

PROJETO MECÂNICO E FABRICAÇÃO DAS JUNTAS E DO SUPORTE LOMBAR DO EXOROBOWALKER COM TESTES INICIAIS NA JUNTA DO JOELHO

Matheus Prado Cardoso, matheus.cardoso.61@edu.ufes.br

Laura Fachetti Jeveaux, laura.jeveaux@edu.ufes.br

Rafhael Milanezi de Andrade, rafhael.andrade@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910 ES, Brasil.

Resumo. Exoesqueletos de membros inferiores têm se mostrado ferramentas eficazes na reabilitação da marcha de pessoas com deficiências motoras. Esses dispositivos podem ser classificados em três categorias principais: exoesqueletos para caminhada sobre o solo, em esteira e acoplados a andadores, cada qual com funções específicas no processo de reabilitação. Este trabalho apresenta o conceito e o desenvolvimento de um exoesqueleto multimodal de seis graus de liberdade, propondo uma solução integrada para diferentes contextos de reabilitação. O exoesqueleto de membro inferior, denominado ExoRoboWalker, foi projetado para auxiliar os movimentos do quadril, joelho e tornozelo de ambos os membros, utilizando um suporte lombar ajustável que permite sua fixação a uma esteira ou a um andador robótico. O projeto contempla o uso de atuadores elétricos compostos por motores brushless e redutores harmônicos, além de um sistema de molas para atenuar os efeitos de picos de torque. São apresentados os resultados das simulações estáticas estruturais da nova configuração e as etapas de fabricação das principais juntas do exoesqueleto, com destaque para as juntas do joelho e tornozelo, que apresentam maiores desafios relacionados ao travamento mecânico. O desenvolvimento do protótipo busca oferecer uma estrutura leve, segura e funcional, visando futuras validações experimentais com usuários em contextos reais de reabilitação da marcha.

Palavras-chave: Exoesqueleto. Reabilitação da marcha. Estrutura multimodal. Simulação estrutural.

1. INTRODUÇÃO

Os exoesqueletos de membros inferiores são dispositivos vestíveis projetados para auxiliar ou restaurar os movimentos articulares do quadril, joelho e tornozelo, permitindo que os usuários realizem tarefas motoras que, de outra forma, não conseguiriam executar de forma independente. Esses dispositivos têm um potencial significativo para melhorar o padrão de marcha de indivíduos com deficiências motoras, tornando-se ferramentas importantes tanto para a reabilitação quanto para a assistência funcional. Os EMIs podem ser classificados em três categorias principais: exoesqueletos para caminhada em solo, exoesqueletos para esteira e exoesqueletos acoplados a andadores. Cada um desses tipos é utilizado em diferentes contextos e aplicações clínicas. Os benefícios relatados incluem melhorias na mobilidade, resistência cardiovascular e desempenho neuromuscular (BARKATAKI; KALITA; KIRTANIA, 2024).

O treinamento repetitivo e orientado a tarefas, proporcionado por sistemas de marcha assistida por robôs, tem demonstrado potencial para melhorar a capacidade de marcha em indivíduos com distúrbios neurológicos, como resultado da plasticidade cerebral (BORGGRÆFE et al., 2010). No campo da reabilitação, os exoesqueletos para membros inferiores oferecem diversas vantagens, como precisão, repetibilidade e atividade intensiva específica para a tarefa (MUTLU; KROSSCHEL; SPIRA, 2009). A pesquisa nessa área tem crescido de forma constante ao longo dos anos, impulsionada pelo crescente interesse em encontrar soluções e melhorias para auxiliar a marcha em pessoas com comprometimentos neuromusculares (RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ; LOBO-PRAT; FONT-LLAGUNES, 2021).

Nos últimos anos, observou-se um aumento significativo no desenvolvimento de exoesqueletos voltados à reabilitação e ao treinamento da marcha. Esses sistemas são geralmente divididos em três categorias principais: sistemas baseados em esteira, dispositivos para treinamento sobre o solo e exoesqueletos acoplados a andadores (DÍAZ et al., 2011). Entre os primeiros, destacam-se o Lokomat e o Walkbot, que utilizam uma estrutura robótica montada sobre esteira para auxiliar os usuários durante a marcha. Estudos como Borggræfe e outros (2010) e Jin e outros (2020) avaliaram a eficácia dessa abordagem na recuperação motora. Além desses sistemas estacionários, dispositivos para caminhada sobre o solo, como o Indego e o HAL, têm ganhado atenção por proporcionarem maior liberdade de movimento aos usuários, favorecendo o treinamento em ambientes mais próximos à vida cotidiana.

