

PROJETO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA AUXÍLIO A CADEIRANTES

Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto, lfmbnsn@gmail.com¹
Walter de Britto Vidal Filho, wbritto@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro – Brasília - DF

Resumo: A robótica assistiva é uma tecnologia que vem sendo utilizada para auxiliar pessoas com deficiência. Faz parte do conjunto de tecnologias assistivas que incluem os dispositivos e sistemas que proporcionam ou ampliam as habilidades funcionais de pessoas com algum tipo de deficiência. A tetraplegia é uma deficiência motora que afeta os membros superiores e inferiores de um indivíduo, gerando dependência total para interagir com o meio ambiente. Este artigo descreve uma configuração mecânica de um manipulador para ser fixado em uma cadeira de rodas. Foi descrito o projeto sistemático do sistema mecânico, abordando a análise de requisitos e o projeto de componentes, em seguida, um protótipo foi construído para testar o conceito. O trabalho descreve o desenvolvimento e a especificação dos diferentes componentes utilizados no braço robótico. As contribuições deste trabalho estão centradas principalmente na metodologia de projeto e no ajuste de sistemas usuais no projeto de um sistema assistivo.

Palavras-chave: Projeto, manipulador, robótica assistiva, cadeira de rodas.

1. INTRODUÇÃO

A inclusão de pessoas com deficiência motora tem se tornado um assunto muito importante na política social de vários países. As tecnologias utilizadas para auxiliar pessoas com deficiência motoras são chamadas de tecnologias assistivas. A importância da temática pode ser quantificada pela quantidade de pessoas com deficiência motora no Brasil. Cerca de 6,96% da população brasileira, ou seja, mais de 13 milhões de pessoas, possuem deficiência motora (IBGE, 2010). A robótica assistiva é um ramo das tecnologias assistivas que busca adaptar as tecnologias e conceitos da robótica para auxiliar as pessoas com deficiências. Dentre os diversos tipos de deficiência, as pessoas com tetraplegia apresentam as maiores limitações, pois possuem limitações parciais ou totais nos movimentos dos membros superiores e inferiores, estando quase que totalmente dependente de outras pessoas. O desenvolvimento de uma tecnologia que ajude a melhorar a qualidade de vida dessas pessoas promoverá mais independência e autonomia para interagir com o ambiente ao seu redor e realizar atividades diárias básicas, comuns a qualquer pessoa. Com este intuito, vem sendo desenvolvidas pesquisas para adaptar braços robóticos em cadeiras de rodas motorizadas, conhecidos na literatura como *Wheelchair Mounted Robotic Arm* (WMRA). O artigo objetivou apresentar e analisar o método de projeto usado no desenvolvimento de um WMRA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A primeira iniciativa de montar um braço robótico em uma cadeira de rodas ocorreu no final da década de 1990, por pesquisadores do Reino Unido (Hillman, et al., 1999). Um dos primeiros protótipos montados utilizou um manipulador do tipo *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA). Esta arquitetura estrutural de manipulador tem a vantagem de não ter seus motores trabalhando contra a gravidade e uma complacência no plano horizontal. Na Figura 1(a), observa-se o protótipo do braço robótico SCARA montado na cadeira. Uma desvantagem desse design é ocupar um grande espaço. Um outro estudo realizado nessa mesma época apresentou um protótipo adaptado em uma cadeira de rodas (Borgerding, et al., 1999). Como visto na Figura 1(b), este sistema era mais focado em manipulações de objetos próximos. Para isto, este sistema empregava um braço manipulador adaptado à cadeira de rodas desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). O robô manipulador MANUS foi um dos poucos protótipos que se tornou um produto comercial, podendo ser visto na Fig 2(a). Era vendido pela *Exact Dynamics* na Holanda (Driessen et al., 2001), atualmente a empresa foi incorporada ao grupo *Assistive Innovations*. O manipulador MANUS possui seis graus de liberdade, incluído a garra. O *Intelligent Arm Robot Manipulator* (IARM) é um manipulador robótico desenvolvido pela empresa europeia *Assistive Innovations*. Este manipulador é uma evolução do antigo *Manus Arm*.

