

N. CLASS. M620.1  
CUTTER D2786  
ANO/EDIÇÃO 2015

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS-MG**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ELDRICK D' MARTINS**

**BRAÇO MANIPULADOR DE SIMILARIDADE ANATÔMICA COM REPLICAÇÃO  
INTUITIVA DE MOVIMENTO**

**Varginha**  
**2015**

**ELDRICK D` MARTINS**

**BRAÇO MANIPULADOR DE SIMILARIDADE ANATÔMICA COM REPLICAÇÃO  
INTUITIVA DE MOVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Alexandre de Oliveira Lopes.

**Varginha**

**2015**

**ELDRICK D` MARTINS**

**BRAÇO MANIPULADOR DE SIMILARIDADE ANATÔMICA COM REPLICAÇÃO  
INTUITIVA DE MOVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho ao Pai Celeste, primeiramente, que me deu as forças necessárias para este intento e também a todos que me auxiliaram nesta trajetória e sempre acreditaram no meu sucesso, sem permitir que eu fraquejasse em momento algum. E, ainda, aos colegas de curso que auxiliaram na caminhada para a realização deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e ao Mestre Divino, meus primeiros agradecimentos pela paz de espírito perturbada apenas por mim mesmo, e a todos aqueles que foram de grande auxílio na realização deste trabalho, como minha família, com a tolerância em relação às minhas necessidades de dedicação, e aos mestres e colegas que sempre se mostraram presentes e prestativos, inclusive com as negativas necessárias em vários momentos, que me colocaram no rumo certo.

**“Muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se à derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.”**

**Theodore Roosevelt**

## RESUMO

Neste trabalho o objetivo é apresentar a elaboração de sistema capaz de substituir a presença do homem em ambientes inóspitos e também ampliar o desempenho do trabalhador em situações nas quais ele é submetido a grandes esforços, tudo isso com o fim primário de proteger a saúde e facilitar a execução de tarefas penosas. Para este objetivo, foi elaborado um manipulador com similaridade mecânica com o braço humano, a fim de criar uma identidade proposital com o mesmo, utilizando desta para desenvolver interface de operação direta e intuitiva a distancia, por meio da replicação dos movimentos do operador que fornece comandos ao mecanismo. Isto cria uma presença virtual do operador no local de atuação do manipulador, facilitando a sua função. Estas características foram obtidas de maneira experimental, utilizando tecnologias de baixo custo, inclusive com utilização de servomotor desenvolvido para este projeto, que utiliza motoredutor de corrente contínua, tornando-o viável para utilização nos mais diversos setores, inclusive aqueles que têm menor disponibilidade de recursos.

**Palavras-chave:** Robô. Manipulador. Comando Intuitivo. Servomotor. Presença virtual.

## **ABSTRACT**

*This paper presents the development of system that can replace the presence of man in inhospitable environments, and also increase the worker's performance in situations where it is subjected to great lengths, all with the primary purpose of protecting the health and facilitate the implementation a painful task. To this end, it was prepared handler mechanical similarity with the human arm in order to create a purposeful identity to the same, using this to develop straightforward operation and intuitive interface distance, through replication of the movements of the operator providing commands to the mechanism, this creates a virtual presence of the operator on site handler operation, facilitating its function. These characteristics were obtained experimentally using low-cost technologies, including use of servo motor developed for this project using gearmotor DC, making it viable for use in various industries, including those with lower availability of resources.*

**Keywords:** *Robot. Manipulator. Intuitive control. Servomotor. Virtual Presence.*



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 01 - Teleoperador master slave .....                                 | 14 |
| Figura 02 - Equipamento Da Vinci Surgical System. ....                      | 15 |
| Figura 03 - Esquema de funcionamento de motor CC .....                      | 18 |
| Figura 04 - Motor CC com escovas e imã permanente .....                     | 19 |
| Figura 05 – Diagrama de um motor de passo.....                              | 20 |
| Figura 06 – Servomotor.....   | 23 |
| Figura 07 – Torque aplicado a um elemento .....                             | 24 |
| Figura 08 – estrutura com previsão aproximada de deformação.....            | 25 |
| Figura 09 – Estrutura desenhada em CAD e submetida à análise CAE.....       | 26 |
| Figura 10 – Potenciômetro e simbologias .....                               | 31 |
| Figura 11 – Ponte H utilizando transistores FET .....                       | 34 |
| Figura 12 – Motor Bosch 9 309 453 042.....                                  | 36 |
| Figura 13 – Motor acoplado a mecanismo de alavanca e haste.....             | 37 |
| Figura 14 – Movimento de circundação .....                                  | 37 |
| Figura 15 – Movimento de adução e abdução.....                              | 38 |
| Figura 16 – Movimento de flexão e extensão .....                            | 38 |
| Figura 17 – Modelo do protótipo.....  | 39 |
| Figura 18 – Dimensões dos dispositivos submetidos à flexão .....            | 41 |
| Figura 19 - Simulação de esforço de flexão no braço .....                   | 42 |
| Figura 20 – Flexo-torção aplicada ao braço .....                            | 43 |
| Figura 21 – Dimensões globais da estrutura.....                             | 44 |
| Figura 22 – Simulação de carga na base.....                                 | 45 |
| Figura 23 – Alavanca de acionamento do motor.....                           | 46 |
| Figura 24 – Simulação de esforço na alavanca do motor .....                 | 46 |
| Figura 25 – Simulação de esforço na haste da articulação ombro/base .....   | 47 |
| Figura 26 – Dispositivo de comando.....                                     | 48 |
| Figura 27 – Sensores instalados nas articulações de comando.....            | 48 |
| Figura 28 - Potenciômetro 1 avançado em relação ao 2.....                   | 49 |
| Figura 29 - Potenciômetro 1 defasado em relação ao 2.....                   | 49 |
| Figura 30 – Potenciômetros 1 e 2 iguais.....                                | 50 |
| Figura 31 – Protótipo avançado com 16 graus de liberdade.....               | 63 |
| Figura 32 - Óculos de realidade aumentada com hologramas da Microsoft ..... | 63 |

## SUMARIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                         | <b>12</b> |
| 2.1 História da Automação.....                            | 12        |
| 2.2 Conceito de Automação.....                            | 12        |
| 2.3 Manipulador Mecânico.....                             | 13        |
| 2.3 Controladores Lógicos Programáveis (CLP).....         | 15        |
| 2.4 Especificações de controladores programáveis.....     | 16        |
| 2.5 Linguagens de programação.....                        | 16        |
| 2.6 Sensores.....   | 17        |
| 2.7 Motores de Corrente Contínua.....                     | 18        |
| 2.7.1 Motores CC com escovas.....                         | 19        |
| 2.7.2 Motores de passo.....                               | 19        |
| 2.8 Controle por PWM.....                                 | 21        |
| 2.9 Ponte H com transistores FET.....                     | 21        |
| 2.10 Atuadores e Servo-Atuadores.....                     | 22        |
| 2.10.1 Atuadores não servo-controlados.....               | 22        |
| 2.10.2 Atuadores Servo-controlados.....                   | 22        |
| 2.11 Esforços em estruturas.....                          | 24        |
| 2.11.1 Momento Torçor ou Torque.....                      | 24        |
| 2.11.2 Método dos Elementos Finitos.....                  | 25        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>                                 | <b>27</b> |
| <b>3.1 Controle Intuitivo De Movimento.....</b>           | <b>27</b> |
| 3.1.1 Comparativo entre homem e máquina.....              | 27        |
| 3.1.2 Integração Homem Máquina.....                       | 28        |
| <b>3.2 Servomotor de baixo custo.....</b>                 | <b>28</b> |
| 3.2.1 Motores CC Com Escovas e Ímãs Permanentes.....      | 29        |
| 3.2.2 Caixa de redução.....                               | 30        |
| 3.2.3 Sensores.....                                       | 31        |
| 3.2.4 Sistema de monitoramento e controle eletrônico..... | 32        |
| 3.2.5 Sistema de potência.....                            | 33        |
| <b>3.3 Protótipo do Manipulador.....</b>                  | <b>35</b> |
| 3.3.1 Motores.....  | 35        |
| 3.3.2 Transmissão de movimento.....                       | 36        |
| 3.3.3 Mobilidade.....                                     | 37        |
| 3.3.4 Concepção do modelo.....                            | 38        |
| 3.3.4 Estudos do modelo.....                              | 39        |
| 3.3.5 Coeficiente de segurança.....                       | 40        |
| 3.3.6 Esforços nos elementos estruturais.....             | 41        |
| 3.3.8 Lógica de comando.....                              | 49        |
| 3.3.9 Controlador Lógico Programável.....                 | 50        |
| 3.3.10 Programação.....                                   | 51        |
| 3.3.11 Fabricação do Protótipo.....                       | 53        |
| 3.3.12 Custos de Produção.....                            | 53        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                       | <b>55</b> |
| <b>4.1 Desempenho do Protótipo.....</b>                    | <b>55</b> |
| 4.1.1 Pontos Positivos.....                                | 55        |
| 4.1.2 Pontos Negativos.....                                | 56        |
| <b>4.2 Áreas de Aplicação.....</b>                         | <b>57</b> |
| 4.2.1 Saúde.....   | 57        |
| 4.2.2 Seguimento Militar.....                              | 58        |
| 4.2.3 Segurança Laboral.....                               | 58        |
| 4.2.4 Movimentação de cargas.....                          | 59        |
| <b>4.3 Publicações e Eventos.....</b>                      | <b>59</b> |
| <br>   |           |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                                    | <b>61</b> |
| <b>5.1 Próximos Passos do Projeto.....</b>                 | <b>62</b> |
| 5.1.2 Desenvolvimento.....                                 | 62        |
| 5.1.3 Considerações finais.....                            | 64        |
| <br>   |           |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                    | <b>65</b> |
| <br>   |           |
| <b>APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS PARA CONSTRUÇÃO.....</b> | <b>68</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Uma característica marcante dos tempos atuais é a crescente presença dos dispositivos automatizados e robotizados em todas as áreas de atuação humana, como na indústria, por meio das linhas de produção automatizadas que utilizam braços robóticos para executar diversas atividades, aumentam a produtividade e diminuem o esforço e os riscos sofridos pelo homem em muitas atividades. Mas, é importante observar que, mesmo com grandes avanços da robótica a serviço da proteção do trabalhador, ainda são comuns os acidentes que lhe causam danos sérios com afastamento, invalidez ou até a morte. Para diminuir drasticamente esta incidência, se faz necessária a criação de mecanismos que afastem o trabalhador de situações perigosas de forma definitiva, com o objetivo de extinguir os acidentes de trabalho oriundos das funções de alto risco.

Para tanto, neste trabalho propôs-se a elaboração de dispositivo que emprega a captação dos movimentos dos braços do operador, utilizando-os para comandar manipulador que seja capaz de replicá-los no local onde se encontra a atividade, enquanto o operador estará protegido a distância. Com isso, cria-se uma interface direta e intuitiva de replicação de movimentos do operador que, além de facilitar a operação, também traria benefícios na questão da presença remota de profissionais, que vem sendo cada vez mais requisitada em diversas áreas de atuações, desde as mais técnicas até as administrativas.

Por meio de replicação em tempo real e com boa similaridade com a movimentação natural do corpo humano, pode ser criada uma interface virtual direta entre o operador e o manipulador, pois este teria a sensação de estar operando seus próprios braços. Com isso, retira-se da equação o fator relacionado ao erro de operação de manipuladores, pois ele é decisivo no momento de avaliar a implantação de um equipamento desse tipo em área de atuação delicada e com materiais que ofereçam alto risco, como é o caso da operação e manutenção de reatores nucleares.

No intuito de diminuir custos de construção deste mecanismo, explorou-se a ideia de confeccionar um servomotor de baixo custo que possa ser aplicado a um manipulador desta natureza, aumentando o alcance da aplicabilidade desse equipamento nas atividades menos nobres em relação ao investimento, nas quais o trabalhador é submetido a situações que trazem riscos à sua integridade física.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Para a elaboração do conceito do protótipo é preciso compreender alguns conceitos históricos e tecnológicos que levaram a humanidade ao desenvolvimento atual da robótica e da automação.

### **2.1 História da Automação**

Segundo Capelli (2009, p. 23), a Revolução Industrial teve início no século XVIII, na Inglaterra, com a mecanização dos sistemas de produção. Enquanto na Idade Média o artesanato era a forma de produzir mais utilizada, na Idade Moderna tudo mudou.

O fenômeno da industrialização se iniciou com a crescente demanda por produtos e serviços causada pelo crescimento populacional, impulsionando a burguesia ávida por aumentar seus lucros a procurar meios de produzir mercadorias mais baratas e de formas mais rápidas.

Com a Revolução Industrial também houve uma mudança no perfil do trabalhador fabricante de bens de consumo, que antes era o artesão habilidoso, por pessoas altamente especializadas em tarefas específicas, sem conhecimento total do processo, que se submetiam a condições perigosas e insalubres de trabalho.

### **2.2 Conceito de Automação**

Segundo Rosário (2009), a automação pode ser definida, de forma mais abrangente, como a integração de conhecimento para substituir a observação, os esforços e as decisões humanas por dispositivos e softwares.

A automação pode ser definida, ainda, como a utilização de técnicas e conhecimentos adquiridos, para melhoramento, facilitação, agilização e diminuição do esforço do trabalhador que desempenha a função. Esta ação, normalmente, é seguida por melhoria de desempenho, tornando as tarefas mais produtivas, fáceis e agradáveis de serem executadas pelo operador.

Nos tempos atuais, a automação tem sido aplicada em sistemas que visam não só ao aumento da produtividade, ao desenvolvimento e à melhoria nas condições de trabalho, mas também ao aumento do conforto e da comodidade em todos os ramos da sociedade, como os automóveis com sistemas de controle de frenagem, tração, estabilidade, conforto e interatividade, entre outros.

Destaca-se, ainda, que, dentro das residências, são encontrados dispositivos, como TV e computadores, que são programados para aprender as preferências do usuário, tornando a utilização mais direcionada ao perfil de utilização.

### 2.3 Manipulador Mecânico

Segundo Rivin (1988) e Borodin (1988), um manipulador mecânico é formado pela combinação dos elementos estruturais rígidos chamados elos, que são conectados entre si por meio das articulações que são também conhecidas como juntas. O primeiro elo recebe a denominação de base e o último de terminal, o qual pode ter acoplado o componente efetuator, podendo ser garra ou ferramenta.

- a) Elo: este elemento que forma as partes rígidas do equipamento é projetado para apresentar alta rigidez, a fim de não apresentar deformações durante a operação, auxiliando no posicionamento da estrutura. É produzido a partir de materiais como aço e alumínio, podendo, ainda, ser utilizada uma infinidade de outros materiais, inclusive materiais compostos, como a fibra de carbono.
- b) Junta: componente que dá a mobilidade aos elos e pode apresentar, principalmente, dois tipos, juntas de translação que fazem movimentos retilíneos ao longo de um eixo, e as juntas de rotação que desenvolvem rotação em torno de um eixo.

O número de graus de liberdade do robô se refere à quantidade de variáveis independentes representadas, normalmente, pelas juntas, as quais definem as posições do movimento do equipamento.

Para dar movimento aos manipuladores, são utilizados atuadores e mecanismos de transmissão que são:

- a) atuadores: são responsáveis pela conversão de algum tipo de energia em energia mecânica, podendo ser energia elétrica, hidráulica, pneumática ou térmica;
- b) sistemas de transmissão: são os elementos responsáveis por transmitir o movimento mecânico dos atuadores para as juntas do manipulador. Podem utilizar uma infinidade de dispositivos de transmissão, como correias dentadas, engrenagens, correntes e fitas metálicas, entre outros.

Um exemplo notável de manipulador que, segundo Fu (1987), foi o formador da base tecnológica utilizada para a robótica atual, foi o denominado teleoperador que, logo após a Segunda Guerra Mundial, foi desenvolvido no intuito de manipular a distância materiais perigosos, como os radioativos e a exploração de petróleo e gás em plataformas submarinas.

Este equipamento transmitia, por meio de vínculos mecânicos, o movimento do operador que manuseava um manipulador (*master*), e o manipulador (*slave*) sendo capaz de reproduzir os movimentos do mesmo, conforme Figura 1.