Recentemente, diversos pesquisadores apresentaram estudos voltados ao desenvolvimento de exoesqueletos de membros inferiores para reabilitação da marcha. Esses estudos propõem avanços que vão desde melhores estratégias de controle até novos projetos mecânicos com mais graus de liberdade, permitindo movimentos mais naturais, e o desenvolvimento de estruturas modulares que se adaptam a diferentes tipos corporais. O CPWalker, por exemplo, é uma plataforma robótica que combina um andador inteligente com um exoesqueleto, controlado por uma interface versátil

para dar suporte a novas terapias de reabilitação (BAYON et al., 2017). Eguren e outros (2019) propuseram um exoesqueleto pediátrico leve, modular e customizável para treinamento de marcha sobre o solo e reabilitação de crianças com deficiências nos membros inferiores, composto por seis graus de liberdade atuando nas articulações do quadril, joelho e tornozelo. No desenvolvimento de exoesqueletos, há uma clara preocupação com um ajuste para uma ampla faixa de usuários. Zhang e outros (2020), por exemplo, desenvolveram uma estrutura mecânica de exoesqueleto capaz de se adaptar a usuários de diferentes tamanhos. O dispositivo pode variar em comprimento e se adaptar a crianças de 8 a 12 anos, incluindo um mecanismo de alinhamento articular que permite acomodar a rotação interna e externa da articulação do quadril.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um redesenho do ExoRoboWalker, um exoesqueleto de membros inferiores com seis graus de liberdade, com juntas ativas localizadas no quadril, joelho e tornozelo. O objetivo deste estudo é aprimorar a estrutura mecânica do modelo existente, tornando-o ajustável para crianças e jovens adultos com paralisia cerebral, e capaz de operar em diferentes contextos de reabilitação — incluindo caminhada sobre o solo, em esteira e com auxílio de andador. A nova arquitetura inclui componentes telescópicos nos segmentos da perna e coxa e um novo desenho dos módulos de atuadores. Uma nova estrutura de suporte lombar também é introduzida para aumentar a estabilidade durante o uso. Visando atender a um público mais amplo com um único dispositivo, este trabalho propõe o desenvolvimento de um exoesqueleto multimodal capaz de operar nas três modalidades descritas.

2. METODOLOGIA

A proposta central deste trabalho consiste em aprimorar a estrutura mecânica do exoesqueleto ExoRoboWalker, com foco na criação de uma nova versão dos componentes estruturais e atuadores. O projeto contemplou um novo modelo para o suporte lombar, visando garantir maior estabilidade e conforto ao usuário, além do desenvolvimento de novos atuadores destinados às juntas do quadril, joelho e tornozelo. Entretanto, o foco experimental deste estudo concentra-se nas juntas do joelho e tornozelo, por serem as que mais apresentam problemas de travamento durante a movimentação do sistema.

Ao término do processo de modelagem 3D, propõe-se também uma estratégia de integração do ExoRoboWalker como uma plataforma de reabilitação multimodal, capaz de permitir diferentes modos de treinamento da marcha como por exemplo: sobre esteira, em solo e com auxílio de dispositivos como andadores. Essa abordagem busca oferecer maior flexibilidade terapêutica, possibilitando que o paciente realize o treinamento da marcha em diferentes condições e, assim, evolua de forma progressiva durante o processo de reabilitação. As etapas metodológicas compreendem o projeto mecânico, o desenvolvimento da bancada experimental e a realização de testes de desempenho das juntas, com o objetivo de validar seu funcionamento.

2.1. EXOROBOWALKER

O exoesqueleto apresentado neste artigo é chamado de ExoRoboWalker. É um dispositivo de seis graus de liberdade (6-DoF) projetado para treinamento de marcha em solo plano, destinado a crianças e jovens adultos. Sua configuração consiste em seis pequenos atuadores com sistemas de acionamento harmônico, montados nas articulações do quadril, joelho e tornozelo. Esses atuadores são conectados por barras laterais aos segmentos da coxa, perna e pé. Cada módulo é composto por um motor flat EC 45 (70 watts, brushless, Maxon Motors, Suíça) acoplado a um harmonic drive CSD-20-160-2A (relação 160:1, Harmonic Drive LLC, Massachusetts, EUA) (ANDRADE; BONATO, 2021).

