

# **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA MECÂNICA DE UM EXOESQUELETO**

Ítalo Gabriel Barros Bologna <sup>1</sup>; Alessandra Dutra Coelho <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este projeto consiste no desenvolvimento mecatrônico de um exoesqueleto para pessoas sem mobilidade da cintura para baixo, sendo realizado de forma a abranger como ele será ativado, o controle dos atuadores com um microcontrolador, sensores e drivers de potência e o projeto mecânico.*

*Ele foi dividido em duas partes, sendo a primeira: o estudo das estruturas de exoesqueletos existentes, a fim de realizar uma análise sobre os métodos utilizados em suas construções, tais como atuadores, materiais, e fontes de energia; e a segunda na construção de um protótipo em escala de um exoesqueleto para fins de reabilitação. Uma vez com os dados da primeira etapa adquiridos inicia-se o projeto baseado em outros projetos comerciais, com o objetivo de criar um segmento de pesquisa na área de biomédica em reabilitação.*

*O projeto será realizado com 6 graus de liberdade, sendo quatro ativos, desta forma a mobilidade é muito boa e o grau de complexidade do trabalho é razoável.*

*Foi escolhido realizar o projeto de um protótipo em escala devido aos altos custos dos materiais, sendo que a construção definitiva poderia custar mais de 10 vezes o valor do protótipo.*

## **Introdução**

Existem milhares de pessoas no mundo com deficiência no caminhar, que necessitam de ajuda diariamente para executar ações consideradas normais do dia a dia. Este fato, além de causar uma dependência do deficiente de outras pessoas, que segundo pesquisas, aumentam as chances de depressão ou morbidez, ainda pode causar problemas de saúde, tais como: diminuição da massa muscular, diminuição da capacidade aeróbica, infecção urinária, osteoporose, disfunção renal e doenças cardíacas; já que a movimentação nos membros inferiores é muito reduzida ou nula, estes fatores combinados causam uma grande redução na expectativa de vida. A primeira solução, para que sejam evitados estes problemas é a fisioterapia, que ajuda muito a prevenir estas doenças, porém não dá ao paciente a mobilidade de uma pessoa normal.

O início dos estudos com deficientes e lesões começou como consequência das grandes guerras mundiais devido aos grandes números de mutilados. Neste momento começaram a surgir o conceito de próteses que tem como objetivo suprir membros perdidos.

Atualmente existem diversas pesquisas com a finalidade de desenvolver um exoesqueleto, estrutura externa ao corpo que seja resistente e flexível, que aumente as capacidades do ser humano, para que, com menos esforço que o normal, uma pessoa possa carregar um peso que outra pessoa normal não consiga. Também existem algumas pesquisas, como neste projeto, com a finalidade de desenvolver um exoesqueleto que melhore a qualidade de vida de uma pessoa que não tem os movimentos dos membros inferiores. Esta área de pesquisa denomina-se engenharia de reabilitação, e dentro deste contexto visa trazer independência a estas pessoas, baseando-se na utilização de equipamentos mecânicos e eletrônicos para a reabilitação de pacientes com deficiências motoras nos membros inferiores.

O Objetivo desse trabalho é desenvolver um projeto mecatrônico, e construir um protótipo em escala de um exoesqueleto com finalidade de reabilitação para paraplégicos, ou

seja, dar ou ajudar a movimentação dos membros inferiores. Devido a este foco, o projeto terá características de forças e velocidades semelhantes às de uma pessoa normal.

Este projeto tem como objetivo dar a independência de volta a estas pessoas, tendo capacidade de dar movimentação suficiente para que mesmo uma pessoa sem movimentação nas pernas consiga: caminhar, subir e descer escadas, sentar e levantar sem ajuda de terceiros. Desta forma, previnem-se várias doenças como citado anteriormente.