Figura 1 - Teleoperador *master slave*

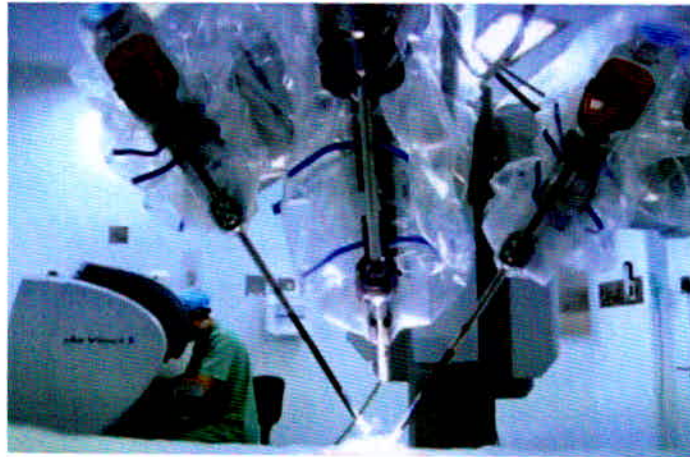


Fonte: Fu (1987).

Os manipuladores atuais são operados de duas formas distintas que são de maneira direta, por meio de botões, alavancas ou ferramentas, como no caso do teleoperador, ou de maneira automatizada, obedecendo a uma programação, como nos chamados robôs.

Hoje em dia, a ideia de atuação remota vem sendo explorada por meio de plataformas robóticas, como o Da Vinci Surgical System (Figura 2) que, segundo Da Vinci Surgical (2015), é um equipamento capaz de replicar os movimentos do cirurgião de maneira reduzida, por meio da operação remota de ferramentas especificamente projetadas, diminuindo o tamanho da incisão no paciente, melhorando a recuperação e diminuindo os riscos de contaminação.

Figura 2 - Equipamento Da Vinci Surgical System.



Fonte: Da Vinci Surgical (2015)

Estes equipamentos demonstram que há algum tempo existe a intenção de utilizar as características especiais das máquinas aliadas às características dos seres humanos.

### 2.3 Controladores Lógicos Programáveis

Uma parte fundamental de um sistema automatizado moderno é o controlador lógico programável, também conhecido pela sigla PLC (em inglês, *programmable logic controller*), que é o equipamento no qual se encontram as lógicas de comando do sistema.

Conforme Capelli (2009, p. 145), o primeiro dispositivo CLP foi desenvolvido no final de 1960, substituindo os enormes armários com vários quilômetros de fios, evitando as mudanças que demandavam grande trabalho na hora de trocar a programação, por exigirem mudanças físicas na disposição dos componentes.

Esta mudança ocorreu, principalmente, na indústria automobilística, na qual esta característica não era desejável, pois, quando era necessária a mudança de modelo do veículo, esta atividade causava grande transtorno. Tendo isso em vista, a Bedford Associates criou dispositivo que poderia trabalhar com várias programações distintas, podendo ser facilmente programado. O equipamento desenvolvido tinha o nome de *modular digital controller*, ou MODICON.

Estes sistemas são amplamente utilizados para funções de automação em todos os ramos da indústria, e seus semelhantes são empregados para executar todos os tipos de funções possíveis em diversos tipos de equipamentos.



## 2.4 Especificações de controladores programáveis

Segundo Castrucci (2009), os CLP têm características que definem a maneira pela qual deve executar seu trabalho, sendo necessária a correta observância desses parâmetros para a escolha do equipamento mais adequado. Estes parâmetros são:

- a) compatibilidade entre instalações elétricas e pontos de E/S;
- b) existência de chaves de proteção de hardware;
- c) tipo e forma de endereçamento;
- d) estrutura da palavra;
- e) tipos e formas de sinais aceitáveis;
- f) compatibilidade dos equipamentos eletromecânicos.

Estas especificações devem ser compatíveis com o tipo de projeto a ser desenvolvido, sendo a escolha do sistema de controle a última a ser executada, com o fim de abranger todas as compatibilidades necessárias ao projeto.

## 2.5 Linguagens de programação

Para transmitir informações, ordens ou definir como o CLP deve funcionar, foram criadas linguagens de programação que podem ser definidas como o método de comunicação entre ele e o usuário.

Segundo Petruzella (2011, p. 45), a linguagem de programação do PLC refere-se ao método do usuário de comunicar-se com o PLC e, para isso, foi estabelecido o padrão IEC 61131, que padroniza as linguagens múltiplas associadas à programação de PLC.

Este padrão IEC 61131 refere-se às cinco linguagens padrão para CLP que são:

- a) Diagrama Ladder (LD) – utiliza representação gráfica que se assemelha à linguagem lógica utilizada nos painéis de relês utilizados antes dos CLP, formando degraus lógicos;
- b) Diagrama de Blocos de Função (FBD) – emprega representação de fluxo de processo, podendo utilizar interconexão de blocos simples e complexos;
- c) Mapa de Função Sequencial (SFC) – representação gráfica de ações, passos e transições, todos interconectados;
- d) Lista de Instruções (IL) – baseada em instruções mnemônicas de texto, de baixo nível;
- e) Texto Estruturado (ST) – uma linguagem também baseada em texto, porém, de alto nível, como BASIC, C ou PASCAL, desenvolvida especificamente para aplicações de controle industrial.

Uma das linguagens que merecem destaque em CLP, também bastante popularizada no ARDUINO, é a linguagem C++, que é baseada em C, sendo linguagem de texto estruturado. Permite, ainda, outras funções adicionais não constantes na linguagem C, sendo a inclusão de pacotes completos de funções presentes em outros arquivos, o que facilita a escrita de programas que utilizam funções mais complexas com a Diretiva do Pré-Processador `#include`, entre outras facilidades.

Segundo Mizarahi (2006, p. 35), a diretiva `#include` provoca a inclusão de outro arquivo no programa-fonte. Na verdade, o compilador substitui a linha contendo essa diretiva pelo conteúdo do arquivo indicado. Isso torna o ARDUINO muito atrativo a aplicações experimentais e de pequeno porte, como a do trabalho em questão.

## 2.6 Sensores

Segundo Morais e Castrucci (2007, p. 132), os sensores são dispositivos amplamente utilizados na automação industrial que transformam variáveis físicas, como posição, velocidade, temperatura, nível, pH, etc., em variáveis convenientes. Para se detectar funções, estados, posições, velocidades, correntes, voltagens, etc., é necessária a introdução de sensores nos sistemas de automatização para servirem de base de informação para a execução das funções programadas.

Os sensores são a base para um sistema de controle de automação em que é necessário um *feedback* por parte do sistema para realimentar o programa e, com isso, controlar os eventos em malha fechada.

Alguns sensores podem medir estados físicos, traduzindo em amplitude de sinal elétrico, gerando uma saída analógica ou digital. Estes dispositivos podem ser potenciômetros, sensores ópticos e ultrassônicos, entre outros, e podem fornecer informações analógicas e digitais aos sistemas de automação, para que os mesmos possam perceber o ambiente à sua volta e, assim, interagir com ele. Normalmente, quando se amplia o número de sensores nos sistemas, dão-se mais informações para que o mesmo possa tomar decisões de forma cada vez mais eficaz.

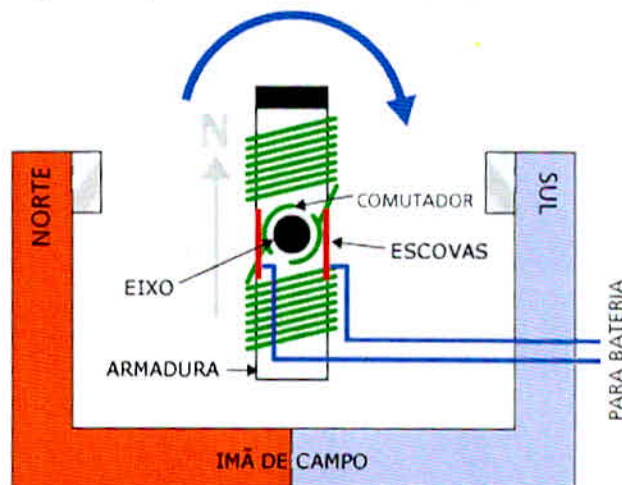
## 2.7 Motores de Corrente Contínua

Conforme cita Figini (2002, p. 221), estes tipos de motores são impulsionados por sistemas de potência de corrente contínua, que são aqueles nos quais não há inversão da polaridade da corrente elétrica. Este motor, apesar de ter caído em desuso em algumas aplicações, ainda mantém seu lugar em outras, como em sistemas que já dispõem da fonte de energia de CC, a exemplo dos automóveis e máquinas que fazem uso de baterias.