Um dos objetivos dos estudos envolvendo o ExoRoboWalker é torná-lo uma plataforma para reabilitação e pesquisa em estratégias de controle para treinamento de marcha e adaptação motora. No entanto, o protótipo físico ainda requer melhorias antes que testes possam ser realizados com indivíduos com deficiências motoras. Nesse contexto, estudos têm sido conduzidos com o objetivo de aprimorar o sistema. O estudo desenvolvido por Andrade, Sapienza e Bonato (2019) propôs o desenvolvimento de modos de operação transparentes para o ExoRoboWalker. Na pesquisa, uma abordagem teórica foi estabelecida e estratégias para a resolução da tarefa foram discutidas. Além disso, Andrade e outros (2021) apresentaram uma estratégia de controle de impedância para rastreamento de trajetória aplicada ao ExoRoboWalker. O estudo demonstrou que o controlador proposto foi capaz de guiar o usuário ao longo de uma trajetória de referência, reduzindo o torque de interação usuário-robô e contribuindo para um padrão de marcha mais fisiológico. Outro exemplo é a pesquisa apresentada por Andrade e outros (2023), na qual implementaram uma estratégia de controle transparente no ExoRoboWalker. A proposta utiliza um controlador de torque zero com compensação por realimentação e antecipação para a dinâmica do sistema e a impedância do atuador. Os dados foram analisados a partir de indivíduos saudáveis caminhando com o exoesqueleto em modo transparente, modo não transparente e sem o dispositivo. Os resultados indicaram que o controlador transparente reduziu o torque de interação usuário-robô e melhorou a cinemática da marcha em comparação com o modo não transparente. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Andrade e outros (2023) também implementaram uma estratégia de operação transparente no ExoRoboWalker, onde foi observado que o torque de interação usuário-robô melhorou. Visando melhorar a eficiência do exoesqueleto, o estudo Andrade e outros (2024) propôs um método de controle de torque baseado em osciladores adaptativos (OAs), com o objetivo de reduzir as forças

de interação com o usuário. Os controladores baseados em OAs demonstraram reduzir os torques médios de interação em até 40% em velocidades de caminhada mais altas.

2.2. ESTRUTURA MECÂNICA DAS JUNTAS E DO SUPORTE LOMBAR

As juntas do exoesqueleto desempenham papel essencial na reprodução dos movimentos da marcha humana. No ExoRoboWalker, as articulações do quadril, joelho e tornozelo foram redesenhadas para apresentar menor massa e um layout estrutural padronizado. O novo modelo foi concebido com base nas demandas funcionais do exoesqueleto e nos problemas observados durante os testes da versão anterior, com destaque para o travamento dos atuadores harmônicos nas juntas do joelho e tornozelo. Esse fenômeno ocorre quando o torque aplicado excede o limite suportado pelo redutor, resultando em sobrecarga mecânica e risco de falha do sistema.

Para mitigar esse problema, adotou-se a inclusão de uma mola linear de compressão nas articulações críticas, funcionando como um elemento de amortecimento passivo. Essa solução absorve parte das forças de impacto geradas durante o movimento, reduzindo os picos de torque e contribuindo para uma marcha assistida mais suave e segura. As articulações foram projetadas com geometria externa unificada, diferenciando-se apenas pelos componentes internos que definem o grau de liberdade de cada junta. Essa padronização facilita a fabricação, simplifica a manutenção e reduz o número de peças exclusivas.

As articulações foram projetadas para seguir uma geometria externa e um método de montagem padronizados. A variação entre as articulações reside apenas nos componentes internos, que definem o grau de liberdade específico de cada articulação. Esta estratégia ajuda a simplificar a manutenção, padronizar a fabricação e reduzir o número de peças exclusivas no sistema.

