

EXOESQUELETO COM ATUADOR BIOCINÉTICO PARA REHABILITAÇÃO DE MOVIMENTOS DAS MÃOS

Pedro Henrique Marquez Machado – pedrohenmarquez@hotmail.com

Amilton da Costa Lamas – amilton@puc-campinas.edu.br

Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC-Campinas

Rua Prof. Euryclides de Jesus Zerbini, 1516

13087 – Campinas – São Paulo

Resumo: *A perda de funcionalidades da mão humana resulta num comprometimento severo na capacidade de alimentação e cuidados pessoais, limitando a participação no trabalho e na vida social e familiar, portanto métodos e sistemas de recuperação funcional são muito importantes. Este artigo trata do desenvolvimento de uma prova de conceito composta por exoesqueleto para mãos humanas, não rígido, com sustentação estrutural dada pelas próprias mãos, por um sistema de controle e programação que permite a operação nos modos espelho, exercício e programado. O desenvolvimento da prova de conceito segue o Modelo de Apropriação de Resultados e o Modelo de Desenvolvimento de Prova de Conceito tradicionalmente aplicados em alguns projetos de extensão da PUC-Campinas. O exoesqueleto desenvolvido se utiliza de atuadores biocinéticos pneumáticos para inflar e desinflar bexigas de silicone especial que estimulam os movimentos dos dedos do paciente. A prova de conceito mostrou-se operável, com segurança, até a distância de 20m entre as luvas e o sistema de controle. O sistema de controle permite a análise dos exercícios aplicados contribuindo para o estudo do desenvolvimento morto dos pacientes. A prova de conceito foi demonstrada na THERAPIES, um Centro de Reabilitação Intensiva situado em Campinas*

Palavras-chave: *Exoesqueleto. Paralisia cerebral. Recuperação de mão humana.*

1 INTRODUÇÃO

O fortalecimento do vínculo ensino-extensão sempre foi tema de atenção para as universidades brasileiras. Nos últimos anos a várias instituições ensaiaram e até implementaram programas conjuntos para atender às diretrizes federais estabelecidas na Constituição Federal Brasileira de 1988. Uma descrição mais detalhada destes esforços se encontra no trabalho “Estabelecendo o Vínculo Ensino Extensão” apresentado no XIV Congresso Latino-americano del Caribe de Extensión Universitaria ULEU realizado em junho de 2017 na Nicarágua (LAMAS, 2017a).

A Pró-Reitoria de Extensão e Assuntos Comunitários da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PROEXT PUC-Campinas) reconhecendo a extensão como atividade-fim da Universidade, segue os princípios da articulação das ações entre a universidade e a sociedade, atuando de forma interativa, estimulando processos diretos de troca de saberes popular e acadêmico. Neste sentido a PROEXT decidiu, recentemente, pela criação de grupo de alunos

voluntários de extensão (GAVE) como meio de ampliar a participação de um número maior de estudantes nos projetos de extensão da PUC-Campinas. Esta participação permite uma formação mais ampla do discente, melhor preparando-o para os desafios do mercado de trabalho (LAMAS, 2017b). Esta convivência com os desafios da extensão provoca a sensibilização dos alunos para as questões sociais abordadas nos diferentes projetos, como resultado vários trabalhos de conclusão de curso na PUC-Campinas tiveram um viés de engenharia social (FREITAS, 2017; RODRIGUES, 2018; LEMES NETO, 2018).

Nesta linha, o presente trabalho relata o desenvolvimento de um dispositivo robótico na forma de luva de auxílio a recuperação física das mãos de crianças com paralisia cerebral, realizado na disciplina Projeto Final da Faculdade de Engenharia Elétrica da PUC-Campinas. O sistema tem potencial de auxiliar o usuário na recuperação dos movimentos da mão humana parcialmente perdidos através de programação de exercícios regulares bem como via espelhamento entre luvas, constituindo uma arquitetura escravo (mão direita) - mestre (mão esquerda). No Modo Espelho a Luva Mestre detectará os movimentos de abertura e fechamento dos dedos e transmitirá para a Luva Escrava, onde repetirá os movimentos realizados pela luva mestre. No Modo Escravo somente a Luva Escrava irá ser utilizada, onde realizará séries de exercícios pré-programados.

