

Controle de um Braço Robótico para Reabilitação Motora

Sandro Miguel Weizenmann
Grupo de Pesquisas em Tecnologia Assistiva
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, Brasil
sandrow@edu.univali.br

Alejandro Rafael Garcia Ramirez
Grupo de Pesquisas em Tecnologia Assistiva
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, Brasil
ramirez@univali.br

RESUMO

Stroke is one of the main causes of disability in Brazil. Along with spinal cord injury is one of the main motor disorders that lead to physical deterioration and loss of independence in a individual. The use of robots in medicine is becoming more and more recommended because robots have more precision, speed, fatigue-free repetition and shorter operating time among other things. Rehabilitation robotic arms have passive, active-assistive and active resistive therapies. In this work, a system to control a robotic arm for the rehabilitation of upper limbs that acts in passive mode was developed. Among the objectives are the implementation of a passive mode control, hardware development, human-machine interface and a system integration analysis. This work is justified due to the promising results of robotic rehabilitation, increased effort at a scientific level to develop neurotechnologies and the studies that were analyzed demonstrating that robotic therapy brings benefits in the functionality of the upper limbs in patients who have suffered a stroke. The development of this work presents a passive mode control inspired by an execution of InMotion, elaborated with the help of a physiotherapist, displaying a user-friendly graphical interface which presents the patient's data and allows them to be saved and used later. Tests showed that the execution of the exercise performed smoothly, without discontinuity with constant speed and correctly stored exercise data.

KEYWORDS

Robótica, Fisioterapia, Reabilitação.

1 INTRODUÇÃO

O acidente vascular cerebral, popularmente conhecido como AVC, é uma das principais causas de incapacidade no Brasil com incidência anual de 108 casos para cada 100 mil habitantes [1]. Aliás, essa síndrome é responsável por um considerável número de internações no país, apresentando um alto custo para o governo.

O acidente vascular cerebral e lesão medular são os dois principais distúrbios motores devido a danos ao sistema nervoso que levam, dentre outras, a deterioração física e perda de independência do indivíduo no desenvolvimento das atividades cotidianas [2].

A aplicação de robôs na medicina vem tornando-se cada vez mais recomendado, sendo utilizado em diversas circunstâncias como: cirurgias robóticas, laparoscopia robotizada, nano robôs em auxílio de microcirurgias, e na fisioterapia de reabilitação. Alguns dos motivos são que os robôs possuem precisão, velocidade, repetições sem fadiga, tempo de operação, dentre outros motivos que favorecem não só os profissionais mas também os pacientes que de alguma forma precisam do tratamento da fisioterapia neurológica [3].

A introdução de equipamentos robóticos para auxiliar o fisioterapeuta no processo de recuperação pode ter uma grande importância, no sentido em que os movimentos podem ser otimizados e repetidos de igual forma. A atuação automatizada do equipamento robótico, sem presença permanente do terapeuta, permite que o mesmo faça o acompanhamento de vários pacientes [4].

O InMotion, é uma das opções de braço robótico disponível no mercado. Ele apresenta dois graus de liberdade, permitindo a movimentação de ombro, cotovelo e punho. O equipamento conta com terapias passiva, ativo-assistiva e ativo-resistiva. O sistema orienta os pacientes a manipular e realizar tarefas como atingir alvos e contornar figuras, orientadas por sons e imagem [5].

Existem também, alguns produtos desenvolvidos pela Hocoma, líder mundial em dispositivos de terapia funcional, denominado como conceito Armeo de terapia. Desta família pode-se destacar o Armeo® Power e Armeo® Spring que são exoesqueletos de reabilitação focados no membro superior [6].

Esta proposta visou o desenvolvimento de um sistema de controle para um braço robótico de reabilitação, com dois movimentos rotativos e que opera no modo passivo (o robô executa os movimentos para o paciente). Foi desenvolvido o projeto de hardware, software e a análise de funcionamento do protótipo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido aos resultados limitados em programas de reabilitação convencionais na recuperação das funções dos membros superiores, pesquisas têm utilizado dispositivos robóticos para auxiliar na recuperação da função motora das articulações do membro superior [5].

O interesse em reduzir as limitações causadas por problemas motores foi acompanhada por desenvolvimentos de neurotecnologias para assistência e reabilitação. Especificamente, houve um esforço no nível científico visando soluções robotizadas que permitam melhorar a qualidade de vida das pessoas com distúrbios motores [2].

Estudos avaliados demonstram que a terapia robótica traz benefícios na funcionalidade dos membros superiores em pacientes que sofreram acidente vascular encefálico. Além disso, a terapia robótica atende aos requisitos de aprendizagem motora, facilitando o desempenho motor ao longo do tempo [7]. Há pesquisas que apontam um efeito adicional da terapia assistida por robô na destreza, comparada com a terapia convencional [8]. A terapia robótica proporciona efeitos positivos na reabilitação de membros superiores em pacientes pós-AVC com comprometimentos de moderados à graves na fase crônica, sendo que os resultados também sugerem, de maneira qualitativa, uma diminuição nos movimentos sinérgicos e melhora na força muscular do membro acometido [9].