O projeto consiste em ter 6 graus de liberdade, sendo estas as articulações do quadril e do joelho de cada perna, controlados por atuadores do tipo moto-redutores, e do tornozelo, que será uma articulação passiva.

A utilização da robótica para fins de reabilitação cresceu muito nos últimos anos, principalmente devido aos benefícios comprovados de exercícios a membros não utilizados. Também nos últimos anos vários centros de pesquisas desenvolveram exoesqueletos com funcionalidades e características muito interessantes.

Um grande projeto desta área, e considerado um dos melhores atualmente, é o HAL (Hybrid Assistive Limb, figura 1) desenvolvido pela universidade de Tsukuba que pode oferecer suporte apenas aos membros inferiores ou para todo o corpo. Ele tem a finalidade de complementar ou expandir a força física do usuário através de motores de corrente contínua acoplados a redutores. Uma de suas características interessantes é o funcionamento com dois sistemas de controle, um deles é capaz de captar pequenos sinais que são mandados do cérebro para os músculos e baseado no sinal obtido os atuadores são movidos juntamente com o músculo do indivíduo. O segundo sistema é autônomo, e gera uma sequência de movimentos assistidos baseados num sistema robótico que trabalha em conjunto com o primeiro sistema de controle.



Figura 1 – Exoesqueleto de força e suporte.

A universidade de Vanderbilt, nos Estados Unidos, desenvolveu o projeto do exoesqueleto Indego (figura 2), que realiza todas as suas funções apenas com o comando de inclinar o tronco, desta forma sistema reconhece a ação desejada e traduz para os atuadores. Seu grande diferencial está em seu tamanho e peso, tendo apenas 12.25 kg, é aproximadamente 50% mais leve que os outros projetos do mesmo segmento e permite ser desmontado, cabendo em uma mochila. O objetivo é que o usuário o carregue em sua cadeira de rodas, monte-o, equipe-o e ande, tudo independentemente. Este projeto também tem dois potenciais sistemas, um que ajusta a assistência robótica aos músculos automaticamente, e outro que enquanto o usuário anda provê estímulos elétricos nos músculos, impedindo seu atrofiamento, aumentando a circulação e a densidade óssea. O projeto está associado com a empresa Parker e promete ser comercializado em 2014, sendo valor estimado entre 50.000 a 75.000 dólares.



Figura 2 – Exoesqueleto Indego.

## Materiais e Métodos

Neste projeto foram adotadas características presentes na maioria dos projetos atuais, como a utilização de motores elétricos como atuadores, e a presença de quatro atuadores, sendo dois nos quadris e dois nos joelhos.

Nos estudos do movimento do caminhar o movimento da marcha foi dividido em duas fases: apoio e balanço. A primeira correspondente a todos os instantes em que o pé atinge o chão até o momento em que ele perde o contato, aproximadamente 62% da marcha, e a segunda aos instantes que o pé não tem contato com o chão, correspondente a 38% da marcha.

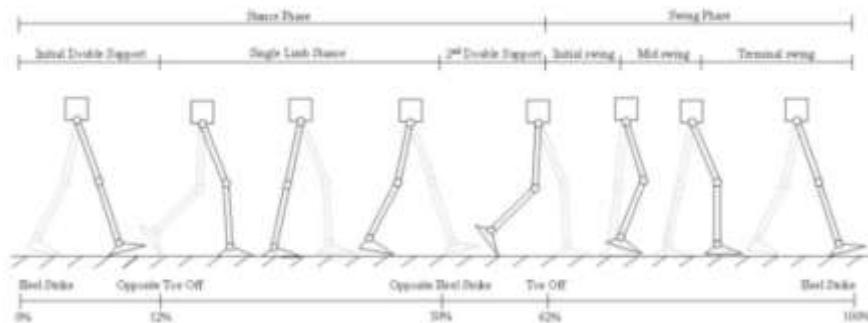


Figura 3 – Etapas da marcha, Dollar e Herr (2007).