Até a alguns anos, esse tipo de motor tinha desempenho insuperável em aplicações com variação de velocidade, mas, hoje em dia, com a melhoria dos inversores de frequência, vem diminuindo esse tipo de aplicação. Porém, estes motores ainda apresentam vantagens em relação aos motores de CA, se associados a controladores PWM, podendo ser utilizados para variar a rotação de maneira a não prejudicar o seu torque, diferentemente do que ocorre com os motores CA assíncronos e, ainda, com um perfil de eficiência energética superior em baixas rotações.

Os motores CC ainda têm a capacidade de variar seu torque, variando a corrente de excitação, o que aumenta ainda mais a sua versatilidade em outras aplicações com esta necessidade. Seu funcionamento baseia-se na criação de campos magnéticos opostos, formados pelo enrolamento no estator e na gaiola de esquilo, que se alternam entre as várias bobinas para criar um conjugado homogêneo de torque, sendo, em alguns casos, um dos campos formado por ímãs permanentes, conforme Figura 3.

Figura 3 - Esquema de funcionamento de motor CC



Fonte: How Stuff Works (2015)

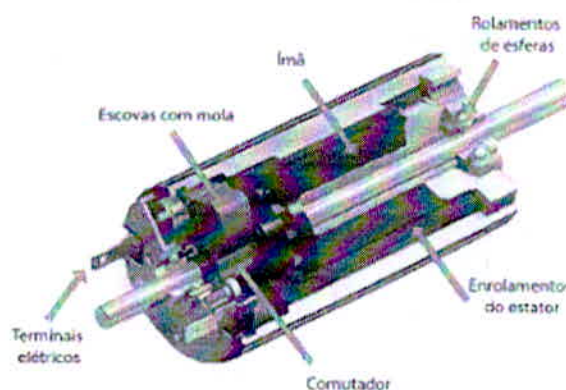
Conforme esquema da Figura 3, quando a armadura é magnetizada, forma uma força de atração em direção à polaridade oposta do ímã de campo e, à medida que estes polos se aproximam, ocorre a inversão de polaridade por meio das escovas, o que inverte o fluxo magnético, causando uma força no sentido contrário, causando novo momento, que cria a rotação do motor.

### 2.7.1 Motores CC com escovas

Conforme cita Lamb (2013, pg. 139), motores CC com escovas são aqueles em que o enrolamento de armadura é posto no rotor, a fim de utilizar-se o conjunto de escovas e comutador para criar a comutação das bobinas de acordo com a rotação do rotor, e o campo oposto pode ser formado por um enrolamento de campo localizado em um estator para excitar os polos do campo.

Outra maneira de criar a excitação dos polos do motor sem utilização de enrolamentos é a aplicação de ímãs permanentes em substituição aos enrolamentos de campo. Com isso, apenas a gaiola de esquilos necessita de alimentação elétrica.

Figura 4 - Motor CC com escovas e ímã permanente



Fonte: Lamb (2013)

Na Figura 4 é mostrado um exemplo de construção de motor que utiliza ímã permanente para criar o campo aproveitado pela armadura para causar momento.

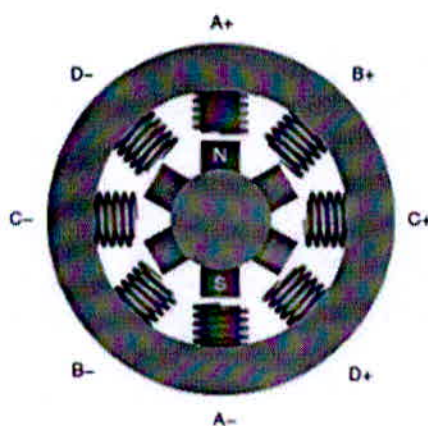
### 2.7.2 Motores de passo

Segundo Lamb (2013, pg. 144), um motor de passo é um motor CC que gira certa angulação em graus por pulso, que depende da sua configuração em relação ao número de

polos. Convertendo pulsos de entrada digitais em rotação no eixo, um trem de pulsos faz com que o eixo rode por passos, cada qual incrementando o giro do motor em determinado ângulo, sem o auxílio de mecanismo de retorno.

Eles utilizam ímãs para os polos do rotor, tendo uma inércia maior que os motores CC comuns e, por isso, apresentam uma aceleração mais lenta, porém, produzem maior torque por unidade de ampere. Na Figura 5 é mostrado um motor de passo com quatro polos A, B, C e D que são energizados sequencialmente em uma polaridade e, posteriormente, em polaridade invertida, produzindo oito posições por volta.

Figura 5 – Diagrama de um motor de passo



Fonte: Lamb (2013)

Quando há a necessidade de utilizar movimentação de precisão em mecanismos eletromecânicos, existem duas principais alternativas no mercado, que são os motores de passo e os servomotores. Estes dispositivos têm características diferenciadas que fazem com que cada um seja preferível em determinada área específica.

Os motores de passo costumam ser a alternativa mais econômica, porém, apresentam algumas características que devem ser levadas em consideração na hora da elaboração do projeto.

Uma delas é o fato de que estes motores têm potência e torque, em relação ao tamanho e ao peso, menores que a maioria dos servomotores. Além disso, por trabalharem em regime que dispensa a utilização de sensores externos, também apresentam o inconveniente de que, se aplicados a funções de torque muito variado que possa exceder o máximo do mecanismo, correm o risco de um escorregamento de giro que causa uma falha grave na operação do sistema, sendo que os mesmos têm ótimo desempenho em sistemas nos quais o torque necessário à movimentação apresenta variação previsível.

Outra característica que não o torna tão atrativo em aplicações de grande potência é o fator de que eles, devido ao movimento pulsativo, têm um perfil de consumo inferior ao dos servomotores.

## 2.8 Controle por PWM

De acordo com Manual do usuário da Weg, “Conversor CA/CC” pag. 81, pode-se alterar a rotação do motor CC utilizando-se alterações da largura do pulso fornecido pelo conversor, sem prejuízo do torque. Esta alteração da largura de pulso leva o nome de PWM, que é a sigla em inglês para *pulse width modulation* que, traduzido, significa modulação por largura de pulso.

Segundo catálogo de produtos Weg “Energia. Linha de Produtos e soluções” pag. 10, motores de corrente contínua são capazes de render torque constante (conjugado), em uma ampla faixa de rotações, quando utilizado PWM para seu controle.

Esta técnica pode ser utilizada para controlar motores CC para se obter uma variação de velocidade, porém, devido ao fato de a tensão real do sistema sempre ser a máxima, ocorre que, em teoria, o torque do motor não varia, pois ele se mantém proporcional à corrente aplicada ao mesmo.

Portanto, torna-se recomendável o uso de PWM para controlar motores de corrente contínua, dando variação de rotação ao sistema antes voltado apenas para fornecimento de movimentação à rotação contínua.

## 2.9 Ponte H com transistores FET

Segundo Malvino e Bates (2007), os transistores do tipo FET, sigla para *field effect transistor* que, traduzido, significa transistor de efeito de campo, funciona por meio do efeito de um campo elétrico na junção, com isso tendo como principal característica uma baixa impedância de entrada, proporcionando um consumo de excitação de *gate* muito baixo e de voltagem muito inferior à tensão de saída.

O desempenho deste dispositivo para esta aplicação se deve à baixa perda de ganho; seu comportamento é dócil em conjunto com controles digitais e costuma ter baixa voltagem de acionamento, o que é conveniente para a sua interface com a maioria dos sistemas programáveis.

Devido à condição de altíssima impedância da entrada, torna-se viável a utilização de um fotoacoplador ligado diretamente a seu *gate*, para isolamento dos FET do sistema de controle, para proteger o mesmo.

## 2.10 Atuadores e Servoatuadores

Atuadores são elementos capazes de provocar algum movimento, seja para acionamento de um interruptor, ou para movimentar algum mecanismo. Estes mecanismos podem ser de atuação linear ou rotativa, tendo uma imensa variedade quanto ao tipo, à fonte de alimentação, ao tipo de comando ou à precisão.

Estes mecanismos têm características que podem variar muito quanto à precisão, que podem ser dois tipos: um deles são os atuadores não servocontrolados e outro os servocontrolados.