A implementação de meios robóticos para reabilitação é muito importante para que se possa obter melhoras mais eficientes nos pacientes e auxiliar os terapeutas de forma a melhorar o atendimento ao paciente, facilitando a repetitividade das atividades envolvidas na recuperação motora e aumentar a quantidade de pacientes atendidos pelo terapeuta [10].

2.1 Medicina de Reabilitação

A medicina de reabilitação surgiu em 1930 e evoluiu após a Segunda Guerra Mundial. Em 1947 o *American Board of Medical Specialties* atribuiu à medicina física e de reabilitação o título de uma especialidade independente, também conhecida como fisioterapia. A medicina física de reabilitação concentra-se na prevenção, diagnóstico e tratamento dos distúrbios relacionados aos nervos, músculos e ossos que podem produzir lesão ou incapacidade tanto de forma temporária como permanente [11].

2.1.1 Os números da deficiência física. Segundo o IBGE, 1,3% da população do Brasil declarou possuir deficiência física, sendo o percentual para os homens maior do que o observado para mulheres [12]. Em relação ao grupo de idade, observa-se que o percentual maior de deficiência ocorre nas pessoas com mais de 60 anos. Por grupo de nível de instrução observa-se que a deficiência física tem um maior índice no grupo de menor instrução, como observado na Figura 1.

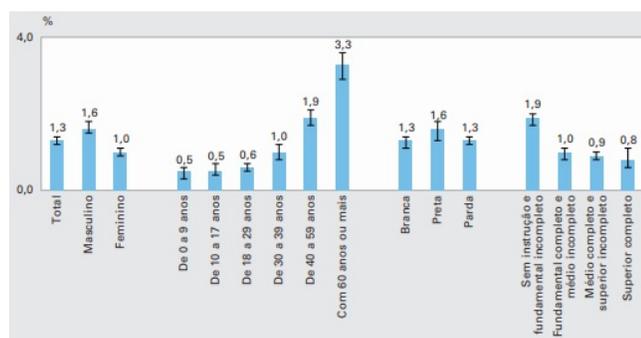


Figura 1: Distribuição da deficiência física, na população total [12].

De acordo com a OMS (Organização Mundial da Saúde), 1 bilhão de pessoas vivem com alguma deficiência, em torno de 14% da população mundial. Destas pessoas que vivem com alguma deficiência, 80% residem nos países em desenvolvimento e mais de 50% das pessoas com deficiência não conseguem pagar por serviços de saúde.

2.1.2 A reabilitação do AVC. Dados da Hocoma indicam que as taxas de AVC na Europa aumentarão 30% até 2050 [6]. Avanços na reabilitação ajudam os centros de reabilitação a otimizar os resultados diante do aumento dos eventos de AVC.

Embora antes se considerasse o AVC uma doença incurável e estática, o paradigma de reabilitação tem melhorado de forma significativa com o resultado de avanços nas intervenções agudas, redução de risco, dispositivos médicos, modalidades terapêuticas e

exercício, robótica, técnicas de imagem diagnóstica e da compreensão global do processo da doença [11].

O objetivo básico da reabilitação pós AVC é maximizar a independência. Em geral, pacientes com AVC agudo são avaliados no hospital por um fisioterapeuta, que determina o nível de dano à mobilidade e a capacidade de tolerar a terapia. Déficits de autocuidado são identificados pelo enfermeiro e, quando necessário, por profissionais de terapia ocupacional. Pacientes que sofrem AVC costumam ficar flácidos logo após o evento, mas com o passar do tempo, experimentam um aumento gradual no tônus no lado afetado, levando ao desequilíbrio muscular, ao risco de desenvolver contraturas e enrijecimento muscular [11].

O movimento voluntário do membro superior é fundamental na reabilitação. Pacientes com retorno da extensão de dedo voluntária e abdução do ombro no lado hemiparético dentro de 72 horas do AVC tem 98% de probabilidade de recuperação de alguma destreza em seis meses do evento. Esse número cai para 25% se esta extensão ocorrer entre 72 horas e 5 dias, e 14% se não ocorrer esta extensão em 5 dias [11].

A terapia robótica tem implementado novas abordagens na reabilitação do AVC. O dispositivo robótico pode fornecer várias formas de treinamento, incluindo movimento ativo, passivo, ativo-assistido e ativo-resistivo. O objetivo dos dispositivos robóticos é auxiliar ou corrigir movimentos repetitivos, com o treinamento ocorrendo à medida que a assistência do robô é diminuída [11].