Estas fases são importantes para definirmos as posições, velocidades e momentos exercidos pelos atuadores. No caso deste projeto, o mais importante é a posição, já que o sistema de controle adotado se encarregará de gerar as forças necessárias e consequentemente a velocidade para a execução do movimento.

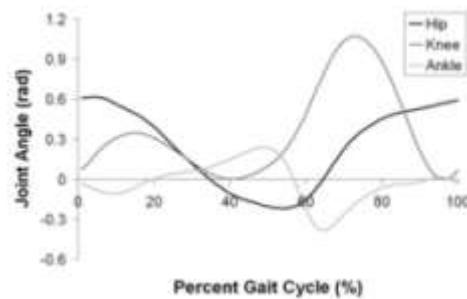


Figura 4 – Ângulos das juntas na marcha, Dollar e Herr (2007).

Este gráfico foi utilizado como parâmetro para o projeto, porém para que possamos traduzir o gráfico para o microcontrolador e consequentemente para os atuadores, foi utilizado o software McLabEn. Este software realiza uma leitura do gráfico a partir de um ponto inicial e um final desde que não tenham o mesmo valor no eixo y, gerando vários pontos de

coordenadas x e y que foram salvos em forma de vetor no microcontrolador. Para poderem ser devidamente utilizados foi implementado um sistema na programação em que a cada certo período de tempo o microcontrolador avança um índice em sua contagem, desta forma os atuadores em certo instante têm uma referência - elemento no vetor correspondente ao ângulo da junta naquele instante da caminhada - a ser seguida, após algum tempo (em torno de alguns milissegundos) com o avanço do índice, a referência se torna o próximo elemento do vetor, que é o ângulo da junta referente ao próximo instante da caminhada.

### Atuadores

A escolha dos atuadores é de suma importância para o projeto, pois estes serão responsáveis pela movimentação de toda a estrutura. Como dito anteriormente serão utilizados motores elétricos, eles possuem baixa capacidade de carga (característica que pode ser contornada), alta eficiência energética, controle relativamente fácil, são silenciosos e de custo baixo, fatores que o tornam o mais utilizado em qualquer sistema que exija controle, como neste projeto.

De acordo com estudos referentes ao assunto são necessários momentos superiores a 50N.m no movimento de caminhar, uma força muito grande que é obtida apenas em motores de grande porte, que nos leva ao problema de tamanho do atuador. Os motores com maior relação carga/volume são motores do tipo frameless, ou também conhecidos como direct drive, neste caso seu volume é reduzido, pois sua montagem é realizada diretamente no eixo do sistema. Apesar de sua excelente relação carga/volume, para que sejam atingidos os torques correspondentes, ainda será necessário um motor de dimensões muito grandes. Como dito anteriormente este problema pode ser contornado, ao acoplar um redutor ao motor elétrico temos a sua rotação dividida por um fator, porém seu torque também é multiplicado por este mesmo fator.

### Sensores

O sensoriamento é necessário neste projeto para que haja uma medição dos ângulos das articulações e realizar seu controle. A aquisição destes dados ocorreu por meio de um encoder rotativo, sensor eletromecânico capaz de gerar pulsos elétricos a partir da rotação de seu eixo e enviar ao microcontrolador que conta estes pulsos e compreende a posição atual do mecanismo. Foram escolhidos encoders rotativos devido a sua fácil implementação. Também serão utilizados sensores de distância para verificação de obstáculos a frente do usuário, foram escolhidos sensores ultrassônicos que tem boa precisão, baixo custo e de também fácil implementação.

### Controle

O controle do sistema será realizado com uma pequena placa de controle, contendo um joystick e botões. As informações desta placa serão enviadas ao microcontrolador para que sejam exercidas as ações nos atuadores. Sendo uma placa pequena, pode ser fixado na muleta que ajudará no equilíbrio do usuário, estando desta forma, perto da mão do usuário.

