DOI: 10.48011/asba.v2i1.1455

Projeto e Análise de Desempenho de um Atuador Elástico em Série Compacto para Exoesqueletos

de Gaitani, F. H. M.[1];dos Santos, W. M.[2]; Siqueira, A. A. G.[1]

[1]Laboratório de Reabilitação Robótica, Departamento de Engenharia Mecânica,
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Centro de Robótica de São Carlos (CROB), Centro de Engenahria Aplicada à Saúde (CEAS)
Av. Trabalhador São-carlense, 400. Parque Arnold Schmidt, CEP 13566-590, São Carlos, SP

[2]Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus São João da Boa Vista
Av. Profa. Isette Correa Fontão, 505 - Jardim das Flores, São João da Boa Vista - SP, 13876-750

*E-mails:*fabiohmg@usp.br, wilian.santos@unesp.br, siqueira@sc.usp.br

Abstract: In this paper, it is designed and analyzeda compact and lightweight Series Elastic Actuator that will be used to drive the joints of the modular exoskeleton for lower limbs Exo-TAO (Transparent Active Orthosis), available at the Robotic Rehabilitation Laboratory of EESC/USP. This equipment is being developed to assist in the rehabilitation of people with motor disabilities from injuries to the central nervous system or to the spinal cord that affect mobility.The differential of the proposed actuator is the use of a customized and compact torsion spring, providing the levels of torque and speed necessary to drive the exoskeleton. Such performance levels were evaluated considering the characteristics of the selected components and the gait patterns available in the literature.

Resumo: Neste artigo é projetado e analisado um Atuador Elástico em Série compacto e leve que será utilizado para acionar as juntas do exoesqueleto modular de membros inferiores Exo-TAO (Transparent Active Orthosis), existente no Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP. Este equipamento está sendo desenvolvido para auxiliar na reabilitação de pessoas com deficiência motoras decorrentes de lesões no sistema nervoso central ou medulares que afetam a mobilidade. O diferencial do atuador proposto é a utilização de uma mola torcional personalizada e compacta, proporcionando os níveis de torque e velocidade necessários para o acionamento do exoesqueleto. Tais níveis de desempenho foram avaliados considerando as características dos componentes selecionados e os padrões de marcha disponíveis na literatura.

Keywords: Series Elastic Actuator; Exoskeleton; Robotic; Rehabilitation; Orthosis

Palavras-chaves: Atuador Elástico em Série; Exoesqueleto; Robótica; Reabilitação; Órteses

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos a robótica apresentou grandes avanços na área da medicina. A utilização de robôs acrescentou melhorias no trabalho de médicos e de outros profissionais da saúde, além de proporcionar uma melhor experiência para os pacientes. Essas máquinas podem ajudar tanto na realização de cirurgias quanto na reabilitação de pacientes. A utilização de técnicas de terapia assistida por robôs tem sido intensificada (Prange et al., 2006; Kollen Kwakkel &Krebs, 2008). A reabilitação de pacientes que sofreram um Acidente Vascular Cerebral (AVC) e lesão medular incompleta são exemplos de aplicações dessa terapia. Como vantagem, essa terapia pode proporcionar um melhor controle dos exercícios e resultados no tratamento do paciente.

Para um bom desempenho do atuador, é necessário que algumas características fundamentais estejam presentes no seu projeto. É essencial que haja um controle de impedância no robô, ou seja, que seja possível controlar a interação entre o robô e o paciente, para que se possa controlar a resistência do robô ao movimento do paciente, tornando os movimentos mais fáceis ou mais difíceis de serem realizados. Além disso, é interessante que o atuador possua uma largura de banda semelhante a da movimentação muscular e baixo atrito.

Com esses pré-requisitos foi elaborado um Atuador Elástico em Série e, posteriormente, será realizado um controle de impedância, a fim de inserir as características citadas anteriormente no atuador. Algumas delas já foram elaboradas no projeto mecânico, como a rigidez das molas e a redução do atrito entre os componentes.

Assim, a pretensão é tornar esse atuador, uma alternativa aos atuadores já existentes, inclusive os desenvolvidos no Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP, focando

em torná-lo mais compacto e mais leve, sem prejudicar sua resistência mecânica. Dessa forma, os exercícios e a reabilitação serão mais eficientes e os resultados tendem a ser mais satisfatórios.

