & SONS, INC: gen, 2019.
- [9] V. ROMANO, "Robótica industrial: Aplicação na indústria de manufatura de processos. Edgard Blucher Ltda, 2002," tech. rep., ISBN 85-2120315-2.
- [10] M. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 1st ed. New York: JOHN WILEY & SONS, INC. Spong
- [11] "MATLABDocumentation", Mathworks.com, 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. [Accessed: 12-Sep- 2019]
- [12] *GrabCAD*, 2018. [Online]. Available: <https://grabcad.com/>. [Accessed: 09- Nov- 2019].
- [13] G. Finotti, "CÁLCULO EXPLÍCITO DOS TORQUES DOS ATUADORES DE UM ROBÔ PARALELO PLANO EMPREGANDO O MÉTODO DE KANE", São Paulo, São Paulo, 2008, pp. 77-83.
- [14] Eshed Robotech, "Scorbot ER II User's manual 6th edition", Available: "<http://www.theoldrobots.com/book45/ER3-Manual.pdf>" pp. 21.
- [15] HELERBROCK, Rafael. "Torque"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/torque-uma-forca.htm>. Acesso em 19 de junho de 2021.
- [16] SILVA, Domiciano Correa Marques da. "Sistema em rotação – momento de inércia"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/sistema-rotacao-momento-inercia.htm>. Acesso em 19 de junho de 2021.
- [17] Shigley, J., Mischke, C., Budynas, R., Aguiar, J. and Aguiar, J., 2005. *Projeto de Engenharia Mecânica (7ª Ed)*. Porto Alegre: Bookman.