### 2.10.1 Atuadores não servo-controlados

Segundo Rosário (2010), atuadores não servocontrolados são aqueles que não têm sistema de posicionamento preciso, detectando apenas os finais do seu curso por meio de chaves posicionadas no sistema, podendo ser de todas as naturezas possíveis, como elétricos, pneumáticos, hidráulicos e mecânicos.

### 2.10.2 Atuadores servocontrolados

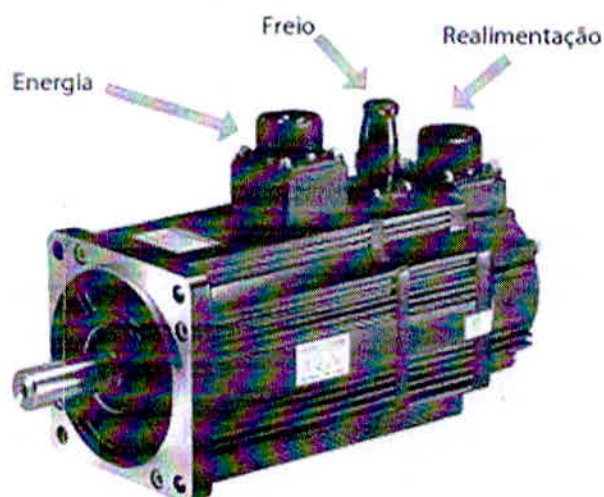
Atuadores servocontrolados são os que têm sistema de posicionamento avançado, podendo detectar a posição de seu eixo a cada momento, permitindo um posicionamento mais variado e preciso em relação aos não servocontrolados. Com isso, possibilita a execução de tarefas complexas dentro da robótica e da automação; sua aplicação pode ser ampla nestes campos.

Segundo Rosario (2010, P. 91), os robôs servocontrolados, por utilizarem sensores internos, conhecem a posição em que se encontra seu eixo e sua velocidade. Essas informações podem ser utilizadas para controlar o fornecimento de energia disponibilizada ao acionamento para que o robô mova-se a velocidades variáveis.

Estes atuadores, também conhecidos como servoatuadores, têm custos mais elevados que os atuadores convencionais, devido à sua construção especial e por apresentarem sensores

responsáveis pela leitura do posicionamento do atuador, além de demandarem os *drivers* de comando. Estes mecanismos podem ser hidráulicos, de motores de passo, de motor CC, motores AC assíncronos ou motores AC síncronos, sendo, hoje em dia, os com motores AC síncronos os preferíveis, devido à facilidade de programação e à grande precisão oferecida. Alguns fabricantes esforçam-se para desenvolver servoatuadores pneumáticos, porém, os mesmos são de difícil aplicação e controle, restringindo seu uso a condições muito específicas. Os preferidos são os elétricos, conforme Figura 6.

Figura 6 – Servomotor



Fonte: Lamb (2013)

Estes equipamentos têm características muito desejáveis para a maioria das aplicações, como precisão, consumo e velocidade de movimento. Eles atuam baseados em malha fechada, utilizando motores quase idênticos aos convencionais para movimentação contínua, o que acarreta que sua movimentação é mais linear que nos motores de passo. Pelo fato de sua movimentação continuar após cessar a alimentação até a frenagem, eles utilizam sua inércia para movimentar-se no declínio da rotação, tornando-os mais econômicos que os de passo.

A dificuldade em utilizá-los em aplicações menos nobres é por conta dos custos de aquisição do equipamento que são mais adequados às aplicações industriais de alto rendimento, como centros de usinagem CNC.



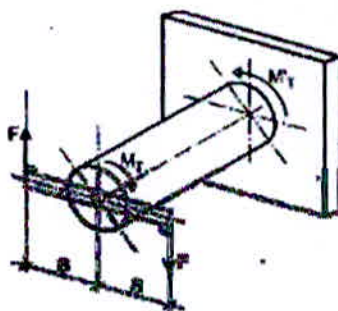
## 2.11 Esforços em estruturas

Para cálculo de esforços em dispositivos estruturais, é quase obrigatória, nos dias de hoje, a utilização de softwares especializados, mas, apesar disso, torna-se necessária a execução da análise das forças que serão aplicadas, o que demanda conhecimento.

### 2.11.1 Momento Torçor ou Torque

Como explica Melconian (2011), quando sofre a ação de um torque em uma de suas extremidades e é submetida a um contratorque em direção oposta em outro ponto, a peça está submetida a um torque, que consiste no produto entre a distância do centro da peça até o local de aplicação da força e a força aplicada, da forma demonstrada na Figura 9, em que  $M_t$  é o momento ou torque,  $M't$  é o contratorque,  $F$  é a força aplicada, e  $S$  é a distância entre o centro e o local de aplicação da força.

Figura 7 – Torque aplicado a um elemento



Fonte: Melconian (2011)

Dessa forma, esta grandeza pode ser medida utilizando-se a equação 1.

$$M_{\tau} = 2F \cdot S \quad (1)$$

em que  $M_{\tau}$  é o momento expresso em newtons vezes metro,  $F$  é a força em newtons e  $S$  é a distância em metros.

### 2.11.2 Método dos Elementos Finitos

Conforme Azevedo (2003), este método consiste na utilização de uma equação integral, de forma a ser possível substituir o integral sobre um domínio complexo, utilizando uma somatória de integrais baseadas em geometrias mais simples formadas por arestas, como quadrados, triângulos e outros. Quando é possível calcular todas as integrais volumétricas dos subdomínios  $V_i$ , já se têm os elementos necessários para calcular o somatório representado na equação 2.

$$\int_V f dV = \sum_{i=0}^n \int_{V_i} f dV \quad (2)$$

Utilizando-se a divisão de formas geométricas complexas em polígonos torna-se possível a análise isolada de cada elemento, por meio da observação de cada aresta dos polígonos, para observação das tensões e deformações isoladas nestes elementos separadamente que, unidos, formam uma previsão aproximada da deformação e das tensões instaladas na estrutura como um todo.

Na Figura 8 é mostrado um exemplo de deformação prevista em uma peça plana de pequena espessura, com divisão em 92 elementos, com 8 nós em cada e mais 10 nós com o meio externo.

Figura 8 – estrutura com previsão aproximada de deformação



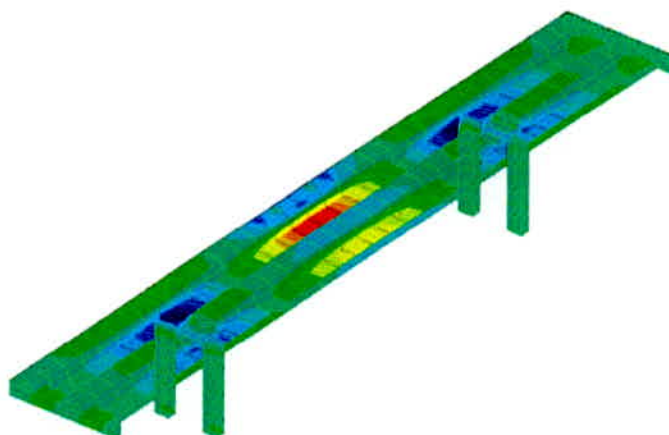
Fonte: Azevedo (2003)

Utilizando-se esta técnica é possível analisar a estrutura sólida da mesma forma que ocorre nas estruturas reticuladas.

Este método era anteriormente aplicado por usuários que eram também programadores, que criavam os programas nos quais eram analisadas as estruturas. Mas, hoje, se encontra quase extinto o usuário programador, sendo substituído pelo usuário comum.

Esta mudança ocorre devido à existência, nos dias de hoje, dos programas sofisticados de análise estrutural, muitas vezes inseridos nos softwares *Computer Aided Design (CAD)*, ou desenho assistido por computador, que são softwares utilizados para o desenho de elementos estruturais de engenharia utilizando o computador. Na Figura 9 é possível observar uma estrutura analisada utilizando software CAD que utiliza uma ferramenta de *Finite Element Analysis (FEA)*, ou análise de elementos finitos.

Figura 9 – Estrutura desenhada em CAD e submetida à análise FEA



Fonte: Azevedo (2003)

Este tipo de análise necessita da criação de desenho que utiliza a tecnologia CAD, para que seja possível sua análise nas ferramentas de FEA, utilizando estes parâmetros dimensionais, juntamente com as cargas e pontos de apoio definidos para realizar a análise, gerando relatórios e visualização gráfica.