Neste trabalho é apresentado o projeto e análise de desempenho de um Atuador Elástico em Série compacto e leve, que possa funcionar junto do exoesqueleto robótico de membros inferiores Exo-TAO, permitindo uma melhora na reabilitação de pacientes com dificuldade de locomoção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Atuadores Elásticos em Série

Um Atuador Elástico em Série é composto por um motor com redução, ligado em série com um sistema de molas, conforme descrito por Pratt & Williamson (1995). Este atuador se baseia em adicionar uma série de molas entre o motor e uma carga, sendo que as molas desacoplam a inércia do motor e outras não linearidades da saída do sistema e o isolam de choques gerados pela carga. Além disso, também é possível usar a mola para medir a força aplicada na carga pelo efetuador.

Assim, em Kong et al. (2009) foi desenvolvido um Atuador Elástico em Série rotacional para auxiliar a movimentação de membros inferiores, conforme visto na Fig. 1. A principal diferença para o atuador discutido no parágrafo anterior é a presença de uma mola torcional. Além da mola, também são elementos deste atuador um motor de corrente contínua, um redutor planetário e dois potenciômetros para detectar a deformação na mola e a posição do eixo de saída. Para o arranjo em questão (mola entre o motor e a carga), é necessário que a mola suporte os grandes torques que serão gerados, porém as molas comerciais que possuem alta resistência, também possuem alta rigidez, característica que não é interessante no projeto.

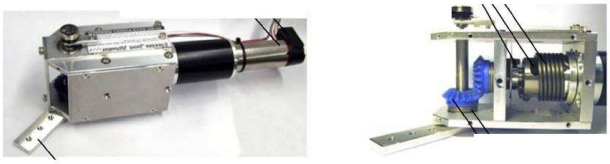

Fig. 1 Atuador Elástico em Série rotacional desenvolvido por Kong et al. (2009).

A utilização de molas com uma rigidez muito alta compromete o sistema, pois dificulta o controle preciso de força. Além disso, as não linearidades de uma mola com alta rigidez não podem ser simplesmente desprezadas. Com isso, foi desenvolvido um novo modelo de um Atuador Elástico em Série rotacional, Fig. 2, pelos mesmos autores (Kong et al., 2010). Neste novo modelo, a mola foi inserida entre dois redutores de velocidade, fazendo com que possa ser utilizada uma mola menos resistente e com baixa rigidez. Porém a desvantagem desse sistema é que as não linearidades das engrenagens comprometem a medição do torque, o que acarreta incertezas ao sistema de controle.

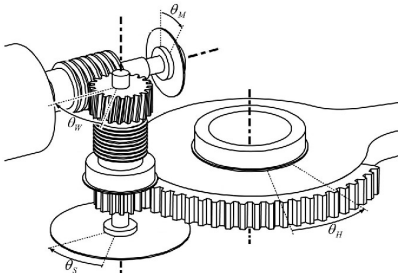

Fig. 2 Atuador Elástico em Série desenvolvido por Kong et al.(2010).

Por fim, outro método que pode ser uma alternativa às dificuldades e desvantagens descritas nos métodos anteriores, é elaborar elementos elásticos personalizados. Estes elementos, como são compactos, podem possuir uma grande resistência mecânica sem aumentar muito o valor da rigidez, dessa forma, eles podem ser inseridos entre o motor e a carga. No Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP já foram desenvolvidos vários atuadores para uso em exoesqueletos de membros inferiores.

No trabalho de dos Santos, et al., (2017) o atuador possui um motor, um redutor do tipo coroa – rosca sem-fim e uma mola torcional personalizada desenvolvida pelo próprio autor. Dessa forma, ele pode posicionar a mola entre o motor/redutor e a aplicação da carga, medindo tanto a deformação da mola quanto a posição do eixo de saída com precisão.