O treinamento com auxílio de um robô para a função do braço pode intensificar e documentar a recuperação motora, porém para Maitin et al (2016), “os efeitos na recuperação motora da mão são incertos” que também considera os equipamentos como “complexos e dispendiosos e requerem uma considerável supervisão por parte dos terapeutas” [11].

2.2 Modos de Operação de Equipamentos Robóticos de Reabilitação

Estudos apontam que a terapia robótica apresenta, na maioria dos casos, um ganho na reabilitação da função motora do paciente, principalmente quando o mesmo inicia o processo de reabilitação pouco tempo após o AVC. Os equipamentos robóticos voltados para reabilitação motora operam em diferentes modos classificados como passivo, ativo, ativo-assistivo e ativo-resistivo.

2.2.1 Modo Passivo. Esse modo de operação é comum em exoesqueletos que têm a funcionalidade discreta, ou seja, eles têm seus movimentos programados sem feedback da parte humana [2]. Portanto, este modo de operação é utilizado quando o paciente não consegue realizar o movimento, e então, o robô efetua o exercício a fim de reabilitar os músculos.

Um dos exemplos de exoesqueleto de reabilitação motora que conta com a terapia passiva é o REHAROB [13].

2.2.2 Modo Ativo. Este modo de operação permite um melhor controle do dispositivo e uma maior interação do paciente, pois exige que o usuário emita sinais biológicos e, por vezes, do próprio dispositivo para que o sistema interprete-os fazendo seu mecanismo funcionar conforme intenção do paciente.

Este modo requer muito mais tecnologia que o modo passivo, pois a comunicação homem-máquina é feita através de sensores e

interpretado por algum tipo de controlador, para ir ao estágio de processamento computacional, e este último faz o controle dos atuadores. O primeiro exemplo desse tipo de exoesqueleto foi fabricado por Hardiman, da General Electric, apareceu no final da década de 1960. O exoesqueleto completo pesa 680 kg e foi controlado por um sistema escravo mestre [2].

Há ainda os modos ativo-assistido e ativo-resistivo onde a configuração física do equipamento é praticamente a mesma do modo ativo, alterando apenas o controle.

2.2.3 Modo Ativo-Assistido. Presente em sistemas de reabilitação como o InMotion e MIT-Manus, este modo de operação permite que o paciente realize o movimento proposto, com uma pequena ajuda do dispositivo, para correção de rota do movimento e também auxílio na força empregada [14, 15].

2.2.4 Modo Ativo-Resistivo. Modo de operação presente no InMotion que permite que seja realizado exercícios de fortalecimento muscular utilizando uma pequena força inversa ao movimento do paciente [14].

2.3 Equipamentos Robóticos de Reabilitação

Diversos equipamentos robóticos têm sido desenvolvidos para utilização na terapia de reabilitação, estes podem ser classificados como próteses e roupas biônicas; robôs móveis aplicados na reabilitação; estruturas robóticas seriais; estruturas robóticas paralelas e; estruturas robóticas paralelas atuadas por cabos.

2.3.1 ARM. O ARM (*Assisted Rehabilitation and Measurement*) foi desenvolvido no *Rehabilitation Institute of Chicago* e pela Universidade da Califórnia e permite movimentos tridimensionais, porém por ter uma estrutura pesada, a qualidade do movimento é afetada pela inércia do sistema [16].

2.3.2 Reharob. Baseado em dois robôs industriais da ABB, o REHAROB (*Rehabilitation Robot*) permite movimentos tridimensionais movimentando o antebraço e o braço. Este robô possui como desvantagem a impossibilidade de transporte e o custo proibitivo de R\$400 mil [17]. O equipamento conta apenas com o modo de operação passivo [13].

2.3.3 MIT-Manus. Desenvolvido no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), o MIT-Manus é um dispositivo robótico paralelo de dois graus de liberdade, montado a partir da plataforma do mecanismo de 5 barras tendo movimento plano. O antebraço do paciente é preso em uma tala fixada ao elemento terminal. O robô apresenta cenários diferentes para treinamento. Apesar da eficiência comprovada, este robô não providencia todos os movimentos requeridos na terapia convencional, especialmente os movimentos fora de plano. Seu custo gira em torno de US\$ 90 mil.

O MIT-Manus conta com o modo de operação ativo-assistido, onde a pessoa é incentivada a atingir um alvo em movimento ou estacionário mostrado no monitor. Caso o braço mover-se na direção errada ou não mover, o braço robótico executa o movimento na direção certa [15].

2.3.4 ArmeoPower. Desenvolvido pela Hocoma, o ArmeoPower foi elaborado para um estágio inicial de reabilitação, sendo capaz de realizar exercícios com grande quantidade de repetições. O robô,

com auxílio de sensores, ajuda o paciente a realizar um movimento, mesmo quando o mesmo não consegue executá-lo sozinho, sendo assim, conta com movimento ativo e passivo [6].