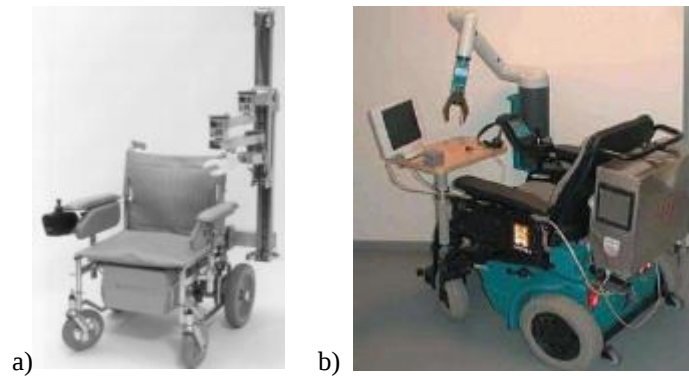


Figura 1. (a) Primeiro protótipo desenvolvido e (b) protótipo desenvolvido nos EUA.
(Hillman, *et al.*, 1999; Borgerding, *et al.*, 1999)

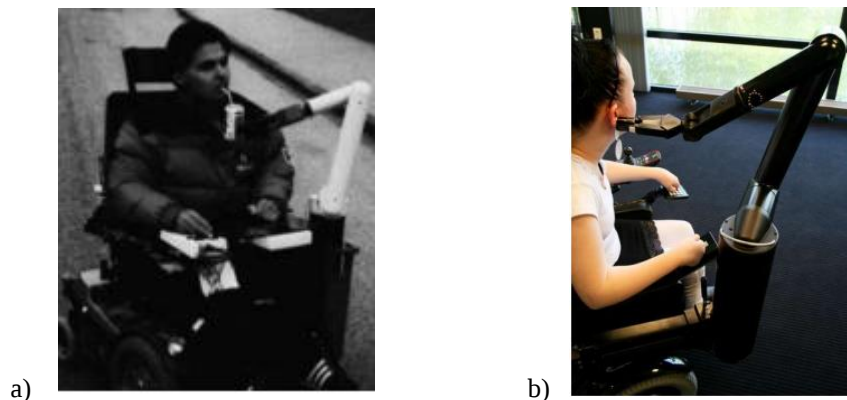


Figura 2. (a) Braço robótico Manus e (b) Braço iARM. (Driessen, *et al.*, 2001; Exact Dynamics, 2018)

O manipulador visto na Fig. 2(b) é composto por 7 graus de liberdade com acionamento por meio de servo motores que são posicionados na base do braço e sua garra possui dois dedos (Exact Dynamics, 2018). O comando é feito por meio de um joystick e teclado.



Figura 3. Jaco robot. (Kinova Technology, 2018)

O braço robótico JACO® foi desenvolvido pela Kinova Technology, uma empresa canadense que oferece soluções em robótica assistiva. Este robô possui 6 graus de liberdade (Kinova Technology, 2018).

Um outro manipulador analisado foi o *Robotic Arm for People with Upper limb DisAbilities* (RAPUDA). Foi desenvolvido na *Intelligent Systems Research Institute* (AIST's) (Deyle, 2010). Este robô conta com 6 graus de liberdade no braço e mais 1 grau de liberdade na garra, tem um alcance máximo de 100 cm e apresenta uma massa de aproximadamente 6 kg. O payload deste manipulador é de 500 g. Sua principal característica é usar uma configuração de movimentação em coordenadas esféricas, o que gera um volume de trabalho de uma calota esférica.



Figura 4. **Protótipo RAPUDA.** (Deyle, 2010).

3. METODOLOGIA DE PROJETO

Os métodos de projeto dos sistemas mecatrônicos envolvem dividir o projeto global no projeto dos subsistemas mecânico, eletrônico e computacional. Cada um destes projetos pode ser subdividido em vários outros subsistemas. Estes projetos podem ser realizados de forma sequencial e depois integrados. Geralmente um projeto mecatrônico começa pelo desenvolvimento do sistema mecânico, em seguida, especifica-se o sistema eletrônico, usando fatores de integração fornecidos pelo sistema mecânico e, por fim, desenvolve-se o sistema computacional. Os fatores ou parâmetros de integração são valores e requisitos passados de um sistema para outro. Por exemplo, para especificar a placa de potência, ou placa de acionamento, precisa-se da potência dos atuadores, e, para especificar estes, necessita-se dos torques e velocidades dos mecanismos.