Na Fig. 3 é possível ver uma vista em corte deste atuador com os seus componentes: a) motor de corrente contínua Maxon RE-40; b) redutor de velocidade do tipo coroa – rosca sem-fim M1-150 da HPC Gears International; c) mola torcional personalizada; d) mancal de rolamentos; e) encoder incremental magneto-resistivo Maxon tipo L; f) encoder incremental óptico-eletrônico Maxon HEDS 5540

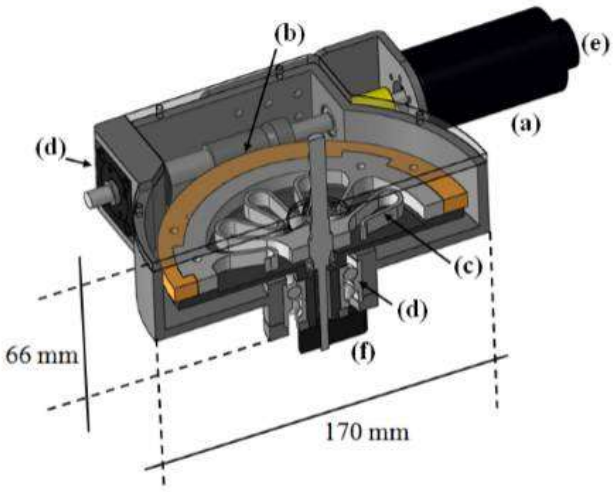

Fig. 3 Atuador Elástico em Série rotacional desenvolvido por dos Santos, et al., (2017) .

2.2 Projeto do Atuador Elástico em Série Rotacional Compacto

Tendo em vista essas observações e desvantagens de alguns métodos, foi desenvolvido, conforme descrito na seção 3, um novo Atuador Elástico em Série rotacional, tendo uma configuração das molas em paralelo, a fim de aumentar a resistência das molas ao alto torque exigido.

Para o projeto do atuador realizado foram necessários conhecimentos em mecânica, para garantir que os componentes consigam resistir às forças que serão aplicadas em cada um deles.

Conforme pode ser observado na Fig. 4, o atuador possui três eixos que foram devidamente dimensionados para resistir aos esforços de torção em torno do eixo z. Além dos eixos, o atuador possui dois rolamentos superdimensionados para evitarem a rotação dos eixos em torno do eixo x e do eixo y sem a necessidade de dois mancais de apoio. Isso é possível devido ao baixo comprimento dos eixos e à, relativamente, alta largura dos rolamentos. A fixação das molas e da coroa aos seus respectivos eixos foi feita por meio de chavetas.

O eixo mais ao fundo da imagem (m) possui dois apoios, um mancal e um rolamento colocado entre o eixo e a carcaça do atuador, e é conectado ao motor por meio de um acoplamento elástico, segurando o pinhão na posição ideal para o correto funcionamento da redução pinhão – coroa. Esta redução foi calculada para ter uma relação de 150:1. O motor é fixado à carcaça do atuador por meio de uma peça produzida especificamente para esse fim (e).

O sistema de molas foi configurado para funcionar em paralelo, ou seja, as molas são conectadas ao mesmo eixo de saída e ao mesmo eixo de entrada, dobrando a resistência ao torque. Dessa forma, a mola individualmente não precisa ter uma resistência tão alta, porém, ao usar essa configuração a rigidez também dobra, sendo assim cada mola precisa ter uma rigidez bem baixa, para que a rigidez equivalente continue não sendo alta.

Para o dimensionamento das molas foi utilizado o software SolidWorks, onde foram realizadas análises estáticas nas molas, a fim de determinar a rigidez e a resistência ao torque de cada elemento.

Por fim, para registrar com eficácia a posição do eixo de saída foi utilizado um encoder incremental (THI40N-1CAK2R6TN-00500).

Na Tabela 1 pode-se ver a especificação de todos os elementos pré-determinados e comprados para o atuador. Enquanto na Tabela 2, pode-se ver cada elemento do atuador da Fig. 4.

Tabela 1. Componentes e suas respectivas especificações

Componente	Especificação
Motor (f)	RE40 maxon
Rolamentos (b)	Rolamento de esferas de contato angular 3200 ATN9 SKF
Pinhão	Amironic W0.5-1
Coroa (o)	Amironic ABM0.5-150
Encoder (i)	THI40N-1CAK2R6TN-00500