O equipamento possui um amplo espaço de trabalho, por possuir seis graus de liberdade, e vem integrado com software com uma grande quantidade de exercícios que interagem com o paciente durante a sessão de terapia. O software gera resultados gráficos para se ter melhor análise do comportamento dos membros, podendo assim avaliar o ganho da pessoa durante a terapia.

2.3.5 Inmotion. O InMotion Arm Robot foi projetado para aplicações neurológicas clínicas, baseado em mecanismo SCARA de acionamento direto que possui dois graus de liberdade. Está entre o mais pesquisado para reabilitação neurológica de membros superiores, sendo capaz de permitir de forma eficiente terapia sensório-motor exclusiva para cada paciente. O robô conta com um software interativo, que permite que o médico personalize o tipo de tratamento mais adequado para cada paciente, os quais interagem com o software de modo a realizar os movimentos impostos pela máquina. O equipamento conta com exercícios de movimento passivo, ativo-assistido e ativo-resistivo, tendo como referência o paciente. Com isso, o software gera um relatório ao final de cada sessão, permitindo que os profissionais consigam realizar uma melhor interpretação dos movimentos em estudo [14].

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Para a seleção dos trabalhos relacionados foi usado os termos “reabilitação robótica” e “membros superiores” e como critério de corte foi utilizado o ano de publicação. A intenção da pesquisa a partir de 2017, se dá pelo objetivo de buscar o que há de novidade nos trabalhos relacionados.

3.1 Simulação de um Controlador para Sistemas Assistivos com um Grau de Liberdade

Nesse trabalho foi proposta uma simulação de um controlador para exoesqueleto de 1 GDL com o objetivo de ser utilizado em próteses e órteses inteligentes [18]. Seu protótipo foi construído utilizando modelagem Lagrangiana aplicando técnicas de controle baseadas no torque computado e faz comparações entre uma abordagem utilizando o controle PD e PID.

Em seu trabalho a autor realiza uma simulação com três aplicações, a primeira sem perturbação, como se fosse um aceno, a segunda aplicação seria carregamento de cargas e a terceira aplicação testando os limites dos movimentos. Por fim o autor compara os resultados obtidos das aplicações utilizando os controles PD e PID.

3.2 Sistema Robótico do Tipo Exoesqueleto para Reabilitação de Membro Superior

Nesse trabalho foi proposto um exoesqueleto para reabilitação de baixo custo para membros superiores com 2 GDL, com foco nas articulações de cotovelo e pulso e com modo de operação passivo [19].

Em seu protótipo o autor utiliza um Arduino Mega para gravar o firmware e um programa em Java, o ExoesqueletumArm Software, onde o usuário ou terapeuta passa a posição e ângulo dos motores

para o microcontrolador e este interpreta e repassa os dados aos atuadores.

3.3 Modelo de um Braço Robótico para Reabilitação de Membros Superiores

Nesse trabalho foi proposto um modelo de braço robótico para reabilitação de membros superiores com dois GDL com foco nas articulações do ombro e cotovelo [20]. Em seu trabalho o autor projeta um protótipo em tamanho reduzido e realiza análises de movimento e trajetória através da ferramenta MATLAB.

3.4 Proposta de aplicação de robô cartesiano na reabilitação de membros superiores em pacientes pós-AVC

Nesse trabalho foi proposto um sistema de tratamento com aplicação de um robô cartesiano desenvolvido com hardware de baixo custo para reabilitação de membros superiores em pacientes pós AVC [21].

A aplicação desenvolvida pelos autores trata-se de um aplicativo onde o paciente realiza alguns exercícios como ligar pontos e desenhar figuras geométricas e o robô cartesiano fornece um feedback visual da execução do paciente.

De forma a avaliar o tratamento dos pacientes, a métrica utilizada foi de repetição x tempo em que, quanto menor o tempo levado para realizar o exercício, melhor a recuperação do paciente.

3.5 Sistema de Controle para Braço de Exoesqueleto

Nesse trabalho foi proposto um sistema de controle para braço de exoesqueleto com dois GDL que opera em modo ativo [22]. Sem ter foco em reabilitação, o autor contempla em seu projeto, movimentos do cotovelo e parte dos movimentos do ombro.

Seu protótipo conta com um microcontrolador ESP32 que coleta dados de sensores EMG e envia por meio de WiFi estes dados para um Raspberry Pi, onde estes são processados e enviados aos atuadores.

O grande foco deste trabalho era que o protótipo realizasse a imitação do movimento obtido pelo braço, realizando movimentos de extensão e flexão de movimento e ombro.