No protótipo, o acionamento será realizado através de um controle ligado diretamente ao computador, desta forma há um melhor controle de informações, facilitando observar as ações que devem ser realizadas e o que foi realmente realizado. Para a comunicação entre o controle e o microprocessador foi utilizado o software Processing, que é capaz de ler as informações do controle recebidas via USB e mandar via serial para outra porta USB em que está o microprocessador.

### Microcontrolador

O microcontrolador é uma das peças mais importantes do sistema responsável por todo o gerenciamento de dados e controle dos atuadores, conforme exibido abaixo (figura 2), todos os dados passam pelo microcontrolador.

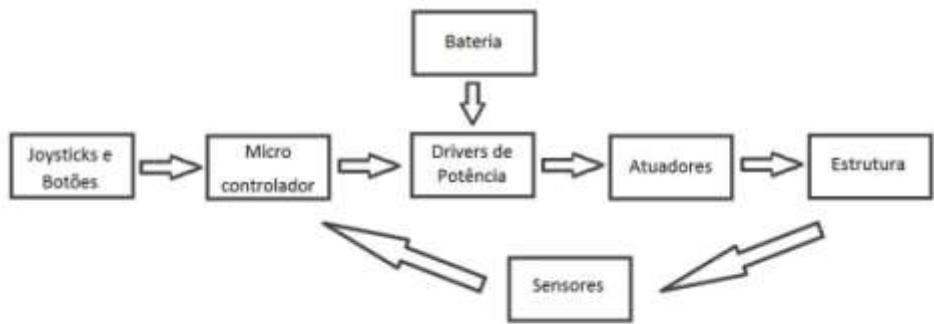


Figura 5 – Concepção da malha de controle.

O microcontrolador escolhido foi o Atmega2560. As principais características que levaram a escolha deste microcontrolador foram: a quantidade de entradas e saídas, o número de entrada com interrupções, que são necessárias para a utilização dos encoders, e saídas com sinal de PWM, o seu tamanho e peso reduzidos, e principalmente sua facilidade de programação juntamente ao seu software próprio que utiliza uma linguagem parecida com C.

Foi implementado um sistema de controle com realimentação do tipo PID, que realiza cálculos a partir do erro (diferença entre o estado atual do sistema e onde ele deveria estar) para gerar um esforço de controle. Este controle possui uma funcionalidade muito boa com o ajuste certo.

### Drivers de potência

Entre o microprocessador e os motores deve haver drivers de potência, já que em uma conexão direta, a corrente fornecida pelo microprocessador não é suficiente para o funcionamento dos motores, para o protótipo foram utilizadas pequenas placas contendo o circuito integrado L298.

Seu funcionamento acontece através de uma ponte H constituída de transistores ativados com um pequeno estímulo na sua entrada base, assim liberando o fluxo de corrente entre o coletor e emissor, alimentando o motor. Sua utilização é obrigatória para alimentação dos motores, e seu volume e peso são muito pequenos, interferindo pouco no conjunto. No projeto também serão utilizados drivers de potência, porém de maior capacidade.

### Estrutura

A estrutura do sistema terá a função de sustentar o peso do usuário juntamente com o peso da própria estrutura que será significante quando completo e ao mesmo tempo serem leves para que sua interferência no usuário seja mínima e a mais compacta possível para que sejam menos incômodas, e mais discretas.

Para que todos estes requisitos sejam atendidos, a escolha do material é crucial. O mais indicado é a fibra de carbono que tem a melhor relação resistência/peso, porém seu valor é muito alto e fabricação muito difícil. Para resolver este problema foi utilizada uma liga de alumínio em peças com geometrias complexas. Como seu processo de fabricação é semelhante ao dos aços, pode ser realizado em máquinas convencionais, com a vantagem de o seu peso específico ser aproximadamente um terço do peso específico do aço.