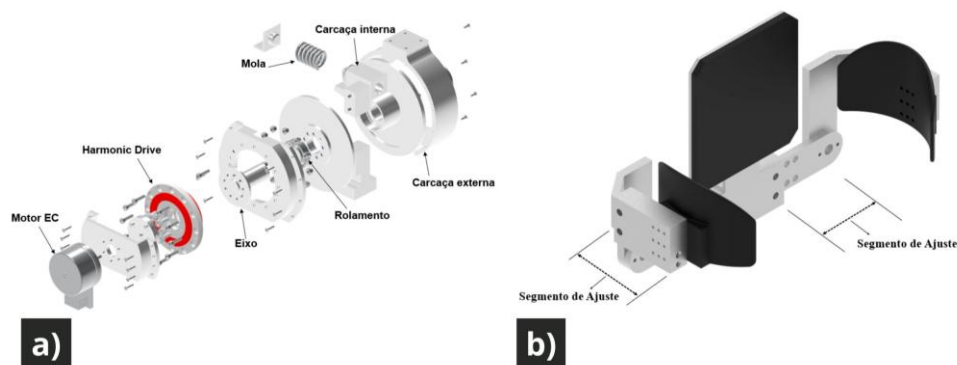
Todos os componentes das articulações foram modelados utilizando o software Solid Edge, que também foi usado para projetar a estrutura completa do exoesqueleto. O material escolhido para as carcaças das articulações foi o alumínio 7075-T6, amplamente utilizado na indústria aeroespacial. Este material foi selecionado devido à sua excelente relação resistência/peso. Além de ser resistente à fadiga e à corrosão, o alumínio 7075-T6 contribui para a redução do peso total do exoesqueleto — um fator crítico para o conforto e a usabilidade durante sessões prolongadas de reabilitação. A massa estimada de cada junta, de acordo com os cálculos do Solid Edge, é de aproximadamente 900 g.

Para garantir o alinhamento adequado e a estabilidade estrutural durante o movimento, cada articulação foi equipada com rolamentos inseridos no eixo central, proporcionando suporte rotacional e maior resistência a cargas transversais, especialmente durante a fase de apoio da marcha.

Um dos requisitos essenciais do exoesqueleto é que ele deve fornecer uma estrutura que assegure tanto o movimento natural quanto a estabilidade pélvica. Durante a marcha, a região lombar ajuda a manter o equilíbrio e sustenta o centro de massa do corpo. Portanto, o suporte lombar desempenha um papel fundamental no exoesqueleto, especialmente para pacientes com paralisia cerebral. O suporte lombar foi desenvolvido com foco em estabilidade, conforto e ajustabilidade, sendo essencial para o equilíbrio pélvico e a sustentação do tronco durante a marcha. Sua estrutura possui mecanismos deslizantes que permitem variação de largura entre 240 e 330 mm, garantindo adaptação a diferentes biótipos.

A Figura 1 mostra a vista explodida da articulação do joelho, destacando os principais componentes internos e a posição do sistema de molas, projetados para evitar o travamento do Harmonic Drive durante condições de torque máximo e a estrutura do suporte lombar e suas áreas de ajuste.

Figura 1 – Componentes do ExoRoboWalker: a) Vista explodida da junta do joelho e seus componentes internos, b) Modelo tridimensional do suporte lombar



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3. CONCEITO MULTIMODAL DO EXOROBOWALKER

Os robôs de reabilitação constituem uma classe de sistemas desenvolvidos para auxiliar diretamente o tratamento de pacientes com comprometimentos motores, oferecendo suporte físico e controle de movimento durante o treinamento.