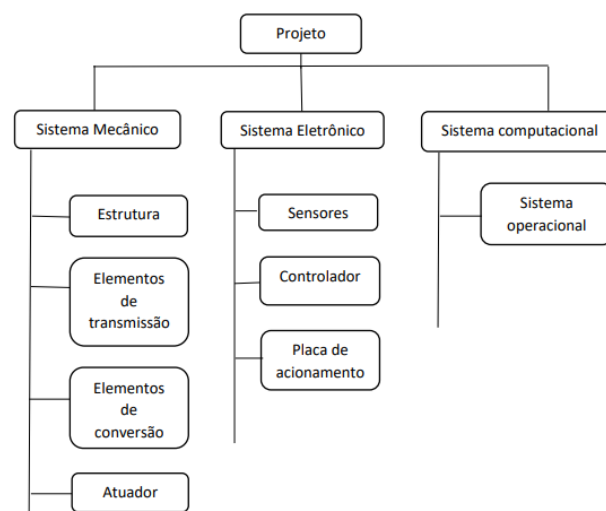


Figura 5. **Organograma de um projeto mecatrônico.**

No organograma apresentado na Fig. 5, cada subsistema é tratado como um projeto individual, assim o projeto começa pela análise das necessidades, buscando identificar as que devem ser supridas pelo projeto. Em seguida, converte-se as necessidades de projeto em requisitos e restrições. Segundo Pahl e Beitz (1996), em qualquer projeto pode-se identificar as seguintes fases: abstração, análise e síntese. Na abstração, é definido o problema a ser resolvido, na análise e síntese, criam-se e são analisadas as soluções. Basicamente, um projeto tem uma fase inicial de determinação do problema, uma fase de desenvolvimento de conceito, uma fase de detalhamento e, por fim, a validação.

4. PROJETO CONCEITUAL

Todos os projetos deveriam iniciar com a busca das necessidades dos usuários e conversão em requisitos técnicos, correspondendo à definição do problema. Alguns autores entendem que a definição do problema faz parte do projeto conceitual, outros consideram uma etapa anterior (Pahl e Beitz, 1996; Madureira, 2015). Uma forma de obter requisitos para o projeto é analisar artigos técnicos e produtos comerciais disponíveis ou extrair das necessidades declaradas pelos usuários. Seguindo a primeira opção, obtém-se, por meio da revisão bibliográfica e da pesquisa de mercado, os requisitos e restrições. Usando a norma técnica de acessibilidade (NBR9050), obtém-se as medidas básicas das cadeiras de roda, suas limitações para poder passar pelo vão das portas e os alcances de usuários paraplégicos.

Na Fig. 6, visualizam-se as dimensões básicas das cadeiras de rodas manuais e alcance de acesso de um cadeirante.



Figura 6. Dimensões de cadeiras de rodas manuais e acessibilidade. (NBR9050)

Usando uma análise de produtos de mercado obtém-se a Tab. 1 abaixo. Nesta tabela, observam-se os principais requisitos. A carga de trabalho é pequena, mas permite manusear a maioria dos objetos domésticos. O raio de alcance mais usado é de cerca de 90 cm e a velocidade máxima do efetuator terminal é muito lenta em comparação aos manipuladores industriais. Este fato é favorável à segurança.

Tabela 1. Análise de produtos de mercado.

	Jaco	Manus	Rapada
Fabricante	Kinova Technology	Exact Dynamics	AIST's Intelligent Systems Institute
Configuração	Articulada	Articulada	Esférica
Massa	5 kg	9 kg	6 kg
Carga de trabalho	1,5 kg	1,5 kg	0,5 kg
Alcance	90 cm	90 cm	100 cm
GDL	6	7	6
Atuadores	Servomotor	servomotor	servomotor
Velocidade efetuator	15 cm/s	15 cm/s	-
Material	Fibra de carbono	-	plástico

Tabela 2. Matriz morfológica.

Material	 Aço	 Alumino	 PVC	 Pástico PLA/ABS	 Fibra de Carbono	 Nylon (TechNyl)
Estrutura	 SCARA	 Articulado	 Esférico	 Cilíndrico		
Punho	 2 Juntas rotativas		 3 Juntas rotativas (punho esférico)		 3 juntas com eixos que não se	
Efetuator Terminal	 Garra de 2 dedos	 Garra de 3 dedos	 Ferramentas	 Garra a Vácuo		
Transmissão	 Engrenagens	 Correia	 correntes	 TBP	 Hastes Rígid	 Cabos
Atuadores	 Motor CC	 Servo	 Motor de FASEC	 Hidráulico	 Pneumático	
Controle	 Arduino	 PIC	 PLC	 Raspberry		

Com os requisitos principais de projeto estabelecidos, massa máxima de 9 kg, alcance 1,1m, carga de trabalho 1 kg, com 6 graus de liberdade e velocidade de 15 cm/s, começa-se a síntese da solução conceitual e esta pode ser obtida com auxílio de técnicas, como uma decomposição funcional do problema, brainstorming e matriz morfológica (Tab. 2). Após decompor o problema em partes menores, foram produzidas várias soluções para cada parte e, em seguida, usou-se as matrizes de decisão para selecionar a melhor. Nas matrizes de decisão se pondera, para cada solução, as vantagens em relação aos principais requisitos. O custo é um requisito que deve ser observado. Foi escolhida a configuração articulada serial para a estrutura do manipulador, porque permite contornar obstáculos e tem um bom volume de trabalho. O material selecionado para os links do manipulador foi o PVC, devido ao custo, disponibilidade e facilidade de manufatura, apesar da resistência ser muito menor que os materiais metálicos. O compósito com fibra de carbono é o material com melhor relação de resistência mecânica e densidade para essa aplicação, mas o custo e a dificuldade do processo de fabricação o excluíram na matriz de decisão. Os motores podem ser colocados diretamente nas juntas, facilitando o controle, mas aumentando a massa do braço, ou colocados na base e empregando elementos de transmissão para acionar as juntas, diminuindo assim a massa do braço. Foi escolhido o acionamento localizado na junta para redução de custo.

5. PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico foi iniciado analisando as soluções conceituais sintetizadas, especificando a estrutural com o cálculo de resistência dos materiais, de forma a reduzir o peso e garantir uma rigidez mínima. Em seguida, especificou-se os elementos para redução de velocidade e transmissão do movimento e depois os torques necessários nas juntas.

A escolha da posição da base do manipulador é um ponto muito importante, pois afeta o alcance e a capacidade da cadeira circular pelo ambiente. Analisando a posição da base do manipulador na Fig. 7, observa-se que pode ser posicionada na frente, ao lado, ou atrás da cadeira. A posição (a) na Fig. 7 necessita de um braço maior para o alcance desejado à frente da cadeira, acrescentando um aumento de massa no sistema. Posicionar o braço na lateral aumenta a largura da cadeira de rodas, o que pode dificultar a movimentação da cadeira em ambiente fechado, contudo é o modelo mais observado na revisão de literatura. O posicionamento à frente permite reduzir o comprimento dos elos para o mesmo alcance frontal, contudo restringe a visão frontal e a posição dos membros inferiores do cadeirante. Deste modo, foi escolhida a posição lateral.

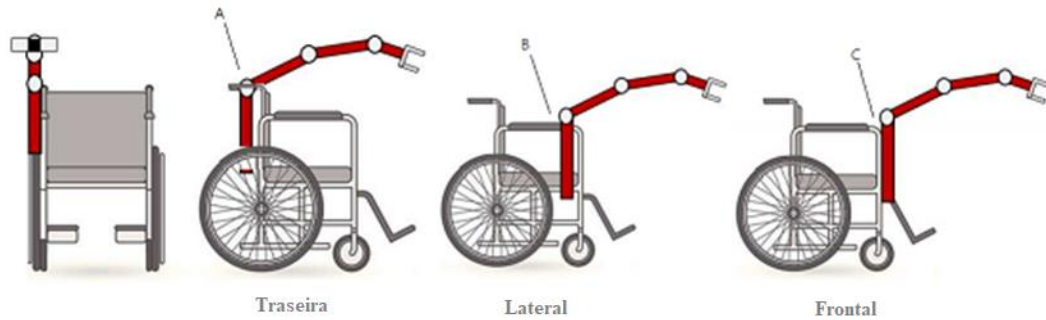


Figura 7. Análise da posição da base do robô.

5.1 Modelagem cinemática

Usando a sistemática de Denavit-Hartenberg (D-H), foi feita a modelagem matemática do manipulador para obter o modelo cinemático. A modelagem começa pela especificação dos sistemas de coordenadas, como na Fig. 8.

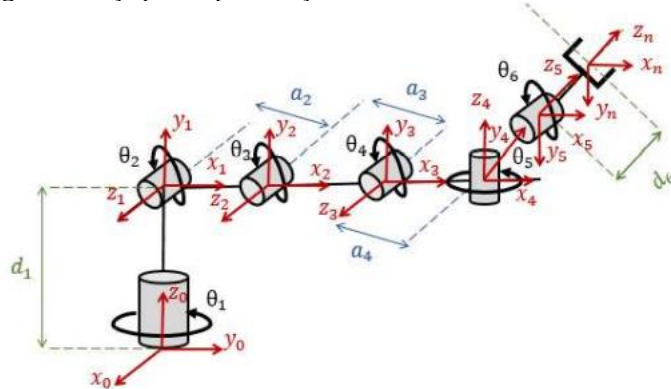


Figura 8 Sistemas de coordenadas de cada junta.

Usando os sistemas de coordenadas, obteve-se os parâmetros de D-H, que podem ser vistos na Tab. 3, e estes são utilizados nas matrizes homogêneas a seguir, que relacionam um sistema de coordenada com o anterior.

Tabela 3: Parâmetros de Denavit-Hartenberg.