3.6 Comparações

A grande semelhança entre todos os trabalhos correlatos é a possibilidade de empregar qualquer um destes projetos em um sistema de reabilitação para membros superiores. [19, 21] focaram parte do esforço do desenvolvimento do projeto em soluções que fossem de baixo custo. Como solução em comum, os dois trabalhos utilizam a plataforma de desenvolvimento Arduino. Esta escolha é justificada devido ao baixo custo do hardware e a facilidade de desenvolvimento, o que reduz o custo do projeto.

[19, 21, 22] utilizaram o teste de usabilidade para validação de seus trabalhos. Este é um método conveniente, pois permite avaliar situações que podem não ser pensadas em ambiente matemático ou de simulação. Já [18, 20] utilizam métodos de simulação para validar seus trabalhos. Esta proposta, efetuou um teste de funcionalidade para a validação dos requisitos.

[19, 21, 22] desenvolveram uma interface com o usuário. Na interface de [19], a aplicação transferia através da interface a posição e ângulo aos atuadores. [21] utiliza uma interface para o paciente realizar um exercício e o robô cartesiano mimetizava o movimento. [22] tinha uma interface onde uma das principais funções era auxiliar o usuário a calibrar o controle. O trabalho proposto tem como intenção empregar a interface com o usuário para enviar informações de amplitude (raio do movimento) e número de repetições ao hardware para a realização da tarefa.

[21, 22] implementaram em seus trabalhos o modo de operação ativo. O objetivo destes controles era mimetizar os movimentos realizados pelos seus usuários, seja através de sensores ou da tela de interface usado por Santos. [19] optou por um controle passivo para realização dos movimentos. Este trabalho aplicará o modo de operação passivo para proporcionar ao usuário a realização de um exercício.

[21] propõem alguns exercícios para serem realizados pelos pacientes. Este trabalho visou apenas um exercício, baseados em um dos exemplos implementados no InMotion que auxilia o paciente a realizar uma circunferência. [19] não sugere nenhum exercício, tornando necessária a presença constante de um profissional para auxiliar no uso da ferramenta.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Braço

Inicialmente o controle desenvolvido era para ser implementado em projeto integrado a engenharia mecânica. Mas com o encerramento do projeto antes da conclusão do protótipo, fez-se necessário buscar alternativas para continuar o desenvolvimento do trabalho. Então após pesquisas por modelos 3D disponíveis, foi selecionado um modelo e confeccionado baseado no modelo [23], com algumas alterações, para dar continuidade ao desenvolvimento do projeto. Este modelo pode ser baixado de forma gratuita.

O braço impresso foi fixado por um eixo sobre uma superfície plana, tendo um dos motores preso na parte inferior. O outro motor foi fixado sobre a estrutura do braço. Para aumentar o torque dos motores, foi implementado um conjunto de redução composto de duas polias e uma correia para cada um dos eixos. A estrutura montada pode ser vista na figura 2.

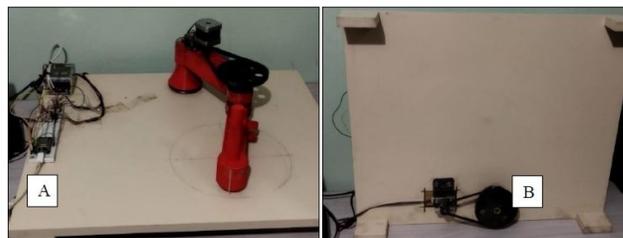


Figura 2: Estrutura do braço robótico. (a) Lado superior; (b) Lado inferior.

4.2 Interface Gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida na linguagem de programação Python com o uso da biblioteca PySimpleGUI™, que tem como

objetivo facilitar o desenvolvimento de interfaces, sendo a função de salvamento dos dados efetuado através da biblioteca Pyautogui.

Optou-se em desenvolver uma interface minimalista, composta de apenas uma janela onde o usuário preenche os dados do paciente, número de repetições do exercício, amplitude do movimento, o número da sessão, os botões salvar dados e iniciar movimento e o log de sistema, esta interface é exibida na Figura 3.



Figura 3: Interface gráfica desenvolvida

No log de sistema são exibidos, além dos dados preenchidos, a data e hora do início do exercício e a data e hora do final do movimento, estes dados são importantes serem adquiridos para uma posterior análise do fisioterapeuta.

4.3 Firmware

O firmware desenvolvido recebe via comunicação serial dois parâmetros, sendo eles: (i) número de repetições; e (ii) amplitude do movimento. O primeiro parâmetro corresponde a quantidade de vezes que o exercício será executado. Já o segundo é responsável pela configuração da amplitude do exercício, entretanto, o valor utilizado para testes foi constante.

O círculo proposto como exercício foi implementado pelo método de interpolação de dois pontos, onde o círculo foi dividido em pequenas retas, e verificado quantos passos do motor um e dois eram necessários para movimentar a parte do braço onde o paciente colocaria a mão da origem até o final daquela reta. E assim foi implementado até que o final da última reta fosse a origem da primeira.