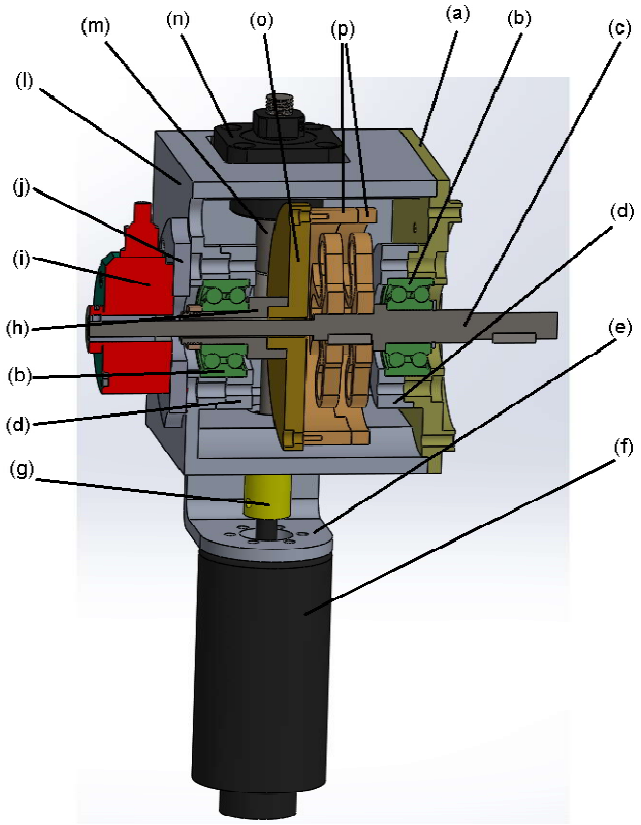

Fig. 4 Atuador Elástico em Série rotacional desenvolvido no projeto.

Tabela 2. Componentes do atuador

Componente	Letra correspondente
Tampa	(a)
Rolamentos	(b)
Eixo Molas	(c)
Fixadores de rolamento	(d)
Suporte para motor	(e)
Motor	(f)
Acoplamento elástico	(g)
Eixo coroa	(h)
Encoder	(i)
Apoio encoder	(j)
Carcaça	(l)

Eixo motor	(m)
Mancal motor	(n)
Coroa	(o)
Molas	(p)

Conforme o objetivo do projeto, o atuador deve ser compacto e leve. Comparando com o atuador desenvolvido anteriormente no Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP, Fig. 3, pode-se ver na Fig.5 as dimensões do novo atuador projetado.

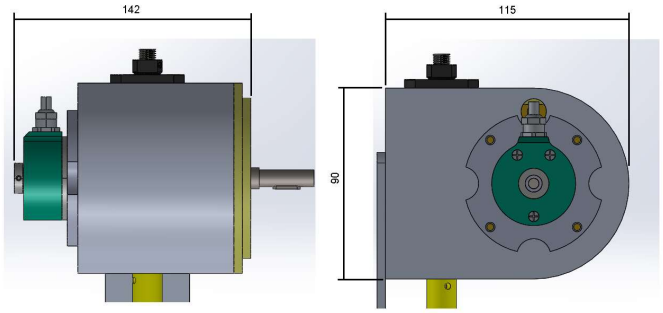

Fig. 5 Dimensões do Atuador Elástico em Série desenvolvido no projeto.

2.3 Mola Torcional Personalizada

O componente elástico do atuador deve ser resistente para suportar grandes torques, porém deve possuir baixa rigidez, para um controle de força eficaz. Como essas características não são encontradas em conjunto nas molas torcionais disponíveis no mercado, foi desenvolvida uma nova mola torcional que pode ser vista na Fig. 6. Para esta mola, a transferência de torque se dá entre dois anéis com diferentes diâmetros, inserindo entre esses dois anéis elementos flexíveis, que irão caracterizar a rigidez da mola.

O anel mais externo será fixado à coroa, enquanto o anel interno será fixado por meio de chaveta ao eixo de saída, que será posteriormente conectado ao exoesqueleto exo-TAO.