Junta	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	d_1	0	$+90^\circ$
2	θ_2^*	0	a_2	0
3	θ_3^*	0	a_3	0
4	θ_4^*	0	a_4	-90°
5	θ_5^*	0	0	-90°
6	θ_6^*	d_6	0	0

Substituindo esses parâmetros de D-H na matriz de transformação, chega-se em:

$${}^1_0A = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^2_1A = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^3_2A = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^4_3A = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & a_4C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & a_4S\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^4_3A = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & -S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & C\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^6_5A = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Através da multiplicação das matrizes homogêneas, chega-se à matriz (Eq.10) que apresenta a transformação de coordenadas da junta 1 para a 6.

$${}^6_0A = {}^1_0A {}^2_1A {}^3_2A {}^4_3A {}^5_4A {}^6_5A = \begin{bmatrix} {}^6_0R & {}^6_0x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

5.2 Modelagem estrutural

Começa-se pela escolha da seção transversal do braço, que geralmente pode ser retangular ou circular. Foi escolhida a seção circular. A determinação da área da seção está relacionada à rigidez desejada, ao invés de falha por escoamento, pois busca-se a menor seção que gere uma deflexão máxima aceitável para a carga de trabalho e ao peso próprio. A deflexão máxima está relacionada ao erro máximo de posicionamento do manipulador. Na revisão do estado da arte, não foram encontradas especificações de precisão do posicionamento desse tipo de manipulador. Isso se deve ao fato que a precisão do posicionamento de manipulador teleoperado não ser tão crítica, como em um robô industrial. No robô industrial, a malha de controle é fechada nas juntas, no caso do manipulador teleoperado existe uma malha de controle externa, onde o usuário é o “sensor visual” e o “controlador” da malha. Desta forma, pode-se aceitar deformações que seriam inaceitáveis em um robô industrial com o objetivo de redução de massa e tamanho da estrutura do manipulador. Com a redução da seção da estrutura, reduz-se a potência dos motores e consequentemente o custo do manipulador. Uma rigidez muito baixa vai favorecer oscilações na extremidade e dificultar o posicionamento de uma carga de trabalho, portanto deve-se fazer uma análise das oscilações. Para analisar deformação em função da rigidez, analisa-se o robô na pior posição, esticado na horizontal, e modela-se como uma viga engastada.

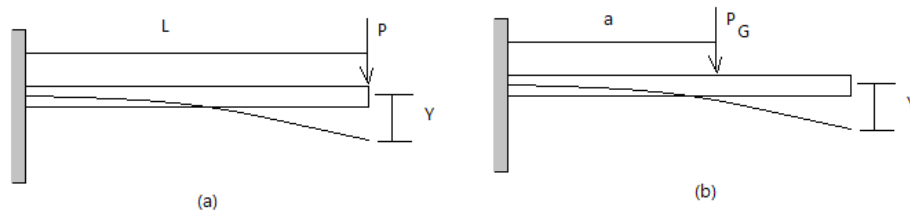


Figura 9. Modelo de viga engastada com carga concentrada na extremidade(a) e no CG da viga (b).

Usando a sobreposição de dois tipos de carregamento (Fig. 9), um com carga de trabalho concentrada na extremidade e o outra com o peso próprio concentrado no CG da viga, pode-se determinar a flecha máxima, usando-se as equações a seguir (Juvinall, 2013):

$$y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (11)$$

$$y = \frac{Pa^2}{6EI} (3L - a) \quad (12)$$

Para início dos cálculos, deve-se ter as massas dos atuadores, mas estas serão especificadas depois de calculado o torque nas juntas e, para isso, o peso da estrutura do manipulador é necessário. Desta forma, tem-se uma análise iterativa recursiva, supõem-se uma massa para os motores para calcular a seção da viga e, depois de calcular o torque necessário

nas juntas, especifica-se os motores e recalcula-se a estrutura. Supôs-se inicialmente uma massa de 1 Kg para os atuadores, sabendo-se ser um valor exagerado. Supôs-se que uma flecha máxima entre 2% e 3% do comprimento da viga não causaria uma dificuldade elevada na teleoperação, uma vez que a tarefa seria pegar-e-colocar objetos. Levou-se em consideração que a amplitude máxima da oscilação na extremidade de uma viga com uma massa na ponta submetida a um degrau de impulso corresponde ao dobro da deformação estática da viga (Craig, 1981). Chegou-se a um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro e com espessura de 3 mm. Após a especificação dos atuadores, verificou-se que os mesmos possuíam massa inferior a 0.5 kg.

As juntas foram projetadas em ligas de alumínio devido à necessidade de resistência maior. A junta mais solicitada é a da base. Os eixos das juntas foram especificados em aço 1020. Na Fig. 10, observam-se as deformações devido às cargas do peso do braço manipulador. A junta foi desenhada no software SolidWork Simulation que permite análise de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos.

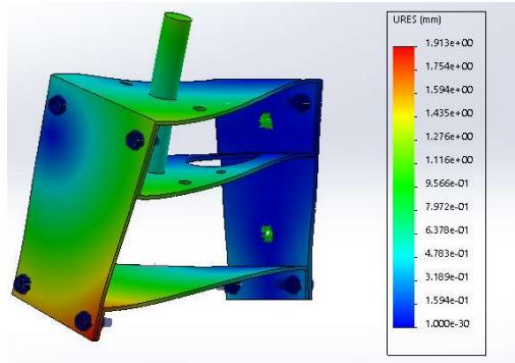


Figura 10. Análise da base com elementos finitos.