O código implementado também monitora o botão de emergência instalado no canto da mesa. Ao ser acionado o exercício é parado e para que o protótipo volte a executar exercícios o mesmo deve ser desativado torcendo-o, movimento típico de um botão de emergência. Importante ressaltar que, antes de iniciar um novo movimento o braço necessita ser calibrado e está calibragem é feita de modo manual.

4.4 Comunicação

No projeto optou-se pela comunicação serial, pois a mesma atende as necessidades previstas. Esta comunicação serial é usada para trocar os dados entre o microcontrolador e o computador, levando os dados de amplitude, repetição de movimentos proporcionando um controle funcional ao sistema.

O padrão adotado foi o RS-232 de modo assíncrono, com um baudrate de 9600, sem paridade, bytesize de tamanho 8 e um stopbite, sendo selecionado a porta COM4 para fazer a transferência dos dados.

Para o desenvolvimento da comunicação serial na interface gráfica, foi utilizada a biblioteca serial do Python e no firmware é usado o serial do Arduino, não sendo necessário a importação da biblioteca, pois ela já está implícita ao projeto, sendo apenas necessário a invocação dos métodos Serial.read e Serial.write.

4.5 Hardware

O hardware foi prototipado, utilizando como base uma protoboard Hikari sem base HKP50 - 760 pontos, onde os componentes foram encaixados, para facilitar a prototipagem. O protótipo é composto pelo Kit ESP32WROOM, dois drivers para motor de passo A4988, dois capacitores eletrolíticos de 220 μ F, uma fonte de alimentação chaveada de 12VDC- 3A, dois motores de passo NEMA 17HS4401 40 Ncm além de fios para fazer as conexões entre estes componentes.

Os drivers para motor de passo são conectados ao ESP por dois fios, sendo um denominado step e outro para direção. Para o driver 1, que controla o motor 1, o pino do ESP que controla o step é o 33 e o que controla a direção do motor de passo é o pino 27. Para o driver 2, que controla o motor 2, o pino que controla o step é o 14 e o pino que controla a direção do motor de passo é o 12. Os drivers ainda recebem a tensão de referência do ESP (3,3V) assim como o GND, que são usadas para a função lógica do controlador. Fora isso, o controlador recebe da fonte os 12V e também o GND sendo estes usados para alimentar os motores de passo. Há também um botão conectado ao pino 32 do ESP, botão usado para emergência.

Nas entradas de tensão 12V dos drivers, foi colocado um capacitor eletrolítico para reduzir possíveis ruídos causados por variações de tensão e corrente de altas frequências que podem ocorrer nestes modelos de fonte de alimentação, o que poderia comprometer o correto funcionamento do hardware.

Os motores Nema 17HS4401 são atuadores do tipo bipolar e foram conectados por meio de 4 fios aos seus respectivos drivers. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático do projeto.

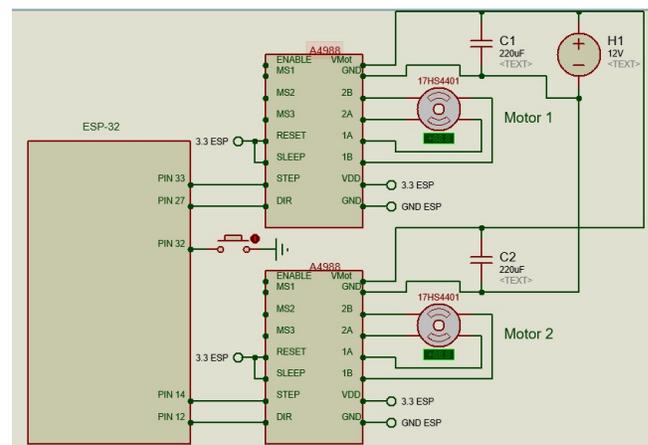


Figura 4: Diagrama esquemático do projeto

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O teste de comunicação e interface gráfica consistiu em preencher a tela com os dados do paciente, amplitude, e número de repetições do exercício e verificar se o microcontrolador recebia estes dados de forma correta e conseguia salvá-lo em suas variáveis. Para verificar se os dados chegavam intactos ao destino, foi implementado um led que tinha seções de funcionamento do led. Por exemplo, se a repetição fosse preenchida com 3 e amplitude fosse preenchida com 5 e clicar em iniciar movimento, os leds piscariam 3 seções de 5 vezes. Este teste foi realizado vinte vezes passando como parâmetro os valores de amplitude igual a 2 e repetição igual a 5 por dez vezes, amplitude igual a 3 e repetição igual a 7 por cinco vezes e amplitude igual a 10 e repetição igual a 10 por cinco vezes. Nas vinte execuções o sistema executou de forma esperada, demonstrando o correto funcionamento da comunicação.