Considerada o órgão motor mais importante do corpo humano, a mão do homem é responsável pela execução de tarefas complexas como o manuseio de objetos e o mapeamento tátil das características do ambiente. Pela sua alta capacidade de adaptação e eficiência e precisão na realização dos movimentos, a mão humana tornou-se um órgão essencial para a sobrevivência humana. A perda de funcionalidades resulta num comprometimento severo na capacidade de alimentação e cuidados pessoais, limitando a participação no trabalho e na vida social e familiar.

1.1 Anatomia da mão humana

A capacidade da mão em pegar diferentes tipos de objetos e ainda manter a suas funcionalidades básicas é resultante da existência de 27 ossos, 17 articulações e 19 músculos presentes. Este conjunto de elementos resulta num sistema de 23 graus de liberdade, dos quais cinco são para o polegar, quatro para cada um dos outros quatro dedos e dois para a palma da mão (BUNDHOOD, 2005). A estrutura esquelética da mão pode ser dividida em três grupos ósseos: 1) ossos carpais, são oito pequenos ossos interligados por ligamentos que constituem a parte do pulso; 2) ossos metacarpais, equivalentes à região intermediária da mão, também conhecida como palma da mão; e 3) falanges, que são os catorze ossos dos dedos, duas para o polegar e três para cada um dos outros dedos. Os movimentos da mão humana são controlados pelos músculos intrínsecos e pelos extrínsecos, ligados ao membro ao qual são responsáveis pelas movimentações por meio de tendões. Os músculos intrínsecos se originam de dentro da mão e são responsáveis pelos movimentos complexos e precisos, mas fracos. Para uma descrição completa da estrutura óssea e dos músculos associados consultar TORTORA, 2013.

1.2 Reabilitação física da mão

Existem várias razões para a perda ou redução de movimentos da mão, estas incluem paralisia (decorrente de lesões de nervos centrais ou periféricos), inchaços, queimaduras, rigidez nas juntas, etc. A recuperação, ainda que parcial, das limitações requer o emprego de terapias específicas durante longos períodos de tempo, exigindo a presença em centros de reabilitação física (HUNTER *et al*, 1995).

O principal objetivo da terapia é reduzir o prejuízo trazido pela lesão e recuperar o desempenho original através do aumento da amplitude dos movimentos, alívio de dores e redução da inflamação quando houver. Idealmente espera-se que o corpo se recupere por seus próprios meios. Na década de 90 estudos (DIMIK, 2002) demonstraram que a mobilização desde os primeiros tempos contribuía para a deposição adequada de colágeno. Consequentemente várias técnicas dinâmicas que auxiliam na recuperação dos movimentos foram desenvolvidas. A maioria destas técnicas de reabilitação da mão baseiam-se na execução de movimentos repetitivos de coordenação grossa e fina (DELISA, 2000). A técnica de Movimento Passivo Contínuo (CPM) apresentada por Salter (SALTER, 1996) tornou-se uma das mais usadas desde então. Ela consiste em submeter o órgão a movimentos repetitivos de forma passiva. Inicialmente CPM foi utilizada na reabilitação de juntas grandes, como joelhos e ombros. No caso de juntas menores somente recentemente este tipo de terapia passou a ser recomendada, isto porque apenas nos últimos anos a tecnologia alcançou o ponto adequado, devido a fineza dos movimentos necessários.