O primeiro esboço teve a espessura das chapas aumentada e elementos de reforço acrescentados para diminuir as deformações na junta. Esta deformação, somada à flexão do braço estendido, não deveria gerar uma flecha maior à especificada na análise de rigidez do braço. Os eixos foram dimensionados para resistir à flexão e à torção. Com os diâmetros dos eixos e a carga, foram selecionados os rolamentos de esferas em catálogo do fabricante.

5.3 Modelagem dinâmica

A análise dinâmica é importante para as seleções dos atuadores, dos rolamentos e do sistema de redução. Assim como para os projetos das juntas, dos eixos e do sistema de controle do robô. Para determinar as forças e torques que agem em cada junta, usa-se a abordagem estática e a dinâmica. A primeira considera o efeito do peso próprio do robô e da carga de trabalho. A segunda considera as acelerações necessárias para atingir a velocidade máxima no efetuador terminal. Para calcular os esforços devido ao peso da estrutura e carga, considera-se o robô na posição mais exigida, ou seja, completamente na horizontal.

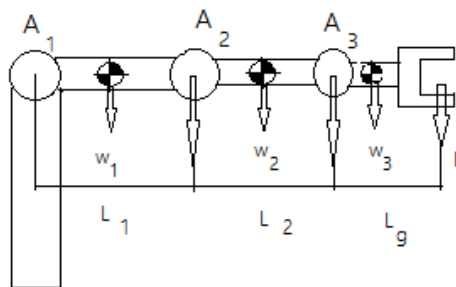


Figura 11. Distribuição das cargas.

$$T_3 = W_3 \frac{L_g}{2} + PL_g \quad (13)$$

$$T_3 = W_2 \frac{L_2}{2} + A_3 L_2 + W_3 \left(L + \frac{L_g}{2} \right) + P(L_2 + L_g) \quad (14)$$

$$T_1 = W_1 \frac{L_1}{2} + A_2 L_1 + W_2 \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) + A(L_1 + L_2) + W_3 \left(L_1 + L_2 + \frac{L_g}{2} \right) + P(L_1 + L_2 + L_g) \quad (15)$$

Em seguida, considerou-se a aceleração angular necessária para que o efetuador terminal atinja a velocidade desejada. Para obter a aceleração, calculou-se a velocidade angular pela velocidade tangencial e dividiu-se pelo tempo aceitável de aceleração.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (16)$$

$$T = I \cdot \alpha \quad (17)$$

Aplicou-se a Equação de Newton-Euler preferencialmente a um cálculo simplificado para calcular os torques e forças devido às acelerações. Como não foi incluída a perda pelo atrito na equação, um coeficiente de segurança foi utilizado, obtido por um método (Collins, 2002) que segmenta as incertezas do projeto para chegar a um valor de fator de segurança. Chegou-se a um fator global de 1,36. Na Tabela 4 observa-se os torques calculados.

Tabela 4. **Torques calculados na junta.**

Juntas	Torque calculado (N.m)
1	1,54
2	18,27
3	14,04
4	3,59
5	0,12
6	0,01

5.4 Seleção de atuadores

Com o torque máximo calculado, selecionou-se o atuador. Verificou-se a necessidade de usar um sistema de redução para reduzir o tamanho dos motores e aumentar o torque. Os redutores empregados em manipuladores são os planetários e os harmônicos, pois fornecem uma grande redução em um pequeno volume com alta precisão, contudo apresentam um custo muito elevado. Os motores empregados em manipuladores robóticos com baixa capacidade de carga são os servomotores e os motores de passo. Os motores de passo são motores elétricos controlados em malha aberta através de pulsos enviados à placa de acionamento que chaveia as bobinas, gerando deslocamentos angulares discretos e com razoável precisão. Os servomotores são motores elétricos com um sensor angular acoplado, geralmente do tipo encoders, que são controlados em malha fechada. Optou-se por usar motor de passo nas juntas do punho e no eixo vertical da base. Nas demais juntas, optou-se por um motoredutor DC, adaptado para ser controlado como servo motor, por razões de custo.

Na seleção de motores de passo, deve-se analisar a resolução, a potência e o torque necessário. O motor de passo possui dois tipos de torque, o holding e o dinâmico. O primeiro é o maior torque e serve para iniciar o movimento ou manter o eixo travado em uma posição. O torque dinâmico é o torque para uma determinada velocidade de rotação. O motor é especificado usando o holding torque e o torque na velocidade máxima de trabalho, porque o torque diminui com o aumento da velocidade de rotação (Fig. 12).