O teste de execução do exercício consistiu em executar sem descontinuidade e com velocidade constante o círculo proposto como exercício do projeto. Foram executados por vinte vezes e teste, sendo que nas vinte execuções o sistema executou o círculo com velocidade constante e sem descontinuidades. Porém, observou-se que o ponto de encerramento do exercício, nem sempre era o mesmo, um estudo mais detalhado do projeto pode sugerir melhorias e uma adequação do protótipo, tal como a implementação de um sensor de ângulo para auxiliar na calibragem inicial do exercício.

O teste da funcionalidade de abortar o exercício consistiu em, com o movimento em execução, acionar o botão de emergência e o exercício parar o mais rápido possível. Foram executados vinte execuções do teste proposto e, em todas, o sistema se comportou conforme esperado, sendo que o tempo médio cronometrado entre o acionamento do botão e a parada do exercício foi de 180 ms.

O teste de integração do sistema, consistiu em realizar uma execução de um exercício observando se todas as funcionalidades implementadas executavam sem erro. Para que isso ocorresse, os dados do paciente deveriam ser preenchidos na tela, e ao clicar em iniciar movimento, o exercício iniciasse de forma suave, com velocidade constante e sem descontinuidades, respeitando o número de repetições colocados na tela. Foram realizadas vinte execuções do teste e em todas as execuções os resultados coletados foram conforme o esperado.

O teste de arquivamento de exercício consistiu em armazenar os dados em um arquivo para posterior consulta. O formato usado para armazenagem foi o pdf. Ao clicar em salvar dados, um pdf é gerado com o nome do paciente data e hora. Ao clicar neste arquivo, ele abre em um leitor pdf exibindo a tela e os dados do paciente e do exercício realizado apenas para visualização. Este teste foi realizado por vinte vezes e, em todas as repetições, os arquivos foram armazenados, conforme o esperado.

É importante salientar que se trata de um protótipo em escala reduzida, sem a intenção de utilização para fins comerciais. Para este fim, recomenda-se uma modelagem de um braço visando a ergonomia do paciente, tarefa fora do escopo deste projeto. O firmware projetado para realizar o exercício consome apenas 16% do espaço reservado para armazenar programas no módulo do ESP. Isso é interessante para acrescentar novas funcionalidades ou exercícios. Na Figura 5 é apresentado a informação da compilação do firmware.

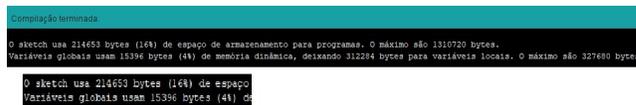


Figura 5: Consumo de memória do firmware.

6 CONCLUSÕES

O AVC é uma das principais causas de incapacidade no Brasil e de acordo com a discussão da fundamentação teórica, no mundo o número de pessoas que sofrerão desta doença aumentará, conforme afirmam as autoridades de saúde. Na contramão desta afirmação, no País é insuficiente o investimento financeiro em desenvolvimento de projetos na área de robótica de reabilitação. Felizmente, pesquisadores têm desenvolvido pesquisas na área com intenção de dominar e desenvolver tecnologias para desenvolvimento de soluções para reabilitação motora de pacientes.

Os trabalhos relacionados ao tema proposto trazem soluções recentes em sistemas de controle que podem ser utilizados na reabilitação robótica. São soluções de controles com modo de operação ativo ou passivo, mas que de alguma forma agregaram ao projeto proposto.

Este trabalho foi idealizado para auxiliar na reabilitação motora de pacientes que sofreram um AVC ou lesão medular. Uma lesão medular pode ser causada por doença, trauma ou defeito congênito, portanto, podendo ser utilizado na recuperação por exemplo de pessoas que sofreram acidente de trânsito ou de trabalho.

Este trabalho trouxe uma abordagem para a área de reabilitação robótica desenvolvendo um controle para braço robótico que atua no modo passivo. Este controle serve para equipamentos com dois movimentos, contendo um microcontrolador e dois atuadores. Além do hardware desenvolvido, o sistema de controle apresenta um software de interface homem-máquina para comunicação entre usuário e hardware. Este sistema, além de dar um feedback visual ao usuário através da interface gráfica também é responsável por armazenar os dados dos exercícios para uma eventual consulta.

