

Oportunidade FAPESP: <https://fapesp.br/oportunidades/7503>

Projeto de Doutorado

Título: Desenvolvimento de Exoesqueleto Modular e Compatível com Equipamentos de Assistência das Atividades da Vida Diária

Associado ao projeto: Centro de Tecnologia Assistiva para as Atividades de Vida Diária

Enunciado do Problema

Este projeto de pesquisa propõe desenvolver e avaliar um novo exoesqueleto robótico para membros inferiores modular e compatível com diferentes equipamentos de assistência a partir do Exo-TAO. Em um primeiro momento, serão realizados estudos de avaliação do exoesqueleto Exo-TAO, buscando encontrar os principais problemas existentes na configuração atual. Em seguida, esse trabalho estudará as possíveis soluções tanto do ponto de vista mecânico como de controle e acionamento, e desenvolverá métodos para a resolução dos problemas encontrados, possibilitando ao usuário a utilização do exoesqueleto de forma segura, confortável e eficiente. Pretende-se realizar um estudo dos materiais, suas propriedades e seus métodos de fabricação, buscando um compromisso entre características como resistência, flexibilidade, liberdade de forma, massa e custos; além de uma metodologia de prototipagem rápida por meio de impressão 3D, que juntamente com as análises em CAE e CAD, será utilizada para o processo de desenvolvimento e refinamento das estruturas anatômicas, da junta multiaxial do quadril e das demais partes envolvidas no projeto. Adicionalmente, o novo exoesqueleto deverá ter como característica a compatibilidade com demais equipamentos de assistência das atividades da vida diária como cadeiras de rodas, andadores, entre outros. A compatibilidade se refere tanto ao acoplamento mecânico entre eles, como ao controle integrado dos dispositivos. Os novos mecanismos desenvolvidos atuarão em conjunto com o controle de impedância variável do exoesqueleto e com o andador desenvolvido para dar suporte ao caminhar e promover a reabilitação motora. O novo exoesqueleto será avaliado com voluntários saudáveis e pacientes deficiência motora.

Exoesqueletos

O desenvolvimento de tecnologias para assistência e reabilitação do caminhar tem atraído grande interesse entre os pesquisadores desde o início do século XXI. Recentemente, um elevado número de exoesqueletos de membros inferiores (e órteses ativas) para assistência e reabilitação foram desenvolvidos e relatados na literatura [1]. O objetivo principal dos exoesqueletos para assistência é dar suporte a usuários que sofreram lesão medular completa, situação na qual não há possibilidade de recuperação dos movimentos. Por outro lado, os exoesqueletos para reabilitação, desenvolvidos para pacientes que sofreram AVC ou lesão medular incompleta (SCI), buscam promover a reorganização cortical motora de forma a melhorar o padrão de marcha dos pacientes.

Exo-TAO

No Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP foi desenvolvido o exoesqueleto modular de membros inferiores Exo-TAO, que apresenta uma estrutura mecânica responsável por toda interação física entre o paciente e os algoritmos de controle adaptativos que foram ou estão sendo desenvolvidos pelos demais integrantes do grupo de pesquisa. Como descrito em [2, 3], o exoesqueleto é composto por estruturas tubulares de alumínio e seis juntas livres que fornecem uma característica modular ao sistema. Esse recurso permite que o exoesqueleto seja adaptado para auxiliar o movimento de uma ou mais articulações do paciente. O acionamento do exoesqueleto também é modular, podendo ser feito de forma passiva, por meio de molas e

amortecedores, ou com atuação ativa por meio de atuadores. Além disso, seus elos tubulares telescópicos, desenvolvidos para ajustar o tamanho dos elos a fim de alinhar as articulações do exoesqueleto com as articulações do paciente, permite que o exoesqueleto seja ajustável para atender diferentes pacientes, como mostrado na Figura 1.

Com relação à atuação ativa, sistemas robóticos destinados a ter contato direto com seres humanos, sendo o caso dos exoesqueletos e robôs de reabilitação, devem possuir mecanismos que garantam uma interação estável e complacente com o usuário. Desta forma, atuadores com controladores de força e impedância, atuadores com rigidez variável, atuadores elásticos em série, entre outros tipos, podem ser utilizados para movimentar as juntas do exoesqueleto. O atuador elástico em série rotacional (AESr), descrito em [4], possui tais características, pode ser montado diretamente no Exo-TAO. Ele é constituído de um motor de corrente contínua, um redutor de velocidade de tipo coroa e rosca sem-fim e uma mola torsional customizada. Outros atuadores elásticos em série [5, 6] também foram desenvolvidos e construídos no Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC/USP e são utilizados no Exo-TAO, como mostrado na Figura 1.