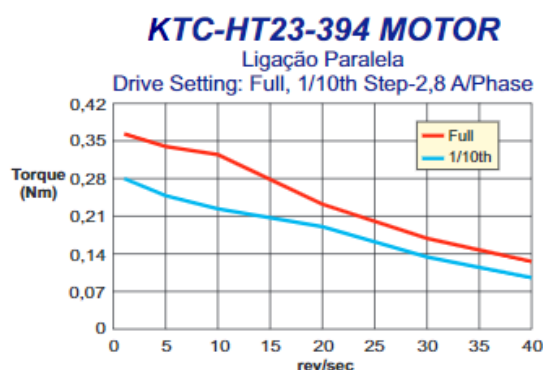


Figura 12. **Gráfico torque x velocidade angular.** (Kalatec, 2019)



Figura 13. **Motor de passo Nema17.** (Kalatec, 2019)

Foram selecionados três motores de passo, sendo dois para as juntas do punho do manipulador e um para a junta da base. No caso do motor da base, foi projetado um redutor de engrenagem cilíndricas de dentes retos. A Fig. 13 mostra o modelo selecionado, Nema 17.

Na seleção de motores DC para ser controlado em malha fechada, deve-se saber a potência necessária e a curva de torque. O motor Mabuchi é muito empregado na indústria automobilística, o que reduz os custos. Este motor é vendido já acoplado a um redutor parafuso-sem-fim, o que permite uma elevada redução em baixo volume e massa. Contudo este redutor tem baixa eficiência de transmissão de potência.

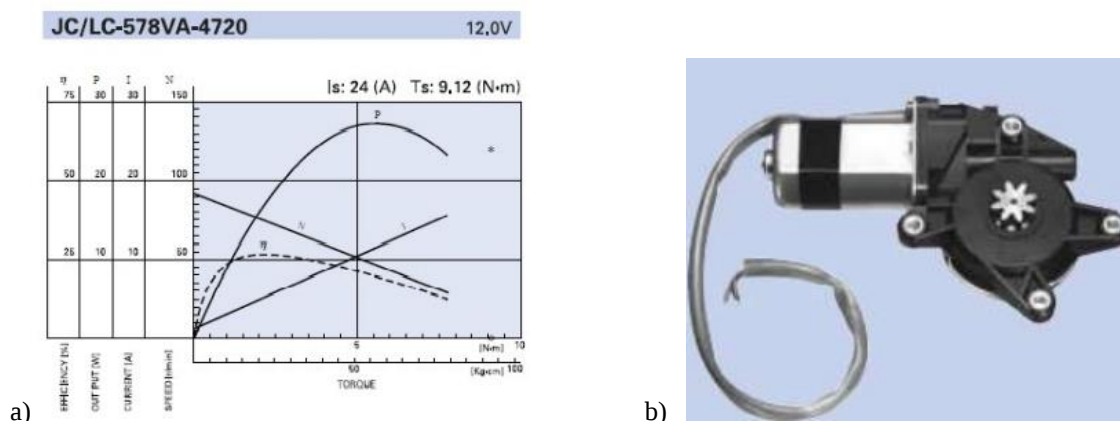


Figura 14. a) Gráfico de parâmetros em função do torque b) Motor DC Mabuchi/JC (Mabuch, 2019)

O motor Mabuchi foi selecionado pela relação custo x benefício. Mesmo com essa redução, foi especificada uma engrenagem para acoplá-lo ao eixo da junta, aumentando a relação de redução.

5.5 Modelage em CAD

Um desenho 3D foi desenvolvido em um software de desenho auxiliado por computador (CAD) para permitir simular movimentos e detalhar os elementos para fabricação. A tecnologia CAD também facilitou a produção dos desenhos detalhados de fabricação. O uso de software CAD diminui a necessidade de fabricação e uso de maquetes chamadas Mockup, muito utilizadas no desenho industrial. Contudo um Mockup com a forma, a escala e as relações básicas do manipulador foi produzido e usado também para a análise antes da prototipagem. Na Fi. 15, observa-se o modelo 3D em CAD.



Figura 15. Modelo do braço robótico projetado.



Figura 16. Elos e juntas fabricados.