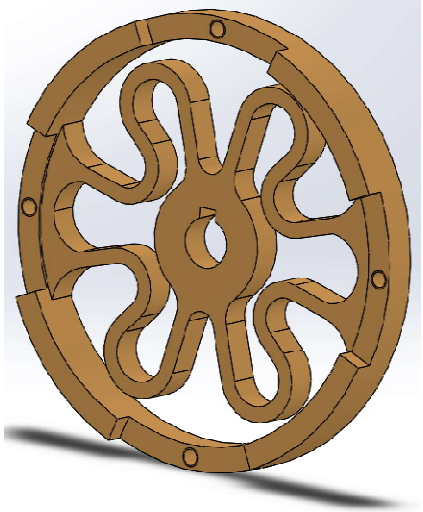

Fig. 6 Mola torcional Personalizada desenvolvida no projeto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Mola Torcional Personalizada

Conforme descrito na Seção 3, foram feitas análises estáticas no elemento elástico para definir a resistência máxima e a rigidez da mola. Um dos testes está representado na Fig. 7, onde foi realizado o teste aplicando uma força de 500 N no anel externo da mola e foram coletados os resultados.

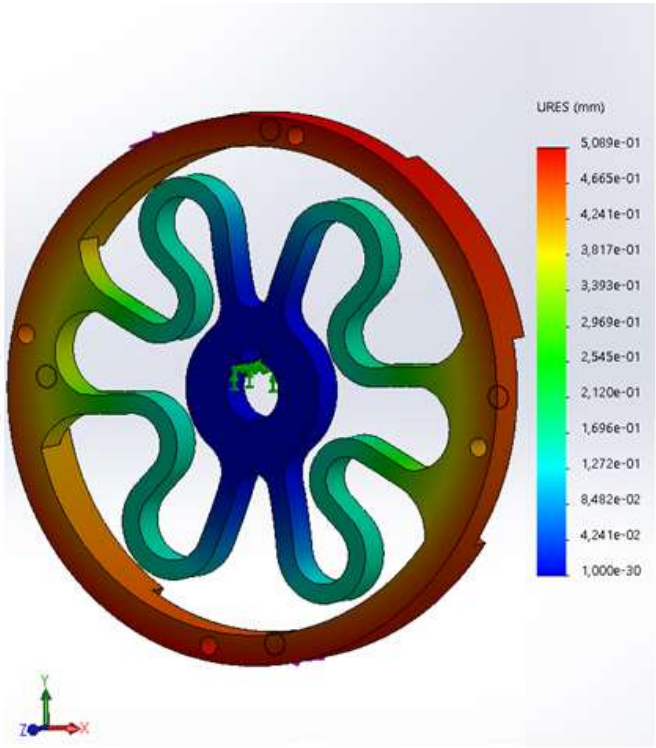

Fig. 7 Análise estática realizada na mola torcional personalizada da Fig. 2 no software SolidWorks.

Na simulação estática, foi primeiramente calculado o torque aplicado na mola por (1):

$$T = r * F, \quad (1)$$

sendo T o torque aplicado na mola, r o raio da mola, que vale 36 mm e F a força programada para atuar na mola na análise.

Dessa forma, realizando testes com diferentes forças e comparando com a tensão máxima do material (que é de $7 * 10^7$ N/m), chegou-se ao resultado de que a mola suporta um torque de até, aproximadamente, 25 N.m.

O resultado de deformação mostrado na imagem foi utilizado para o cálculo da rigidez da mola. Para chegar no valor requerido são necessárias várias equações. Primeiramente foi usado (2) para converter a deformação em um ângulo, em radianos:

$$\theta = {}^{d}/_{r}, \quad (2)$$

sendo θo ângulo de deformação, em radianos, d a máxima deformação calculada pela análise estática, em mm, e r definido em (1).Após ter o ângulo de deformação, foi calculada a constante elástica da mola usando (3):

$$K = {}^{T}/_{\theta}, \quad (3)$$

sendo K a constante elástica da mola, em N.m/rad, enquanto T e θ foram definidos anteriormente.

Com os cálculos devidamente realizados foi possível determinar que a mola personalizada possui uma constante elástica de, aproximadamente,130 N·m/rad. Vale ressaltar que para fins de certificação, o cálculo não foi realizado apenas uma vez com uma análise estática. Foram realizadas várias análises com diferentes forças e calculadas várias constantes elásticas.

Por fim, foi calculada a rigidez e a resistência do conjunto de molas conectado em paralelo. Para isso foi usado (4) e (5):

$$T_{máx,conj} = 2 * T_{máx,mola}, \quad (4)$$

sendo que $T_{máx,conj}$ se refere ao máximo torque suportado pelo conjunto de molas em paralelo e $T_{máx,mola}$ se refere ao máximo torque suportado por uma mola, e conforme definido vale 25 N.m. Assim, foi calculado que o máximo torque que o conjunto pode suportar é de 50 N.m. A constante elástica do conjunto de molas é dadas por:

$$K_{conj} = 2 * K, \quad (5)$$

sendo K_{conj}, conforme os cálculos realizados, igual a 260 N·m/rad.