1.3 Dispositivos de reabilitação física

Os dispositivos de reabilitação para membros superiores tiveram um grande desenvolvimento nos últimos anos, mas a construção destes para que reproduza fielmente os movimentos da mão humana é muito complexa devido ao fato da mão ter 23 graus de liberdade. Estas características intrínsecas da mão levaram ao desenvolvimento de exoesqueletos robóticos como ferramenta para reabilitação nos casos de derrames, com potencial para uso em pessoas com deficiência motora devido a paralisia cerebral. Visto que exoesqueletos atuam em contato próximo com o usuário, qualquer disfunção pode causar danos significativos à pessoa, portanto é fundamental que os dispositivos tenham uma concepção estrutural que não force o usuário a executar movimentos não naturais. A principal preocupação na construção de exoesqueletos para as mãos diz respeito ao alinhamento dos centros de rotação. O uso de luvas macias tracionadas por atuadores pneumáticos mostrou-se muito promissor já que evita todos os problemas das estruturas rígidas e atende às necessidades de segurança (HEO, 2012; HONG KAI, 2017 e POLYGERINOS, 2015). Nestes casos, onde a estrutura flexível e sub-atuada é adotada, a mão do paciente provê a estrutura osteológica para o movimento do exoesqueleto.

2 PROVA DE CONCEITO DESENVOLVIDA

A prova de conceito aqui descrita consiste de duas luvas numa arquitetura mestre escravo com as seguintes características: a) Seleção do modo de execução – modo de repetição de exercícios ou o modo de espelhamento das luvas; b) Seleção de modo de operação – utilização ou não da Luva Mestre (mão esquerda), fazendo com que ela possa funcionar de forma paralela ou não com a Luva Escrava (mão direita); c) Seleção de armazenamento e dados – permitindo armazenar as informações de desempenho do modo exercício; d) Programação de exercícios – onde o operador define a sequência e duração dos exercícios; e e) Comunicação sem fio – permitindo mobilidade. Uma representação simplificada do sistema robótico é apresentada na Figura 1, abaixo.

2.1 Arquitetura do sistema

Luva Mestre

No modo espelho, a Luva Mestre tem como principal objetivo detectar os movimentos de abertura e fechamento dos dedos e transmitir essa informação para Luva Escrava. Sendo assim,

o microcontrolador será responsável por realizar a leitura periodicamente dos sensores de flexibilidade que estão acoplados em cada dedo. Ao detectar que estado se encontra cada dedo, o microcontrolador com o auxílio do módulo Bluetooth transmite essa informação para Luva Escrava.

Luva Escrava

A Luva Escrava, no caso de operação em modo espelho, terá como função receber os dados vindos da Luva Mestre e realizar o acionamento dos módulos. Com isso, os dedos irão se abrir ou fechar fazendo com o que usuário realize os movimentos desejados. Ao receber as informações da Luva Mestre, o microcontrolador realiza a interpretação da informação enviada e conseqüentemente os módulos serão acionados nas respectivas ordens: Microcontrolador aciona o módulo relé e conseqüentemente a bomba de ar é acionada e o atuadores biocinéticos serão inflados. Para se expelir o ar, o microcontrolador aciona as válvulas solenoides e a pressão do sistema retorna ao estado inicial.

O funcionamento para o Modo Exercício é o mesmo, porém a única diferença que o microcontrolador não precisa interpretar a informação enviada, pois o microcontrolador realizará os acionamentos dos módulos de forma pré-programada.

Figura 1 – Sistema robótico



2.2 Descrição de componentes

Sistema de Comunicação

O sistema de comunicação é baseado em tecnologia sem fio Bluetooth de baixo consumo de energia, que permite a transmissão de dados entre os dispositivos conectados a ele. Quando pareado, um dispositivo Bluetooth cria uma rede de transmissão chamada de *Personal Area Protocol* (PAN ou Piconet), onde determina um padrão de transmissão, utilizando os canais possíveis. Isto significa que os pacotes de dados serão transmitidos cada um em um canal diferente, numa ordem que apenas os dispositivos da rede Bluetooth conhecem. Ao se criar uma rede Piconet o dispositivo que iniciou a conexão assume o papel de mestre, enquanto os demais dispositivos se tornam “escravos”. Sendo assim, cabe ao dispositivo mestre a tarefa de sincronismo entre os dispositivos escravos e o controle da transmissão de dados.