6 PROTOTIPAGEM

A última etapa do projeto consistiu em fabricar um protótipo em escala real para testar os parâmetros de desempenho desejados. A Fig. 16 mostra as partes do manipulador fabricado. Podem ser visto os links, as juntas feitas em liga de alumínio e o atuador da segunda junta. Os testes foram parcialmente realizados, colocando-se o braço na posição horizontal e medindo a flecha devido ao peso próprio. A deformação devido ao peso próprio ficou dentro do intervalo de projeto, mas a deformação devido à carga de trabalho excedeu o desejado. Seguindo a sistemática de projeto em espiral, analisou-se os componentes para descobrir onde estava o responsável pela deformação. Verificou-se que os elementos de acoplamento do motor com os eixos eram os responsáveis pela deformação, pois foram produzidos por impressão 3D para agilizar a prototipagem. Estes tiveram que ser substituídos por peças em aço 1020. Nesta etapa do projeto mecânico, foram feitos testes de chaveamento liga-desliga dos motores, verificando a execução dos movimentos nas velocidades desejadas.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho se concentrou em desenvolver o projeto mecânico do manipulador mecânico, apresentando a sistemática empregada para o projeto conceitual e o projeto detalhado com a análise estrutural, cinemática e dinâmica, além de discutir os principais aspectos construtivos e de seleção dos elementos mecânicos e elétricos.

O robô projetado conta com uma massa de 5,29 kg, considerando já a massa dos atuadores, o que é menor do que o limite máximo estabelecido de 9 kg. Além disso, o custo do robô foi muito reduzido, se comparado com as soluções já

desenvolvidas, sendo apenas 3,6% do valor da solução mais barata existente. Tudo isso foi atingido sem abrir mão do *payload* e do comprimento total do manipulador. Com o pleno funcionamento, resta, como trabalho futuro, avaliar a precisão mínima necessária para um manipulador aplicado a este tipo de tarefa de movimentar objetos domésticos. Esta precisão influencia no custo do sistema de controle e no custo de uma estrutura mais rígida.

8 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do laboratório do Grupo de Automação e Controle (GRACO) e o apoio da FAPDF na continuação do projeto.

9 REFERÊNCIAS

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2010. Demographic Census (in Portuguese). Rio de Janeiro: IBGE.
- Hillman, et al., 1999. "A wheelchair mounted assistive robot." In *ICORR: International Conference on Rehabilitation Robotics*, Stanford, CA.
- Borgerding, B. et al., 1999. "FRIEND: Functional robot arm with user friendly interface for disabled people." In *5th European Conf. for the Advancement of Assistive Technology*.
- Driessen, B.J.F., Evers, H.G., Woerden, J.A.V, et al., 2001. "A wheelchair-mounted rehabilitation robot," In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*.
- Exact Dynamics, 2018. "iARM." Disponível em: <www.ExactDynamics.com>. Acesso em: Setembro 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2015. "NBR 9050. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos". Disponível em: < http://acessibilidade.unb.br/images/PDF/NORMA_NBR-9050.pdf>. Acesso em: Setembro 2018.
- Pahl, G., Beitz, W, 1996, *Engineering Design: a Systematic Approach*, Ed. Springer Verlag.
- Collins, J.A., 2002. *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*. Wiley, USA.
- Deyle, T., 2010. *Telescoping Robot Arm for Wheelchair-Mounted Object Retrieval*. Disponível em: <<http://www.hizook.com/blog/2010/08/16/telescoping-robot-arm-wheelchair-mounted-object-retrieval>> Acesso em: Outubro de 2018.
- KALATEC Automação, 2019. *KALATEC Automação*. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/motor-de-passo-12nm/>> Acesso em: Junho de 2019.
- Craig, J., 2012. *Robótica*. 3ª ed.. São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- Mabuchi Motor, 2019. Mabuchi Motor. Disponível em: <<https://www.mabuchi-motor.com/product/knowledge/>>. Acesso em: Junho de 2019.
- Juvinal, R.C., 2013. *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas*. 4ª ed.. Rio de Janeiro: LTC.
- Craig, R.R., 1981. *Structural Dynamics, An introduction to Computational Methods*, Ed. John Wiley & Sons, USA.
- Madureira, O.M., 2015. *Metodologia do Projeto- Planejamento, Execução e Gerenciamento*, Ed. Blucher, São Paulo.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ROBOTIC ARM DESIGN TO ASSIST THE DISABLED PEOPLE

Luiz Fernando Monteiro de Barros da Silva Néto, lfmbnsn@gmail.com¹
Walter de Britto Vidal Filho, wbritto@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro – Brasília - DF

Abstract. Assistive robotics is a technology that has been used to assist people with disabilities. It is part of the set of assistive technologies which includes the devices and systems that provide or expand the functional abilities of people with some type of disability. Tetraplegia is a motor impairment that affects the upper and lower limbs of an individual. This disability generates total dependence to interact with the surrounding environment. This article describes a mechanical configuration of a manipulator to be fixed to a wheelchair. The systematic design of the mechanical system was described, addressing the requirements analysis and component design. A prototype was built to test the concept. The development and specification of the different components are described. The contributions of this work are mainly centered in the project methodology and in the adjustment of usual systems in the design of an assistive system.

Keywords: Design, manipulator, assistive robotics, wheelchair.