### 3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido a partir de pesquisas e experimentos visando abranger conceitos em três áreas que são:

- a) controle intuitivo de movimento para manipuladores mecânicos;
- b) servomotor CC de alto torque e baixo custo;
- c) experimentação dos conceitos por meio de protótipo de braço manipulador replicador de movimentos.

#### 3.1 Controle Intuitivo De Movimento

Observando-se os modelos de manipuladores existentes no mercado, notam-se deficiências as quais merecem implementações tecnológicas para serem superadas, tendo em vista que existem tecnologias atuais mais avançadas, que poderiam ser utilizadas para desenvolver equipamentos com um nível mais elevado de integração entre homem e máquina, podendo aliar o melhor dos equipamentos existentes, aliados a certas características ainda de domínio apenas humano.

##### 3.1.1 Comparativo entre homem e máquina

As máquinas apresentam vantagens que são de fundamental importância para a execução de tarefas para as quais os seres humanos têm limitações claras. Portanto, é importante salientar quais as vantagens e as desvantagens dos robôs em relação aos seres humanos em trabalhos diretos, para selecionar as melhores de ambos.

##### a) Vantagens:

- podem ser construídos para suportar condições severas de uso quanto a temperaturas, pressões, radioatividade, riscos químicos e biológicos;
- podem ter níveis de precisão superiores;
- têm força sobre-humana;
- podem trabalhar de maneira contínua, sem pausas.

##### b) Desvantagens:

- têm adaptabilidade limitada;
- precisam de uma nova programação para cada atividade;
- não executam tarefas complexas e variadas.

### 3.1.2 Integração Homem-Máquina

O nível atual dos sistemas de computação ainda não permite que algumas tarefas de maior complexidade utilizem sistemas automatizados, muitas vezes obrigando o ser humano a atuar em situações severas e perigosas para a sua saúde, na falta de substituto adequado nessas atividades.

Explorando a ideia de não substituir o ser humano e, ao mesmo tempo, salvaguardar sua saúde, agregando as vantagens de uma atividade manualmente executada, juntamente com a utilização de manipuladores mecânicos, pode ser proposto sistema de integração entre homem e máquina que tenha potencial de criar uma presença virtual do ser humano na atividade na qual suas limitações não o tornam apto a desempenhá-las.

A presença virtual do operador já vem sendo utilizada na medicina por meio de robôs capazes de executar cirurgias que utilizam ferramentas remotamente operadas que amplificam a precisão e diminuem o risco de infecção devido ao tamanho reduzido das incisões no paciente. Anteriormente, já havia sido empregada para a manipulação de materiais radioativos, como o caso do teleoperador, que data do fim da Segunda Guerra Mundial.

Seguindo estas linhas de equipamentos e, ao mesmo tempo, com uma abordagem diferenciada, propõe-se um novo sistema que tenha a máxima similaridade com a mecânica anatômica humana, criando, inclusive, uma sensação de manuseio direto dos objetos e equipamentos tocados pelo manipulador. Estas características podem trazer melhorias no ponto da rapidez de treinamento do operador e diminuição do tempo de execução de tarefas que utilizam outros tipos de manipuladores comandados por botões e alavancas.

Sendo assim, é possível afirmar que seria criado um modelo híbrido de equipamento que teria partes físicas eletromecânicas, com a atuação de um cérebro humano em seu comando.

Este sistema acarreta consequências interessantes para o desenvolvimento humano, podendo ser utilizado para eliminar o risco de acidentes em áreas de risco de maneira total, pois não seria mais exigida a presença humana no local.

### 3.2 Servomotor de baixo custo

Visando tornar possível a prototipagem e também minorar os custos de fabricação seriada do equipamento de comando intuitivo, foi desenvolvido servomotor com

características diferenciadas de construção e controle, para atender à necessidade do sistema, especialmente no que diz respeito ao critério custo.

Este sistema de servomotor poderia ser aplicado não somente ao mecanismo proposto, mas também à movimentação de precisão em equipamentos voltados para melhorar a qualidade de vida das pessoas, como próteses avançadas a custos reduzidos, aparelhos de reabilitação e fisioterapia e automatização de residências, entre outros. Ou seja, sua elaboração pode viabilizar um sistema aplicável a diversos dispositivos que dependem do caráter do custo para saírem do campo das ideias ou para se popularizarem.

O sistema deve apresentar posicionamento angular desenvolvido para utilizar motores CC com escovas e ímãs permanentes, atendendo a critérios de custo e disponibilidade. Para sua execução é necessário desenvolver outros subsistemas que abrangem

- a) motor;
- b) caixa de redução;
- c) sensor de posição angular;
- d) sistema de monitoramento e controle;
- e) programação personalizável para cada modelo de motor utilizado;
- f) sistema de amplificação de potência.

### 3.2.1 Motores CC Com Escovas e Ímãs Permanentes

Os motores CC com escovas e ímãs permanentes são, na sua maioria, desenvolvidos para o fornecimento constante de torque. Normalmente, não têm nenhum mecanismo de posicionamento, mas, apesar desta deficiência, têm características de custo muito favoráveis à sua utilização em sistemas de baixo custo. Porém, para esta utilização, exige-se a aplicação de sistema de posicionamento externo ao motor o que, além de exigir um trabalho maior na instalação, também demanda a construção de sistemas de controle, potência, programação e sensoriamento não existentes nos modelos convencionais.

Estes motores têm algumas características muito desejáveis em sistemas de posicionamento angular, como baixa inércia, alto torque na partida, controle simplificado e disponibilidade no mercado.

### 3.2.2 Caixa de redução

Para ter bom rendimento dos motores CC é preferível que eles trabalhem em rotações mais elevadas, a fim de aumentar sua potência, tendo em vista que o momento é teoricamente constante em todas as faixas de rotação. Para adequar seu funcionamento a cada aplicação, são utilizadas caixas de redução que diminuem a rotação final do eixo, muitas vezes fazendo parte do motor.

É desejável obter-se rotações mais baixas no eixo de saída, o que é conveniente ao tipo de aplicação e aos sensores utilizados, que não suportam angulação superior a 270°.

Para adequação da rotação, é utilizada uma caixa de redução com o objetivo de diminuir a rotação do motor, aumentando o torque fornecido, assim melhorando os requisitos de desempenho do equipamento em posicionamento angular, pois o sistema deve trabalhar em velocidades baixas com torque elevado, facilitando, para o sistema, a localização dos pontos de parada fornecidos pelo sensor.

Para a seleção da caixa de redução e também do motor, tem-se que ter em mente a velocidade de movimento do manipulador representada pela rotação, e o torque necessário.

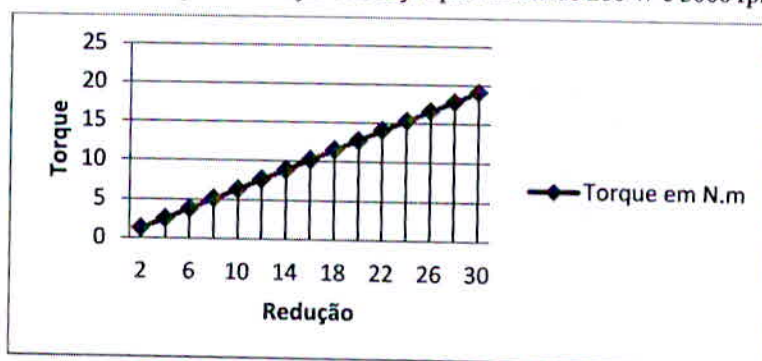
Estas grandezas podem ser definidas por meio da equação 3.

$$T = \frac{P \times 30}{\pi \times n} \quad (3)$$

em que T é o momento em N.m, P é a potência em Watts e n é a rotação em rpm.

O torque tem crescimento linear de acordo com o aumento da taxa de redução da caixa, como no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Torque em relação à redução para motor de 200 W e 3000 rpm.



Fonte: o autor.

Utilizando estas informações é possível dimensionar o motor e a caixa de redução necessária à movimentação do mecanismo aplicado de acordo com o esforço exercido e a velocidade desejável.