Sistema Pneumático

O sistema pneumático funciona por meio da compressão de gases, que convertem em energia mecânica, movimentando eixos, pistões e etc. O ar comprimido é geralmente o mais utilizado, porém o nitrogênio e outros gases inertes também podem ser utilizados. O ar

normalmente é bombeado em um depósito com ajuda de um compressor, onde segura um grande volume de ar comprimido que será utilizado pelo sistema quando for necessário. O ar atmosférico contém diversas impurezas, por isso filtros e secadores de ar são necessários para mantê-los limpo e secos, o que aumenta a vida útil dos componentes e a confiabilidade do sistema. Uma das vantagens de se utilizar um sistema pneumático se comparado com motores elétricos é porque os motores elétricos geram calor contínuo, o que não é um problema em um sistema pneumático. Além disso os componentes pneumáticos não necessitam de uma grande demanda de energia elétrica para funcionarem, não tem a necessidade de investir em componentes volumosos, pesados e caros, o que é necessário em motores elétricos.

Sistema de Controle de Flexibilidade

O sistema de controle de flexibilidade é composto por sensores e atuadores biocinéticos que inflam e desinflam tubos de silicone, todos acoplados aos dedos da luva. Os sensores de flexibilidade convertem a mudança na curva para uma variação de resistência elétrica. O princípio de funcionamento do sensor de flexibilidade se baseia na variação da resistência conforme a variação de sua flexibilidade. O aumento da resistência ocorre, porque um lado do sensor é impresso com tinta de polímero que possui partículas condutoras embutidas nele. Quando o sensor está flexionado, as partículas condutoras se afastam, aumentando sua resistência. O sensor de flexibilidade utilizado neste trabalho é a versão sensor flex 2.2 que tem comprimento de aproximadamente de 5,5 centímetros, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Sensor de flexibilidade



O atuador biocinético é feito de silicone Ecoflex 00-30 (SMOOTH-ON, 2018), uma borracha muito suave, forte e elástica, que se estende muitas vezes o seu tamanho original sem rasgar e se recupera a sua forma original, sem distorção. A superfície será inflada muitas vezes, onde terá como função realizar o movimento de fechamento ou abertura do dedo. A Figura 3, abaixo, mostra o modelo de atuador biocinético desenvolvido.

Figura 3 – Modelo de atuador biocinético.



A bexiga interna do silicone age como um balão, que quando inflado ele se expande em todas as direções. Porém com uma base rígida é possível com que o silicone se expanda de forma uniforme, realizando assim o movimento desejado.

Sistema de Dados e Interface

O sistema de dados é baseado numa planilha Excel com o complemento de um software *Parallax Data Acquisition* (PLX-DAQ) disponível na rede internet de forma gratuita. A

planilha conta com as seguintes informações: hora, dia, mês, ano e qual a série de exercício realizada. A comunicação via serial conectada ao computador ou notebook e sincroniza a taxa de transmissão da placa do microcontrolador com a taxa de transmissão do software.

3 METODOLOGIA

O método de execução deste trabalho, realizado junto com as instituições parceiras, é sustentado em dois (02) pilares: 1) apropriação de resultados e 2) desenvolvimento de provas de conceito. A apropriação de resultados (conhecimentos e saberes) foi realizada aplicando o Modelo de Apropriação de Resultados (MAR). Este modelo, baseado num ciclo dialógico de compartilhamento de conhecimentos é descrito detalhadamente em no artigo “Sistema Autônomo para Travessia de Deficientes Visuais em Semáforos” de Mário Joaquim de Lemes Neto e Amilton da Costa Lamas (LEMES NETO, 2018). O objetivo do método é motivar a construção da autonomia dos sujeitos por meio da problematização, da socialização de saberes e da reflexão voltada para a ação. O desenvolvimento da prova de conceito seguiu o Modelo de Desenvolvimento de Prova de Conceito (MDPC), um modelo cíclico, inspirado no *Rational Unified Process* (RUP) (IBM, 2003) de desenvolvimento de soluções de software fundamentado em requisitos técnicos funcionais e não funcionais obtidos junto ao público alvo. O MDPC é descrito no mesmo artigo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos. Uma visão geral da Luva Mestre desenvolvida, como pode ser observada na Figura 4(a) e da Luva Escrava na Figura 4(b), apresentando a inserção do atuador biocinético em um dos dedos.