Sendo assim, o conjunto de molas possui características excelentes para o seu uso em um Atuador Elástico em Série rotacional, pois possui alta resistência a torques e uma relativa baixa rigidez, proporcionando uma melhor precisão nos cálculos de posição do eixo e da força aplicada.

3.2 Análise do Torque no Motor

Além do cálculo da mola torcional personalizada foi realizado também um cálculo do torque necessário pelo motor para atender as características do movimento da caminhada.

Para isso foram utilizados dados fornecidos por Kirtley, C. (2006). Com esses dados para o tornozelo, para o joelho e para o quadril foi possível realizar um cálculo inverso para chegar ao torque necessário do motor, e com isso, comparar com o motor utilizado no atuador projetado.

Para os cálculos foram definidos alguns valores, como a eficiência (ε) e a redução (r) da redução coroa-pinhão, como pode ser visto em (6):

$$r = 150; \ \varepsilon = 0{,}7. \quad (6)$$

Para calcular a velocidade angular do motor, em rpm, (ω_m) para cada articulação, foi utilizado a seguinte expressão:

$$\omega_m = \omega * r, \quad (7)$$

sendo ω a velocidade angular, em rpm, de cada articulação, conforme o trabalho de Kirtley, C. (2006). Além da velocidade angular, foi calculado também o torque do motor, em mN·m, (T_m) para cada articulação, conforme abaixo:

$$T_m = {}^{T}/_{r * \varepsilon}, \quad (8)$$

sendo T o torque exercido por cada articulação, em mN.m, conforme Kirtley, C. (2006).

Com isso, foi possível gerar gráficos para cada articulação, do torque necessário pelo motor, em mN·m, pela velocidade angular, em rpm. Em todos os gráficos foi traçada a curva ideal do motor (linha verde) e a linha de torque contínuo máximo (linha tracejada em azul). Na Fig.8, pode-se observar o resultado para o quadril, na Fig.9, para o joelho e, por fim, na Fig.10, para o tornozelo.

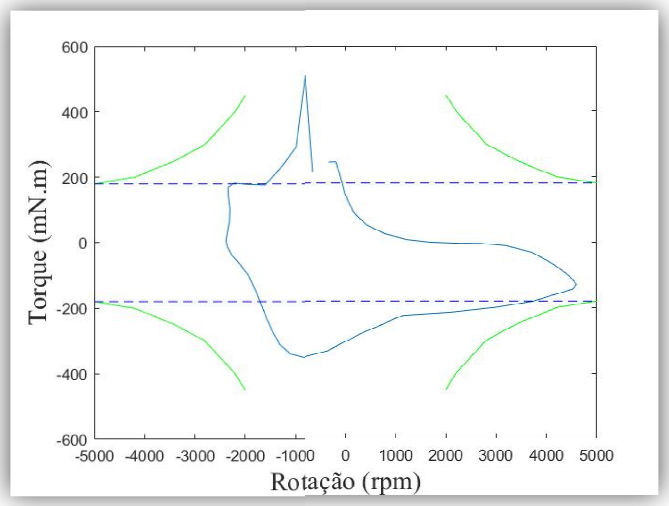

Fig.8 Gráfico de Torque x Velocidade angular para o quadril.

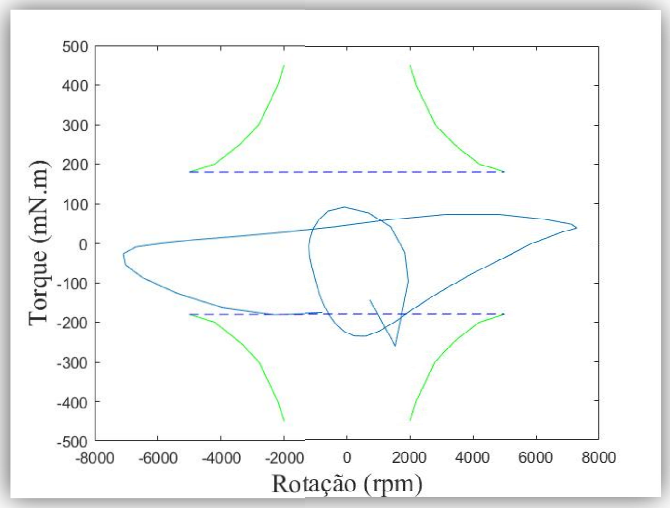

Fig.9 Gráfico de Torque x Velocidade angular para o joelho.