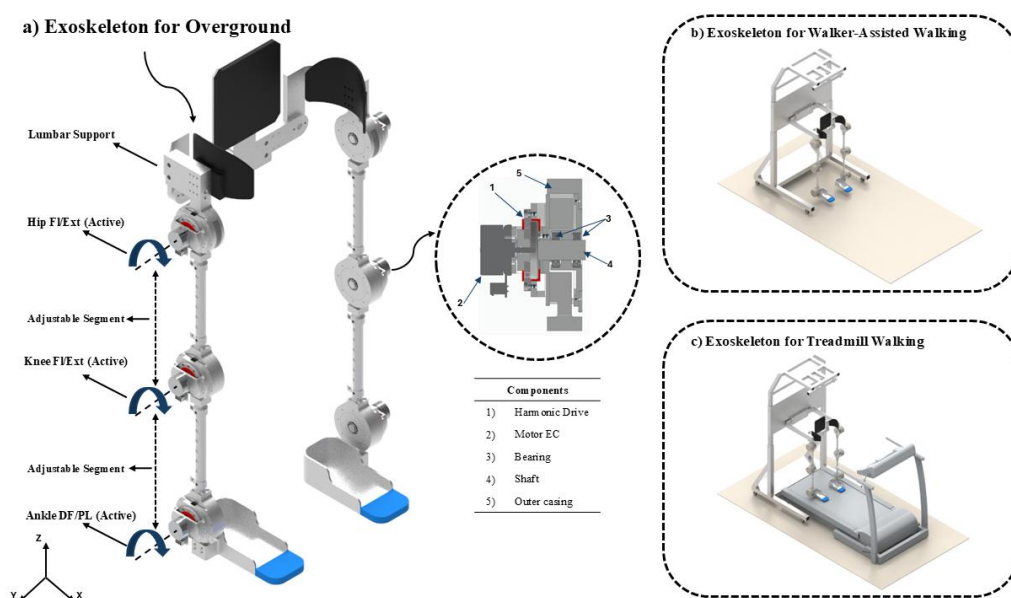
Dentro dessa categoria, os exoesqueletos de membros inferiores destacam-se por sua capacidade de reproduzir os movimentos articulares do quadril, joelho e tornozelo de forma controlada e repetitiva, promovendo ganhos funcionais e neuromotores. Tradicionalmente, esses dispositivos são classificados de acordo com o ambiente e a forma de aplicação terapêutica — sendo divididos em exoesqueletos para caminhada em solo, em esteira e acoplados a andadores. Cada uma dessas modalidades apresenta vantagens específicas e níveis distintos de assistência e estabilidade.

A proposta deste trabalho consiste em unificar essas três abordagens em um único sistema mecânico, configurando o ExoRoboWalker como uma plataforma multimodal de reabilitação. Essa concepção permite que o mesmo exoesqueleto seja utilizado em diferentes contextos clínicos, de acordo com a evolução funcional do paciente. No modo de esteira, o dispositivo pode ser fixado por meio do suporte lombar a uma base estável, facilitando o controle do padrão de marcha em ambiente seguro. No modo sobre o solo, o sistema atua de forma independente, possibilitando o treinamento em deslocamentos livres. Já no modo com andador, o exoesqueleto é acoplado a uma estrutura auxiliar que oferece suporte parcial do peso corporal, favorecendo o equilíbrio e a segurança do usuário durante a marcha assistida.

A arquitetura mecânica foi projetada para garantir compatibilidade entre esses diferentes modos de operação. Elementos telescópicos nas regiões da coxa e da perna permitem ajustes para usuários com estaturas entre 1,60 m e 1,90 m, enquanto o suporte lombar ajustável assegura adaptação anatômica e correta distribuição de carga. O sistema suporta usuários de até 120 kg e possui amplitudes articulares que reproduzem o movimento fisiológico da marcha: flexão/extensão e abdução/adução no quadril, flexão/extensão no joelho e flexão plantar/dorsiflexão no tornozelo. Os parâmetros antropométricos utilizados no dimensionamento estrutural foram definidos com base nas tabelas apresentadas por Winter (2009), garantindo conformidade com as proporções típicas da população-alvo.

A concepção multimodal proposta amplia as possibilidades de uso do exoesqueleto em diferentes fases da reabilitação, permitindo que o paciente evolua gradualmente entre os modos de suporte — da esteira ao andador e, por fim, à caminhada independente em solo plano. A Figura 2 apresenta a ideia do modelo multimodal para o exoesqueleto.

Figura 2 – Conceito multimodal do ExoRoboWalker: a) Exoesqueleto para caminhada em solo, b) Exoesqueleto acoplado a andador, c) Exoesqueleto acoplado à esteira para reabilitação



Fonte: Produção do próprio autor.