## Resultados e Discussão

Devido á questões de tempo foram realizadas apenas montagens do protótipo simplificado da estrutura que está em processo de fabricação. Esta estrutura inicial já permitiu o teste do sistema de controle referente a uma perna.

Um dos maiores problemas enfrentados na parte de software/hardware foi a comunicação entre dois dispositivos. Muitas vezes os dispositivos estavam em fases diferentes, assim quando um tentava mandar informações, o outro não estava pronto para

recebê-las e a informação chegava completamente distorcida. Para resolver este problema foi a criado de um protocolo de comunicação, desta forma o emissor apenas enviará a informação quando o receptor estiver pronto para recebê-la.

Durante alguns testes foi observado um problema no processamento simultâneo da comunicação serial e do controle do motor. Quando estas duas ações eram executadas ao mesmo tempo o processador não conseguia atender a velocidade necessária para realizar o controle do motor de forma precisa.

Nos testes finais o resultado obtido foi um movimento não antropomórfico, ainda com algumas oscilações, porém completamente capaz de proporcionar um caminhar, ou ações de sentar, levantar, subir e descer escadas.

Como foi citado anteriormente, o projeto mecânico ainda está em processo de fabricação, porém pode ser visualizado através do software CAD SolidWorks (figura 3).



Figura 6 – Montagem completa do exoesqueleto.

As peças de sustentação (apoio das costas, hastas da coxa e do joelho, e estrutura do pé) serão fabricadas de fibra de carbono a partir de moldes, proporcionando maior resistência e diminuindo o peso total da estrutura. Uma das preocupações para estas peças é a utilização da mesma peça para uma faixa grande de peso do usuário, para isto existem algumas regulagens capazes de serem ajustadas para que exista a fixação correta ao usuário sem folgas ou desconforto. No quadril a peça de apoio será complementada por elásticos que atuarão como cintos fixando o corpo do usuário à estrutura. A haste deve conter vários furos na região de ligação com o suporte do motor para que possa ser realizado um ajuste fino de comprimento entre as duas articulações.

As peças das articulações tem um formato mais complexo, por isso são usinadas em alumínio. Também foram elaborados alguns mecanismos especiais, no caso das articulações do joelho e do quadril foi desenvolvido um sistema que impede a movimentação dos membros para um ângulo que um ser humano não consiga exercer. Para isso a peça foi usinada de forma que ao chegar a um ângulo extremo aconteça o contato de duas superfícies, impedindo uma maior abertura, como pode ser visto na imagem abaixo (figura 4).

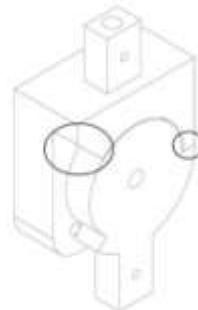


Figura 7 – Desenho da articulação do joelho com destaque as limitações de ângulo.

Também podemos observar nesta figura outro mecanismo implementado para situações em que o usuário está de pé, porém ficará algum tempo sem movimento, neste caso

ele aciona alguns pinos que travarão o sistema, desta forma não é necessária energia nos motores, economizando-se bateria.

Também há um sistema na estrutura do pé em que será utilizado um polímero com características elásticas ao invés de um atuador elétrico, este terá a função no movimento de caminhar, de armazenar energia na fase de apoio médio, e liberar a energia na forma de impulso na fase de retirada de sustentação.

Em toda a estrutura as peças são facilmente desmontáveis, de forma que possam ser montadas ou desmontadas em alguns minutos. Como foi dito anteriormente ela procura abranger uma faixa de tamanhos, porém caso o usuário esteja fora desta faixa a estrutura pode ser facilmente adequada com a troca das hastes, que tem geometria relativamente simples e ligações entre articulações feitas com parafusos que podem ser removidos.

O sensoriamento foi em geral razoável e a utilização de encoders se mostrou promissora, porém a baixa resolução do utilizado acabou gerando problemas no controle. Este foi resolvido criando-se uma zona morta, assim erros pequenos na leitura dos ângulos não geram tensão no motor, porém a mudança de referência gera um erro grande e o sistema opera normalmente.