### 3.2.3 Sensores

São necessários sensores ao sistema, pois não existem meios passivos de monitorar o movimento, como nos motores de passo. Assim, depende de monitoramento externo capaz de fornecer referências de posicionamento do eixo do dispositivo, sendo, em servomotores industriais, utilizados os *resolvers* e os *encoders*, os quais têm funcionamento digital e de grande eficiência.

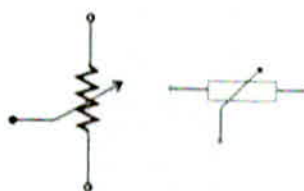
No caso de utilização de mecanismos de referência profissionais, eleva-se o preço a níveis incompatíveis com diversas aplicações. Para diminuir os custos, uma opção é a utilização de potenciômetro, pois, quando aplicada uma tensão qualquer em seus terminais de alimentação e se altera o posicionamento angular de sua haste, pode-se observar alteração proporcional na tensão fornecida pelo terminal de saída, que tem uma identidade específica para cada posição.

Assim, pode-se acoplar a haste do sensor ao eixo do motor para que cada mudança de posição no eixo do motor cause também uma mudança no eixo do sensor, criando uma leitura diferenciada a cada posição do eixo do mesmo, sendo útil ao controle por malha fechada, que utiliza a informação de posição do sensor para verificar a compatibilidade da posição do eixo do motor, e esta informação é utilizada para comparar com a posição pretendida.

Figura 10 – Potenciômetro e simbologias



**Potenciômetro**



**Simbologia**

Fonte: O autor



Estes mecanismos costumam ter construção que permite um erro da ordem de mais ou menos 5% no total de sua resistividade, porém, este erro não se torna importante neste caso, pois sua saída emite um sinal proporcional que depende apenas da posição do eixo, sendo a saída sempre uma medida proporcional entre a angulação e a tensão aplicada em seus terminais.

#### 3.2.4 Sistema de monitoramento e controle eletrônico

A parte mais complexa do sistema é a responsável pela interpretação dos dados fornecidos pelos sensores e a execução dos comandos, e, para esta tarefa, foi utilizada plataforma programável, pois se mostra mais versátil e confiável que sistemas construídos com base em eletrônica analógica, os quais precisam de mudanças físicas no sistema para corrigir eventual funcionamento defeituoso, no molde dos antigos painéis elétricos utilizados para programação de processos industriais.

O objetivo deste controle é fazer com que o motor gire na direção adequada e pare na posição desejada.

Funcionamento: o controlador, após receber uma informação que pode ter origem externa ou no próprio programa, verifica a posição do sensor acoplado ao eixo do motor. Se esta posição estiver em desacordo com a posição desejada, o programa calcula a diferença entre os posicionamentos e utiliza esta informação para acionar a saída indicada que causa movimento no motor na direção correta, a qual diminui gradativamente a diferença entre os valores, utilizando desta diferença para modular a velocidade do motor.

Para a concretização deste roteiro, é preciso que a plataforma utilizada possa aproveitar a leitura de sensores e comandar portas lógicas de maneira indireta, ou seja, em vez de apenas ler o sensor e aplicar a informação diretamente ao motor, deve executar processamento dos dados para que a movimentação do motor seja executada de maneira a não provocar trancos mais bruscos que o necessário e promover frenagens programadas em regiões estratégicas do movimento, diminuindo as reações de torque no momento da parada. Essas orientações, se não incluídas, causariam tremores na movimentação e diminuição na vida útil do equipamento.

Em casos nos quais se trabalha com fontes de alimentação de tensão superior à dos motores utilizados, plataformas capazes de produzir saídas PWM podem ser utilizadas para modular a tensão máxima, a fim de não ultrapassar a voltagem de operação dos motores, ou

também calibração da tensão mínima na qual o motor é capaz de vencer a inércia, diminuindo o atraso da resposta do sistema.

Para a execução desta tarefa, pode-se utilizar uma entre as muitas plataformas existentes no mercado, verificando as capacidades físicas e virtuais de executar tarefas fazendo as leituras necessárias dos sensores.

A plataforma que mais se destaca para aplicações amadoras de robótica é a plataforma ARDUINO, a qual é capaz de ler sensores analógicos, transformando estas leituras em informações digitais e executar programação que comanda portas de saída digitais.

Para que o sistema seja independente do motor utilizado, é preciso tornar algumas variáveis passíveis de ajuste simplificado, como a maneira como o motor acelera e desacelera e, ainda, o tamanho do ponto de parada, fazendo com que, quando acoplado a motores de maior ou menor potência e inércia, possa ser alterado para se adequar a cada um, sem a necessidade de criação de sistema específico a cada motorização.

### 3.2.5 Sistema de potência

Nos motores de corrente contínua de ímãs permanentes, quando é necessário alterar o sentido de rotação, basta aplicar uma tensão de polaridade invertida aos terminais e, com isso, altera-se o sentido do campo magnético do rotor, criando um momento no sentido oposto.

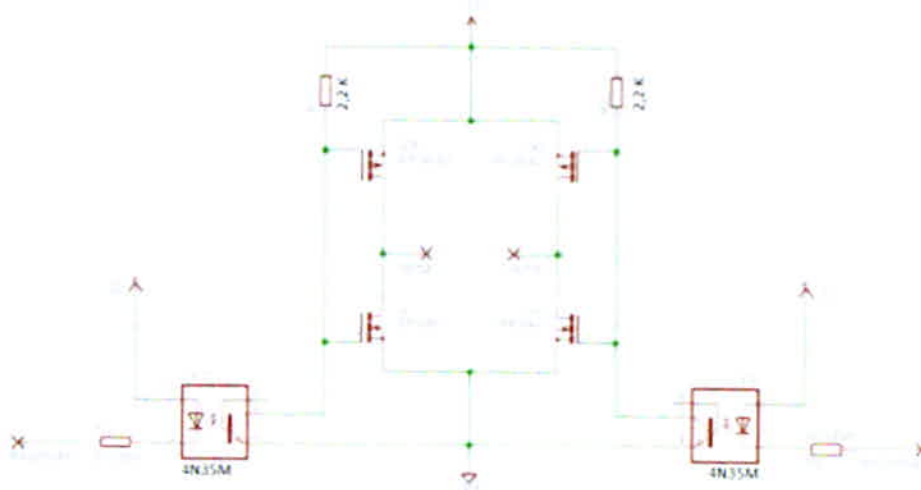
Os circuitos que são capazes de executar esta tarefa são chamados de pontes H. Estes mecanismos executam a reversão da polaridade nos terminais do motor, causando movimento em sentido oposto, quando necessário. Porém, nem todos os circuitos desta natureza estão aptos a trabalhar controlando a rotação do motor. Ela precisa ter características especiais, que são:

- a) chaveamento transistorizado: este tipo de chaveamento trabalha com componentes de estado sólido chamados transistores, que executam a ligação entre os terminais dos motores e a fonte de alimentação, para criar fluxo elétrico. Diferente das pontes com relês, estas pontes podem ser controladas de forma analógica ou em altas frequências de acionamento, conforme a necessidade;
- b) utilização de transistores FET: este tipo de transistores, por possuírem uma impedância de entrada muito baixa, podem trabalhar com uma tensão de excitação menor que a tensão fornecida pelos seus terminais, além de exigirem uma baixa corrente de entrada, o que facilita o trabalho em pontes utilizadas por sistemas programáveis mais simples que, em sua maioria, fornecem tensões menores que 5v;

c) circuito de proteção e desaceleração: este sistema tem a finalidade de proteger o sistema, porém, após análises mais detalhadas, nota-se que a utilização de diodos de alta corrente acoplados em curto-circuito com os terminais dos transistores em sentido oposto ao da corrente de trabalho, além de dissipar as cargas geradas pela movimentação inercial do motor que continua em rotação após a parada de fornecimento de energia, impedindo que estas cargas danifiquem o circuito, nota-se uma considerável frenagem no giro, devido à consequente força magnética criada, que se opõe à rotação do sistema. A consequência disso é que, além de o motor não apresentar consumo importante de energia durante a fase de declínio da rotação para parada, a energia gerada converte-se em pré-frenagem importante para o processo de posicionamento do sistema, tornando a contracorrente de frenagem amortecida pelo fluxo criado.

Atendendo aos critérios citados, foi desenvolvido modelo de ponte “H”, que utiliza transistores do tipo FET, controlados por intermédio de fotoacopladores e, devido ao fato de os FET utilizados possuírem diodos internos conectados entre *drain* e *source*, não foi necessária sua adição, conforme Figura 11.