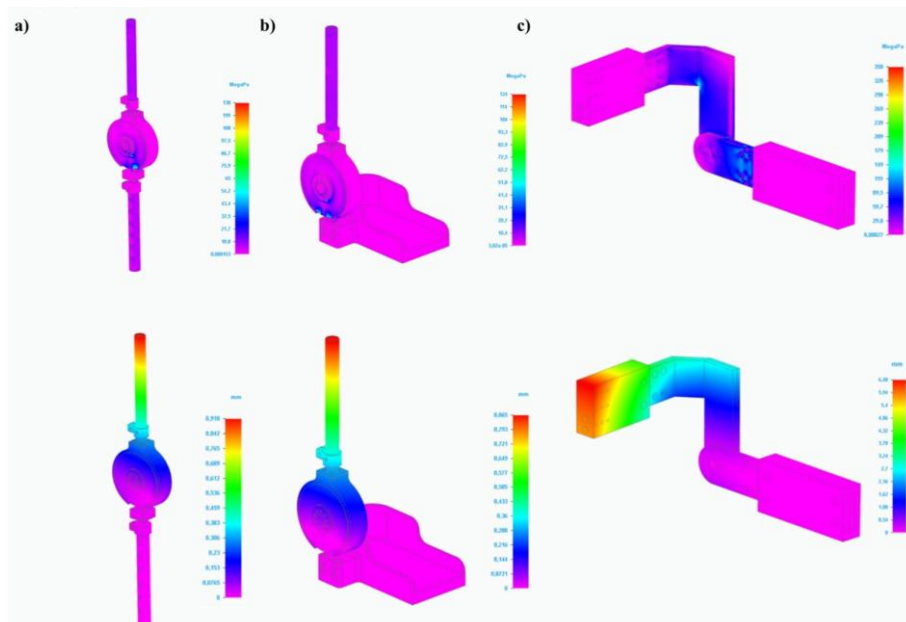
2.4. ANÁLISE ESTÁTICA ESTRUTURAL DO EXOESQUELETO

Após a conclusão da modelagem 3D do ExoRoboWalker, foi realizada uma análise estática estrutural com o objetivo de verificar a resistência mecânica da nova configuração proposta. Essa etapa é fundamental para assegurar que o exoesqueleto suporte as cargas previstas durante o uso, evitando deformações excessivas ou falhas nos componentes. A análise foi conduzida por meio do método dos elementos finitos (FEA), utilizando o módulo de simulação do software Solid Edge.

Considerando que o sistema apresenta simetria entre os lados direito e esquerdo, a simulação foi realizada apenas em um dos lados, simplificando o problema sem comprometer a precisão dos resultados. Três subconjuntos foram analisados de forma independente: o conjunto coxa/joelho, o conjunto perna/tornozelo e a estrutura do suporte lombar. Em todos os casos, aplicou-se uma carga equivalente ao peso corporal máximo estimado de 120 kg, com restrições fixas nas extremidades dos componentes. O material adotado para todas as partes estruturais foi o alumínio 7075-T6, devido à sua elevada resistência mecânica e baixa densidade.

Os resultados mostraram que as tensões máximas obtidas nas três regiões analisadas permanecem abaixo do limite de escoamento do material, assegurando a integridade estrutural do sistema. As deformações apresentaram valores reduzidos, inferiores a 1 mm nas juntas e limitadas a 6,5 mm na região do suporte lombar, não comprometendo a funcionalidade do conjunto. Dessa forma, a estrutura projetada demonstrou comportamento satisfatório frente às cargas simuladas, validando o modelo mecânico para a etapa de fabricação dos componentes descrita na próxima seção. A Figura 3 apresenta os resultados da análise dos componentes.

Figura 3 – Análise estática estrutural do ExoRoboWalker



Fonte: Produção do próprio autor.

2.5. FABRICAÇÃO MECÂNICA DOS COMPONENTES DO EXOESQUELETO

Após a etapa de validação estrutural, procedeu-se à fabricação dos principais componentes mecânicos do ExoRoboWalker, com o objetivo de verificar o comportamento dimensional e funcional das peças desenhadas. As juntas do joelho e tornozelo, bem como o suporte lombar, foram os elementos fabricados neste princípio. O suporte lombar, pois a versão atual que existe no exoesqueleto não garante uma estabilidade do quadril quando o indivíduo está utilizando e as juntas do joelho e tornozelo por serem as juntas que mais apresentam o travamento quando em operação.

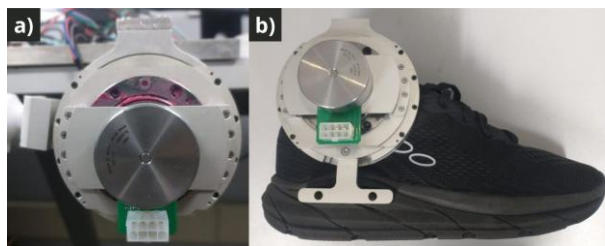
Os componentes foram fabricados a partir de modelos tridimensionais desenvolvidos. As peças foram fabricadas de modo a garantir conformidade dimensional e o bom acoplamento entre os elementos móveis. Após a conclusão do processo de fabricação, foi realizada a montagem preliminar dos conjuntos, com o objetivo de avaliar o alinhamento, encaixe e a interação entre os componentes. As Figuras 4 e 5 apresentam, as peças fabricadas do suporte lombar, da junta do joelho e da junta do tornozelo. Esses componentes servirão de base para a integração dos sistemas de controle e realização dos testes experimentais em bancada, apresentados na próxima etapa deste trabalho.