Deverão ser utilizados sensores de distância na estrutura do pé, para que não ocorra um erro de operação como o usuário mandar a estrutura caminhar quando há um obstáculo a sua frente. Estes testes não puderam ser realizados até o momento uma vez que a estrutura não terminou de ser confeccionada.

## Conclusões

Este trabalho consistiu no desenvolvimento mecatrônico de um exoesqueleto robótico para membros inferiores aplicado a pessoas com paraplegia, ou seja, que ainda tenham os movimentos dos membros superiores, foram analisados os materiais constituintes do projeto e viabilidade do projeto como conjunto.

O sistema eletrônico atendeu as solicitações de interpretar os comandos do usuário, gerar os ângulos de referência e controlar os atuadores. Não foi possível obter testes melhores devido à limitação de capacidade de processamento para a comunicação em serial, sendo necessária a aplicação de outra técnica na coleta de dados, como por exemplo, a cinemetria, técnica é utilizada para a validação de dados baseando-se na aquisição de imagens para a obtenção de variáveis cinematográficas.

Foi desenvolvido um protótipo completo em escala 1:2 de forma que a estrutura desenvolvida realize os movimentos de caminhar, sentar, levantar, subir e descer escadas de forma semelhante aos padrões humanos, desta forma foi possível observar as limitações e possíveis correções para uma próxima montagem.

Desta forma o projeto se mostrou viável para construção em tamanho real, podendo ser uma estrutura capaz de realizar movimentos básicos do cotidiano, sendo leve, compacta e com um custo menor aos já encontrados atualmente. Algumas limitações foram reconhecidas neste projeto, como restrições de movimentos, como a dificuldade para realizar curvas durante uma caminhada, o que exigiria um trabalho manual do usuário com ajuda da muleta. Isto ocorre devido ao número de graus de liberdade do projeto ser muito inferior ao número de graus de liberdade de uma perna funcional. Este problema é muito discutido, pois, aumentando o número de graus de liberdade o projeto se torna mais antropomórfico, e consequentemente permitindo um número maior de ações, porém a implementação de cada grau de liberdade a mais aumenta a complexidade e o custo do projeto.

## Referências Bibliográficas

- WINTER, D. A. (2004) *Biomechanics and motor control of human movement*. 3<sup>rd</sup> ed. 2004, Editora Wiley.
- DOLLAR, A. M.; HERR, H.; (2007). *Active orthoses for lower-limbs: Challenges and state of the art* Proceedings of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics
- DOLLAR, A. M.; HERR, H.; (2008). *Lower Extremity Exoskeleton and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art*. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, no 1, 2008
- ARAÚJO, M. V.; *Desenvolvimento de Uma Órtese Ativa para os Membros Inferiores Com Sistema Eletrônico Embarcado*. 2010. 98 f. Dissertação (Mestre em Ciências). UFRN. Rio Grande do Norte. 2010.
- SANTOS, D. P.; *Projeto Mecânico de Exoesqueleto Robótico para Membros Inferiores*. 2011. 138 f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.
- MORGADO JUNIOR, F. D'A.; *Modelagem e Controle de Músculo Pneumático*. 2011. 80 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2011.
- JARDIM, B.; *Atuadores Elásticos em Série plicados no Desenvolvimento de um Exoesqueleto Para Membros Inferiores*. 2009. 102 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2009.
- DÍAZ, E. Y. V.; *Implementação dos Sistemas Diferencialmente Planos para o Controle de um Manipulador Robótico tipo Braço Humano*. 2010. 166 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.
- VALIENTE, A.; *Design of a Quasi-Passive Parallel Leg Exoskeleton to Augment Load Carrying For Walking*. 2005. 114 f. Dissertação (Mestre em Ciência). Massachusetts Institute of Technology. 2005.