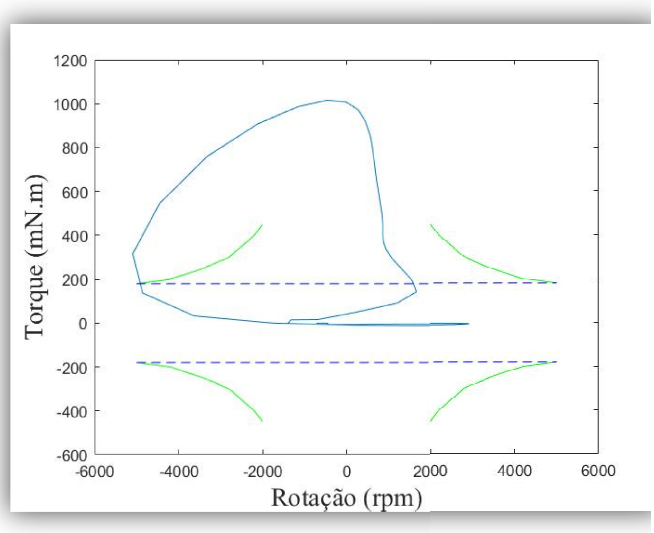

Fig.10 Gráfico de Torque x Velocidade angular para o tornozelo.

Conforme pode ser visto, para o quadril e para o joelho, o torque permanece em sua maior parte dentro da faixa ideal de torque contínuo (entre as linhas tracejadas), com picos em determinadas rotações. Sendo assim, é possível utilizar o motor para o controle dessas duas juntas. Entretanto, para o tornozelo, o torque possui a sua maior parte acima do torque máximo suportado pelo motor. Sendo assim, o atuador poderá ser utilizado para a junta do tornozelo apenas em determinados perídodos da caminhada. Como o exoesqueleto será utilizado para reabilitação, esta limitação poderá ser ajustada ao caminhar do paciente conforme a sua necessidade.

4. CONCLUSÃO

Portanto, a partir do projeto e da avaliação de desempenho, pode-se concluir que o Atuador Elástico em Série rotacional que foi desenvolvido pode ser utilizado para compor o exoesqueleto exo-TAO, cumprindo suas principais funções. Porém, ainda serão necessários testes de controle em relação aos elementos torcionais, ao motor e ao encoder que compõe o atuador proposto. Somente após esses testes e o correto funcionamento eletrônico, o atuador será instalado e poderá ser utilizado no exoesqueleto em questão.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, processos nos. 2019/23413-5 (Iniciação Científica) e 2019/05937-7 (Projeto Regular) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, como parte do Programa de Apoio à Pós-Graduação e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Tecnologia Assistiva no Brasil (PGPTA), auxílio no. 3457/2014.

REFERÊNCIAS

Kirtley, C. (2006). Clinical gait analysis: theory and practice (First ed.). Churchill Livingstone.

KollenKwakkel, B.J.; Krebs, G. and H.I. (2008). Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review. Neurorehabilitation and Neural Repair, 22(2):111–121.

Kong, K.; Bae, J.; Tomizuka, M. (2009). Control of rotary series elastic actuator for ideal force mode actuation in human robot interaction applications. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 14, 105–118.

Kong, K.; Bae, J.; Tomizuka, M. (2010). A compact rotary series elastic actuator for knee joint assistive system. In IEEE International Conference Robotics and Automation, Alaska, pp. 2940–2945.

Prange, G.B; et al. (2006). Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. Journal of Rehabilitation Research and Development, 43(2):171–183.

Pratt, G. A.; Williamson, M. M. (1995). Series elastic actuators. In Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, pp. 399–406.

dos Santos, W. M.; Caurin, G. A.P.; Siqueira, A. A.G. (2017a). Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary Series Elastic Actuator. Control Engineering Practice, v.58, p.307 - 318.