Figura 4 – Visualização do suporte lombar após o processo de fabricação e ajuste no usuário



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5 – Juntas fabricadas do ExoRoboWalker: a) Junta do joelho, b) Junta do tornozelo

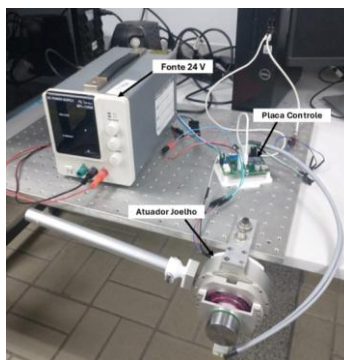


Fonte: Produção do próprio autor.

2.6. BANCADA EXPERIMENTAL E PERSPECTIVAS DE VALIDAÇÃO

Após a fabricação e montagem dos componentes mecânicos do ExoRoboWalker, foi construída uma bancada experimental para a validação inicial das juntas motorizadas do joelho e tornozelo. Essa estrutura tem como objetivo permitir a realização de testes de controle e análise de desempenho dos atuadores, antes da integração completa ao exoesqueleto. A Figura 6 apresenta a bancada montada, com os seus principais componentes: motor Maxon EC 45 Flat, redutor harmônico CSD-20-160-2A, placa de controle, fonte de alimentação de 24 V.

Figura 6 – Bancada utilizada para os testes iniciais de controle e validação das juntas motorizadas

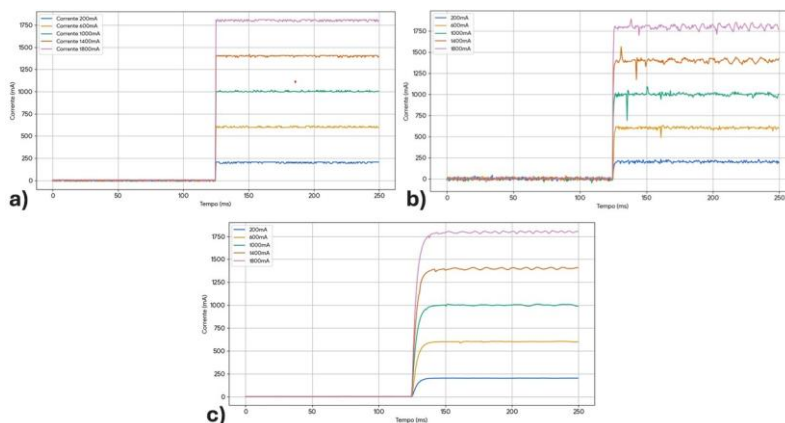


Fonte: Produção do próprio autor.

A bancada foi pensada para possibilitar testes em diferentes condições de operação. Em um primeiro conjunto de experimentos, foram avaliadas a resposta dinâmica e a estabilidade do controlador de corrente implementado. A Figura 7 apresenta os resultados experimentais obtidos, correspondentes à resposta do sistema para diferentes degraus de referência de corrente.

Os resultados indicam que o controlador apresentou boa estabilidade e tempo de resposta reduzido e ausência de oscilações significativas. Esse comportamento confirma a eficiência do controle de corrente implementado, o que é fundamental para a aplicação posterior do controle de torque por exemplo.

Figura 7 – Resultados experimentais do controle de corrente: a) Resposta do sistema a degraus de referência de 200, 600, 1000, 1400 e 1800 mA, b) Corrente medida no atuador em resposta aos comandos aplicados, c) Corrente média do sistema durante os testes de controle



Fonte: Produção do próprio autor

Como perspectivas futuras, está prevista a realização de testes de validação sob carga mecânica, com o objetivo de caracterizar o desempenho do sistema com esforços externos, avaliação do torque e se a inclusão da mola ao sistema consegue evitar o travamento da junta. Esses experimentos contribuirão para consolidar a etapa de validação funcional das juntas do joelho e tornozelo, que são os principais elementos responsáveis pela estabilidade e pelo movimento controlado do exoesqueleto durante a marcha assistida.

3. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação inicial das principais etapas do projeto mecânico de uma nova versão para o exoesqueleto ExoRoboWalker. Foram concebidas versões atualizadas das juntas do joelho e tornozelo, bem como do suporte lombar, buscando melhorar a robustez e a adaptabilidade estrutural do sistema. As análises estáticas realizadas confirmaram a resistência adequada dos componentes frente às cargas simuladas, permitindo o avanço para a etapa de fabricação e montagem dos protótipos.

A construção e a montagem das peças permitiram validar o processo de manufatura e garantir a precisão dimensional necessária para a montagem dos atuadores. Além disso, foi montada uma bancada experimental para os primeiros testes de controle de corrente, cujos resultados demonstraram comportamento estável.

4. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Rafael M.; SAPIENZA, Stefano; BONATO, Paolo. Development of a “transparent operation mode” for a lower-limb exoskeleton designed for children with cerebral palsy. In: 2019 IEEE 16th international conference on rehabilitation robotics (ICORR). IEEE, 2019. p. 512-517.
- ANDRADE, Rafael M. et al. Trajectory tracking impedance controller in 6-DoF lower-limb exoskeleton for over-ground walking training: Preliminary results. In: 2021 international symposium on medical robotics (ISMR). IEEE, 2021. p. 1-6.
- ANDRADE, Rafael M.; BONATO, Paolo. The role played by mass, friction, and inertia on the driving torques of lower-limb gait training exoskeletons. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, v. 3, n. 1, p. 125-136, 2021.
- ANDRADE, Rafael M. et al. Overground walking with a transparent exoskeleton shows changes in spatiotemporal gait parameters. *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*, v. 12, p. 182-193, 2023.
- ANDRADE, Rafael M. et al. Experimental evaluation of a transparent operation mode for a lower-limb exoskeleton designed for children with cerebral palsy. In: 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023. p. 6062-6067.
- BARKATAKI, R.; KALITA, Z.; KIRTANIA, S. Anthropomorphic design and control of a polycentric knee exoskeleton for improved lower limb assistance. *Intelligent Service Robotics*, v. 17, n. 3, p. 555-577, 2024.
- BAYON, Cristina et al. Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy: CPWalker. *Robotics and autonomous systems*, v. 91, p. 101-114, 2017.
- BORGGRAEFE, Ingo et al. Robotic-assisted treadmill therapy improves walking and standing performance in children and adolescents with cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*, [S.l.], v. 14, n. 6, p. 496-502, 2010.
- DE ANDRADE, Rafael Milanezi et al. An Adaptive Oscillators-Based Approach to Achieve Transparent Control of a Six DoF Lower-Limb Exoskeleton. In: 2024 20th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2024. p. 1-6.
- DÍAZ, Iñaki; GIL, Jorge Juan; SÁNCHEZ, Emilio. Lower-limb robotic rehabilitation: Literature review and challenges. *Journal of Robotics*, v. 2011, n. 1, p. 759764, 2011.
- EGUREN, David et al. Design of a customizable, modular pediatric exoskeleton for rehabilitation and mobility. In: 2019 IEEE international conference on systems, man and cybernetics (SMC). IEEE, 2019. p. 2411-2416.
- JIN, Li Hua et al. The effect of robot-assisted gait training on locomotor function and functional capability for daily activities in children with cerebral palsy: a single-blinded, randomized cross-over trial. *Brain sciences*, v. 10, n. 11, p. 801, 2020.
- MUTLU, Akmer; KROSSCHELL, Kristin; SPIRA, Deborah Gaebler. Treadmill training with partial body-weight support in children with cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, [S.l.], v. 51, n. 4, p. 268-275, 2009.
- RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, Antonio; LOBO-PRAT, Joan; FONT-LLAGUNES, Josep M. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, [S.l.], v. 18, n. 1, p. 22, 2021.

ZHANG, Yang et al. Mechanical design of an exoskeleton with joint-aligning mechanism for children with cerebral palsy. In: 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). IEEE, 2020. p. 106-111.

WINTER, David A. Biomechanics and motor control of human movement. John wiley & sons, 2009.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro que tornou possível este trabalho. O presente trabalho foi apoiado em parte por doações da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, código financeiro 001), FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, TO: 946/2023, No. 2023-F0GWQ, TO: 565/2023, No.2023-BQK22), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos com recursos do FNDCT ref 2784/20), projeto 402317/2023-8 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e projeto 442445/2023-7. Ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.