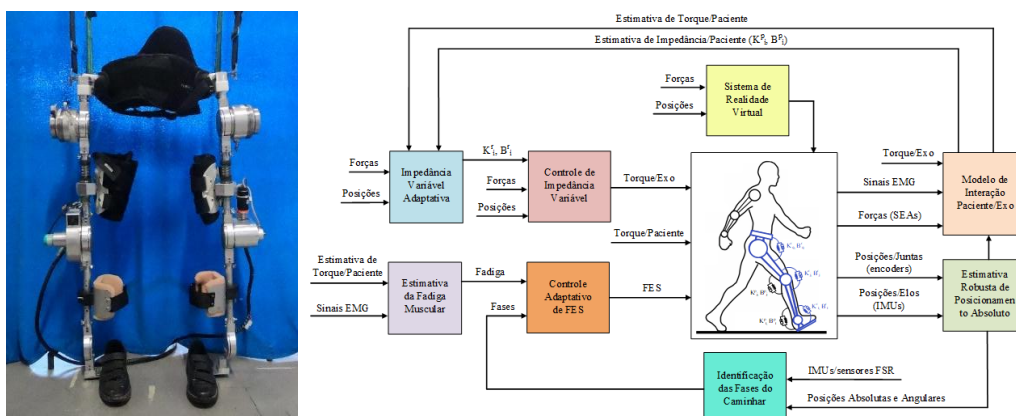


Figura 1: Exoesqueleto Exo-TAO e estratégias adaptativas híbridas de reabilitação robótica.

Algumas limitações e problemas foram identificados na estrutura do exoesqueleto que dificultam a sua utilização e que poderão ser estudados e otimizados nos projetos dos exoesqueletos a serem desenvolvidos neste projeto.

Os elos do exoesqueleto Exo-TAO são telescópicos e, portanto, podem ser ajustados longitudinalmente para alinhar manualmente as articulações do exoesqueleto com as articulações do paciente. O ajuste por meio de abraçadeiras posicionadas nas extremidades externas do tubo se mostra na prática pouco eficiente e muito trabalhoso, já que realizam a conexão entre os tubos telescópicos via atrito por pressão de contato, logo, necessitam de um aperto muito severo para que a fixação aconteça, tornando-o um ajuste danoso a integridade física dos tubos que se deformam e das próprias abraçadeiras que quebram com frequência.

As interfaces que conectam o exoesqueleto ao paciente (cinto pélvico e tiras de Velcro®) são fixadas aos elos do exoesqueleto por meio de rolamentos lineares, utilizados para compensar desalinhamentos entre o exoesqueleto e as articulações do paciente. Nesse sentido, o uso do mancal linear para compensação dos desalinhamentos da marcha além de ser bastante efetivo no desempenho do seu papel, colabora para o conforto do paciente prevenindo a fricção entre as faixas e a perna do usuário. Contudo, no que tange a interface de conexão do exoesqueleto com o paciente, as tiras de velcro utilizadas na coxa e na perna demonstram problemas em relação a transmissão do torque e do movimento, já que são feitas de um material bastante maleável, sem partes rígidas e que permitem deformações elásticas.

A modularidade de atuação das juntas do Exo-TAO é uma característica fundamental para a flexibilidade no tratamento de uma ou mais articulações. As juntas do joelho e do tornozelo mostram um bom desempenho no Exo-TAO, não necessitando de grandes mudanças. Entretanto, a junta do quadril apresenta alguns problemas relacionados com os graus de

liberdade de movimentação (DOFs), isso ocorre pois ela foi desenvolvida da mesma forma que as outras duas articulações (1-DOF), sendo que exige requisitos de projeto diferentes quando analisadas em conjunto com a biomecânica do corpo. Há a necessidade de incluir mais graus de liberdade na articulação do quadril, permitindo uma movimentação mais natural ao paciente.

O exoesqueleto Exo-TAO está sendo utilizado para avaliar estratégias adaptativas híbridas para a reabilitação robótica do caminhar, utilizando algoritmos de controle adaptativos e novas interfaces de comunicação e interação entre o usuário e os dispositivos robóticos conforme apresentado na Figura 2, sendo parte das pesquisas associadas ao projeto regular FAPESP (no. 2019/05937-7).

Os estudos realizados até o momento foram conduzidos considerando usuários hígidos, com resultados promissores [7, 8, 9, 10, 11]. A avaliação dos protocolos de reabilitação do exoesqueleto Exo-TAO com pacientes, proposta neste projeto, será essencial para a evolução do próprio Exo-TAO e para o desenvolvimento dos novos exoesqueletos propostos neste projeto.