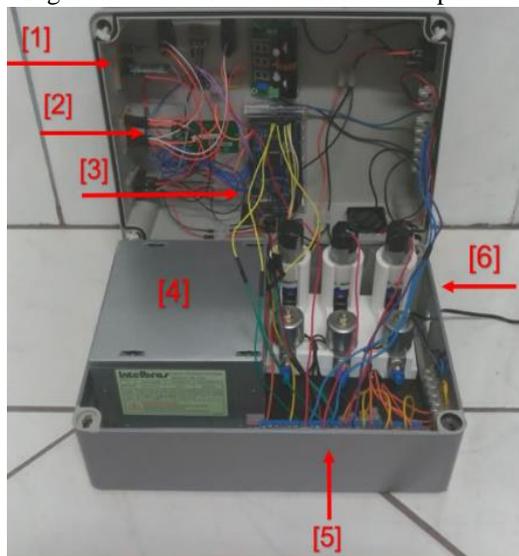
Nestas luvas, o sensor de flexibilidade indicou 30(1)k Ω sem dobra dos dedos e 70(1)k Ω com dedos dobrados em 90°. Apresentando funcionamento adequado para acompanhamento das flexões.

O Sistema Controle identifica qual o modo de operação que o usuário selecionou e executar os comandos necessários para que haja o funcionamento do sistema. Caso o modo espelho seja selecionado, os dados recebidos da luva mestre através da comunicação Bluetooth serão processados na CPU do microcontrolador e partir deles serão tomadas algumas decisões. Caso a decisão tomada seja o fechamento dos dedos, os relés e a bombas de ar serão acionadas e consequentemente os atuadores biocinéticos serão inflados. Caso deseje realizar o movimento de abertura do dedo, ocorrerá a abertura das válvulas solenoides e a pressão do sistema será restabelecida. No caso de abertura do dedo, o tempo de abertura da válvula estará diretamente relacionado com o tempo necessário para que a pressão do sistema se estabilize e ocorra o esvaziamento do silicone (expulsão do ar), simulando a abertura do dedo. A válvula utilizada

no projeto precisa ser energizada para sua abertura, caso não seja, se comportará como um sistema fechado. Caso o modo exercício seja selecionado, o usuário irá realizar duas séries de exercícios consecutivas, não sendo possível pausar ou voltar ao menu inicial, somente após o término da sequência o usuário pode mudar o modo de operação. O princípio de funcionamento do modo exercício baseia-se no acionamento das bombas de ar e válvulas solenoides em instantes de tempo diversos. O tempo de acionamento das válvulas solenoide e das bombas de ar é o mesmo para a o modo espelho. No modo exercício os acionamentos serão determinados via programação pré-estabelecida.

A Figura 5 apresenta o Sistema de Controle e as partes que o compõe: [1] - Módulo Bluetooth; [2] - LCD; [3] - Microcontrolador Arduino; [4] - Fonte de alimentação; [5] - Módulo Relé; [6] – Sistema Pneumático.

Figura 5 – Sistema de Controle e suas partes.



Na Figura 6 tem-se um exemplo do funcionamento do atuador biocinético

Figura 6 – Atuador biocinético.



REFERÊNCIAS

BUNDHOOD, Vishalini.; PARK, Edward Jung. Design of an artificial muscle actuated finger towards biomimetic prosthetic hands. **Proceedings** Conference International on Advanced Robotics. julho 18-25, 2005.

DELISA, Gans. **Tratado de Medicina de Reabilitação**, 3ª edição, vol. 2, São Paulo: editora Manole, 2000.

FREITAS, Daiane Eliene de *et al.* Projeto Final e Extensão - Compartilhando Estratégias e Resultados de Engenharia Elétrica, **Anais** do 45º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2017. Disponível em http://www.abenge.org.br/sis_artigos.php.

HEO, Pilwon *et al.* Current Hand Exoskeleton Technologies for Rehabilitation and Assistive Engineering. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Berlin, Germany, 2012.