REFERÊNCIAS

- [1] Thyago de Sousa Botelho, Célio Diniz Machado Neto, Felipe Longo Correia de Araújo, and Samara Campos de Assis. Epidemiologia do acidente vascular cerebral no brasil. *Temas em Saúde*, 16(2):361 – 377, 2016. doi: 10.29327/213319.
- [2] José María Azorín Poveda. *Exoesqueletos Robóticos para Rehabilitación y Asistencia de Pacientes con Daño Neurológico: Experiencias y Posibilidades en Iberoamérica*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Espanha, 2017. ISBN 978-84-15413-29-5.
- [3] Bárbara Texeira Lisboa. Robótica e medicina. In *Olimpiada de Robotica do Campo das Vertentes*, volume 1, pages 1 – 3. Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, Minas Gerais, 2010. URL https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/orcv/materialdeestudo_roboticaemedicina.pdf.
- [4] Diogo Mendes Farinha. Processamento de Sinal EMG para Dispositivos de Reabilitação e Assistência Motora, 2018. Dissertação (Mestrado em Controlo Eletrónica Industrial), Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal.
- [5] Rodrigo Cappato Araújo and Marcos Pinotti. Uso de dispositivos robóticos na reabilitação de membro superior após acidente vascular encefálico: uma revisão. *Fisioterapia Ser*, 6(1):33 – 36, 03 2011. ISSN 1809-3469.
- [6] Hocoma. Armeo therapy concept, s.d. URL <https://www.hocoma.com/solutions/arm-hand>.
- [7] Jacopo Scampuddu. Efeitos da Terapia Robótica na Funcionalidade do Membro Superior de pacientes após AVE, 2018. Monografia (Especialização em Fisioterapia), UFP (Universidade Fernando Pessoa), Porto, Portugal.
- [8] Fernanda Marcia Rodrigues M. Ferreira. Eficácia da terapia assistida por robô na reabilitação de pessoas com comprometimento motor e funcional de membro superior: parâmetros de intervenção, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia

- Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- [9] Danielle Mayumi Takeishe Ossanai, Eleanora Vitagliano, Gabriela da Silva Mauti, and Rafael Eras-Garcia. Utilização da robótica de membros superiores em pacientes pós acidente vascular cerebral crônico. In *Saberes e Competencias em Fisioterapia 2*, volume 2, pages 234 – 246. Atena Editora, Ponta Grossa, 2019. doi: 10.22533/at.ed.18719140421.
- [10] Heber Rocha Moreira. Dispositivo robótico para reabilitação de membros superiores: construção e validação, 2020. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Humano e Tecnologias), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, Brasil.
- [11] Ian B. Maitin. *CURRENT Medicina e Reabilitação: Diagnóstico e Tratamento*. Artmed Editora, Porto Alegre, 2016. ISBN 978-85-8055-579-0.
- [12] IBGE. Ciclos de vida, brasil e grandes regiões, 2015. URL <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94522.pdf>.
- [13] Gábor Fazekas, Monika Horvath, Tibor Troznai, and Andras Toth. Robot-mediated upper limb physiotherapy for patients with spastic hemiparesis: A preliminary study. *Journal of rehabilitation medicine : official journal of the UEMS European Board of Physical and Rehabilitation Medicine*, 39:580–582, 10 2007. doi: 10.2340/16501977-0087.
- [14] Bionik. Bionik laboratories corp. launches new commercial generation in-motion arm robotic system to improve rehabilitation for stroke survivors, 2018. URL <https://ir.bioniklabs.com/press-releases/detail/59/bionik-laboratories-corp-launches-new-commercial>.
- [15] Anne Trafton. Robotic therapy helps stroke patients regain function: Mit robots can deliver high-intensity interactive physical therapy, 2010. URL <http://news.mit.edu/2010/stroke-therapy-0419>.
- [16] Leonard Kahn, Michele Zygmant, William Rymer, and David Reinkensmeyer. Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled pilot study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 3:12, 02 2006. doi: 10.1186/1743-0003-3-12.
- [17] Wilgo Moreira Nunes. Desenvolvimento de uma estrutura robótica atuada por cabos para reabilitação/recuperação dos movimentos do ombro humano, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- [18] Eduardo Henrique Croce Brandão. Simulação de um controlador para sistemas assistivos com um grau de liberdade, 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- [19] Eliézer Pires Ferreira. Sistema robótico do tipo exoesqueleto para reabilitação de membro superior, 2018. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização), Universidade Federal de Goiás, Catalão, Brasil.
- [20] Guilherme da Silva. Modelo de um braço robótico para reabilitação de membros superiores, 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, Brasil.
- [21] F. A. Santos, W. A. Silva, A. A. Cotrina, J. P. S. Lima, and T. F. Bastos. Proposta de aplicação de robô cartesiano na reabilitação de membros superiores em pacientes pós-AVC. In *V Congresso Brasileiro de Eletromiografia e Cinesioterapia e X Simpósio de Engenharia Biomédica*, pages 739 – 742. Even3, Uberlândia, 5 edition, 2018. ISBN 978-85-5722-065-2. doi: 10.29327/cobecseb.78895.
- [22] Lucas Daniel Lira da Silva. Sistema de controle para braço de exoesqueleto, 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Computação), Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, Brasil.
- [23] Robot hand free 3d model, 2008. URL <https://www.3dcadbrowser.com/3d-model/robot-hand>.