Atividades e Cronograma

As atividades previstas para o projeto são:

1. **Revisão bibliográfica:** levantamento e análise das publicações científicas na área, objetivando a concepção do referencial teórico e seleção de ideias para os esboços iniciais do novo exoesqueleto;
2. **Instrumentação e Avaliação do Exo-TAO:** Instrumentação do exoesqueleto Exo-TAO por meio de sensores (como por exemplo: Strain gauges) e avaliação do mesmo com pessoas hígdas e pacientes;
2. **Estudo e Escolha dos Materiais:** Análise das propriedades de diferentes materiais metálicos, cerâmicos e compósitos, buscando um compromisso entre características importantes para concepção do projeto, como: resistência, flexibilidade, leveza, custos e liberdade de forma;
3. **Projeto dos componentes (CAD):** Desenho e dimensionamento das peças do exoesqueleto, considerando os requisitos cinemáticos, estruturais, ergonômicos e biomecânicos para resolução dos problemas encontrados na avaliação do exoesqueleto Exo-TAO e nas características de modularidade e compatibilidade;
4. **Prototipagem com impressão 3D:** Produção das primeiras peças via impressão 3D para testes de montagem e funcionamento do conjunto, visando encontrar possíveis problemas práticos antes da fabricação final.
5. **Fabricação das peças finais e montagem da estrutura:** Fabricação e montagem das peças finais, após a convergência do projeto e a conclusão das metas estabelecidas;
6. **Desenvolvimento do Sistema de Controle:** Desenvolvimento de módulos de controle compatíveis com equipamentos de assistência, incluindo andadores inteligentes e cadeiras de rodas motorizadas.
7. **Execução de experimentos e avaliação:** Experimentos serão propostos e executados visando validar as soluções mecânicas e ergonômicas implementadas e obter os dados necessários para avaliar o desempenho do exoesqueleto na reabilitação do usuário.
8. **Escrita de Relatórios, Artigos e Tese.**

Atividade	2/2025	1/2026	2/2026	1/2027	2/2027	1/2028	2/2028	1/2029
1	x	x						
2		x	x					
3			x	x	x			
4			x	x				
5				x	x	x		
6				x	x	x		
7						x	x	
8		x		x		x		x

Referências

- [1] B. Chen, H. Ma, L. Qin, F. Gao, K. Chan, S. W. Law, Li. Qin, and W. H. Liao. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *Journal of Orthopaedic Translation*, 5:26 – 37, 2016. Special Issue: Orthopaedic Biomaterials and Devices.
- [2] W. M. dos Santos, S. L. Nogueira, G. C. de Oliveira, G. G. Peña, and A. A. G. Siqueira. Design and evaluation of a modular lower limb exoskeleton for rehabilitation. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 447 – 451, London, 2017.
- [3] W. M. dos Santos and A. A. G. Siqueira. Design and control of a transparent lower limb exoskeleton. In *4th International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR2018)*, Pisa, Italy, 2018.
- [4] W. M. dos Santos, G. A. P. Caurin, and A. A. G. Siqueira. Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary series elastic actuator. *Control Engineering Practice*, 58:307–318, 2017.
- [5] De Gaitani, F. H. M.; Dos Santos, W. M.; Siqueira, A. A. G. Design and Performance Analysis of a Compact Series Elastic Actuator for Exoskeletons. *Journal of Control Automation And Electrical Systems*. , v.1, p.1 - 10, 2022.
- [6] W. M. dos Santos; Ortega, F. M. E.; Siqueira, A. A. G. Desenvolvimento de um Atuador Elástico em Série para o Acionamento da Junta do Quadril do Exoesqueleto Exo-TAO In: XXIV Congresso Brasileiro de Automática, 2022, Fortaleza.
- [7] W. M. dos Santos and A. A. G. Siqueira. Optimal impedance via model predictive control for robot-aided rehabilitation. *Control Engineering Practice*, 93:1-8, 2019.
- [8] G. G. Peña, L. J. Consoni, W. M. dos Santos, and A. A. G. Siqueira. Feasibility of an optimal EMG-driven adaptive impedance control applied to an active knee orthosis. *Robotics and Autonomous Systems*, 112:98-108, 2019.
- [9] Ostan, I.; Siqueira, A. A. G. Haptic Feedback Interface based on Cascade Admittance-Impedance Controller. In: *9th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2022)*. August, 2022.
- [10] Moreno, J. Y.; Escalante, F. M.; Boaventura, T.; Terra, M. H.; Siqueira, A. A. G. ReRobApp: A modular and open-source software framework for robotic rehabilitation and human-robot interaction. In: *9th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2022)*. August, 2022.
- [11] Escalante, Felix M.; Santos, Leonardo F. dos; Moreno, Yecid; Siqueira, Adriano A. G.; Terra, Marco H.; Boaventura, Thiago. Markovian Transparency Control of an Exoskeleton Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v.8, p.544 - 551, 2023.