HONG KAI, Yap. *et al.* Design and Characterization of Low-Cost Fabri-Based Flat Pneumatic Actuators for Soft Assistive Glove Application. **Proceedings** IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics, QEII Centre, London UK, 2017.

HUNTER, James M. *et al.* **Rehabilitation of the Hand: Surgery and Therapy**, 4th edition, CRC Press: Boca Raton, Flórida, EUA 1995.

IBM, 2003 - IBM RATIONAL SOFTWARE, Rational Software Corporation, uma divisão da IBM desde 2003. Disponível em:
<https://www-01.ibm.com/software/br/rational/>. Acesso em: 19 abril 2018.

LAMAS, Amilton da Costa. Estabelecendo o Vínculo Ensino-Extensão. **Anais** do XIV Congresso Latinoamericano de Extensión Universitaria ULEU y II Congreso Centroamericano de Vinculación Universidad Sociedad CSUCA, 2017a, Manágua, Nicarágua – Resumo disponível em:
https://issuu.com/uleuoficinasur/docs/ponencias_aprobadas_uleu, anais em edição.

LAMAS, Amilton da Costa; DOMINGUES, Anderson Gomes. Electrical Engineering Graduates and Extension Projects: A White Cane Collaborative Development Case Study, ICAEEdu 2017 **Proceedings** International Conference on Alive Engineering Education, pag. 19-20, 2017b - ISBN: 978-85-495-0149-3
Disponível em: <https://icaeedu.emc.ufg.br/up/920/o/ICAEEdu-2017-Proceedings-Online-Resource-version-8.0.pdf>.

LEMES NETO, Mário Joaquim de; LAMAS, Amilton da Costa. Sistema Autônomo para Travessia de Deficientes Visuais em Semáforos, apresentado na VI Jornada de Extensión Universitária del Mercosur, Tandil, Argentina, abril 2018.

MACHADO, Pedro Henrique Marquez. **Sistema Robótico para Deficientes Físicos**. 2017. 87 f. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

POLYGERINOS, Panagiotis *et al.* Soft robotic glove for hand rehabilitation and task specific training. **Proceedings IEEE International Conference in Robotics and Automation**, Seattle, Washington, USA, 2015.

RODRIGUES, Mariane Ribeiro da Silva; LAMAS, Amilton da Costa. Autonomia e Crianças com Paralisia Cerebral – Cadeira de Rodas Infantil Motorizada, apresentado na VI Jornada de Extensão Universitária del Mercosur, Tandil, Argentina, abril 2018.

SALTER, Robert Bruce. History of rest and motion and the scientific basis for early continuous passive motion. **Hand Clinics**, New York, v.12, n.1, p.1-11, 1996.

SMOOTH-ON, **Ecoflex 00-30**. Disponível em: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>. Acesso em 25 abril 2018.

TORTORA, Gerard; NIELSEN, Mark. **Princípios de anatomia humana**. 12ª edição, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

EXOSKELETON WITH BIOKINETIC ACTUATORS FOR HAND REHABILITATION

Abstract: *The loss of functionalities of the human hand results is a severe impairment in feeding capacity and personal care, limiting participation in work and in social and family life, therefore methods and systems of functional rehabilitation are very important. This article deals with the development of a proof of concept composed by self-structured non-rigid exoskeleton for human hands and a control and programming system that allows the operation in the mirror, exercise and programmed modes. The proof of concept development follows the Results Appropriation Model and Proof of Concept Development model traditionally applied in some PUC-Campinas extension projects. The developed exoskeleton uses pneumatic biokinetic actuators to inflate and deflate special silicone bladders that stimulate the movements of the patient's fingers. The proof of concept proved to be operable safely up to a distance of 20m between the gloves and the control system. The control system allows the analysis of the applied exercises contributing to the study of the dead development of the patients. The proof of concept was demonstrated at THERAPIES, an Intensive Rehabilitation Center located in Campinas.*

Key-words: *exoskeleton, cerebral palsy, hand rehabilitation*