Figura 11 – Ponte H utilizando transistores FET



Fonte: O autor

Este modelo de ponte H tem características que permitem sua utilização com a frequência do PWM utilizada pelo ARDUINO, devido às frequências de funcionamento superiores dos elementos utilizados que são os fotoacopladores 4N35M, os FET IRF640 e IRF9640, além de sua montagem permitir chaveamento rápido dos transistores.

### 3.3 Protótipo do Manipulador

Para maior interação e identidade na utilização do equipamento, tendo em vista o tipo intuitivo da operação, o manipulador deve ser projetado tendo semelhança com a mobilidade de um braço humano, fazendo, assim, com que o operador tenha uma sensação máxima de integração ao sistema.

A fim de adequar os custos aos recursos disponibilizados, foram selecionados três principais entre os executáveis por um braço humano. Isto significa que o manipulador teria 3 graus de mobilidade.

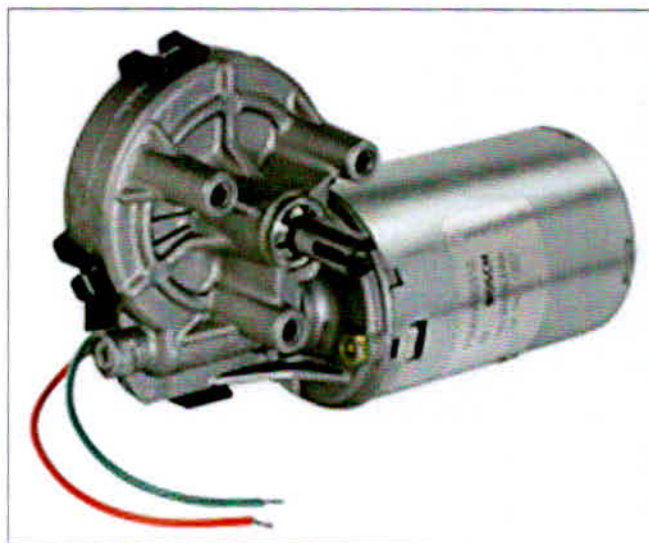
#### 3.3.1 Motores

O projeto do protótipo iniciou-se pela seleção dos motores, tendo em vista que a estrutura seria dimensionada de acordo com o motor, que deve possuir torque e velocidade suficiente, e compatibilidade com o sistema de servomotor apresentado.

- a) Corrente contínua com tensão de 12 volts: o desenvolvimento da interface de comando foi baseado em motores de corrente contínua, devido à facilidade de partida que não demanda altas correntes e tem fácil inversão de rotação. A tensão de 12 V foi utilizada em razão da vasta gama de motores, fontes de alimentação e baterias disponíveis.
- b) Alto torque e baixa rotação: geralmente, os motores elétricos de corrente contínua têm alta rotação e baixo torque para desempenhar uma potência razoável. A aplicação no projeto do braço mecânico exige alto torque para dar força ao conjunto e baixa rotação para aumento da precisão. A técnica mais utilizada na obtenção dessas características é a aplicação de caixa de redução, em que a rotação é reduzida e o torque é aumentado.
- c) Regime severo de trabalho: devido ao fato de as constantes inversões de rotação causarem vários movimentos de partidas, é preciso um motor de altíssima robustez e projetado para regime severo de trabalho.

Apesar de não ser muito compacto, os motores compatíveis com Bosch 9 309 453 042 mostraram-se uma boa opção nos requisitos de aplicação, com tensão de 12 V, rotação máxima de 80 rpm, torque máximo de 38 N.m, caixa de redução acoplada e boa robustez. Com esta informação é possível iniciar o dimensionamento dos componentes estruturais do manipulador, com base no torque disponível no motor.

Figura 12 – Motor Bosch 9 309 453 042



Fonte: Bosch

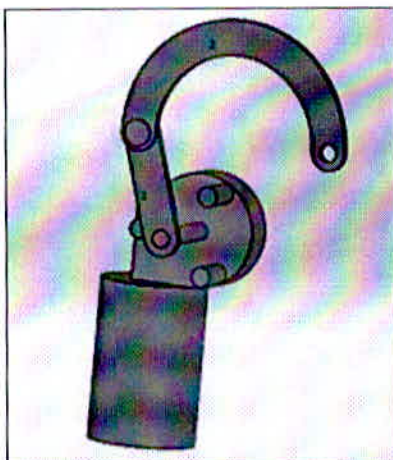
### 3.3.2 Transmissão de movimento

Foi selecionado sistema de alavancas e hastes interligadas por meio de juntas articuladas, conforme demonstrado na Figura 13, para tornar simples e barata a elaboração do sistema de transmissão.

Este sistema tem custos moderados e transmissão eficiente de movimentação quando utiliza angulações entre haste e alavanca próximos a  $90^\circ$ . Porém, à medida que esta angulação se torna mais próxima de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , ocorrem perdas significativas de eficiência, com ocorrência de tensões elevadas nas articulações e folgas crescentes.

Devido ao fato de os custos poderem ser impedimento definitivo para a execução do protótipo, apesar das deficiências, foi utilizado este mecanismo, que oferece melhor relação custo/benefício.

Figura 13 – Motor acoplado a mecanismo de alavanca e haste



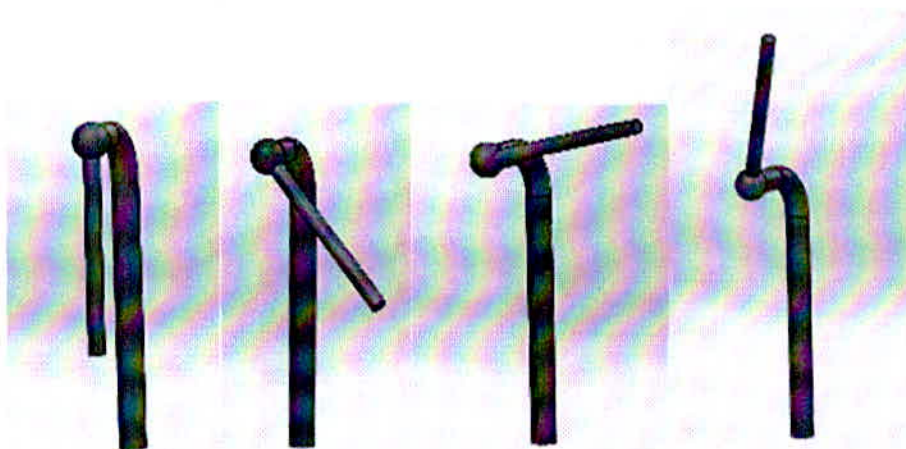
Fonte: o autor

### 3.3.3 Mobilidade

Após a seleção do número de movimentos do manipulador, foram selecionados os movimentos que melhor demonstram a movimentação braquial humana.

- a) Movimento de circundação: é descrito pela formação de um cone com base em um dos vértices na articulação do braço, girando-o circularmente.

Figura 14 – Movimento de circundação

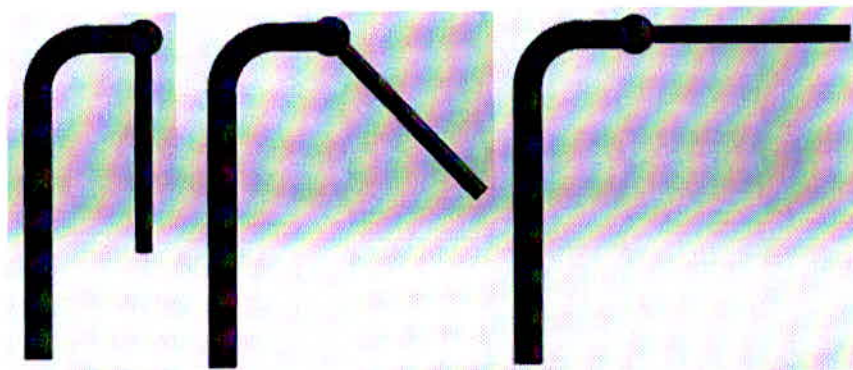


Fonte: o autor

Movimento capaz de executar 180° de rotação.

- b) Movimento de adução e abdução: movimento no qual, na abdução, o membro se afasta do corpo e, na adução, se aproxima do corpo.

Figura 15 – Movimento de adução e abdução

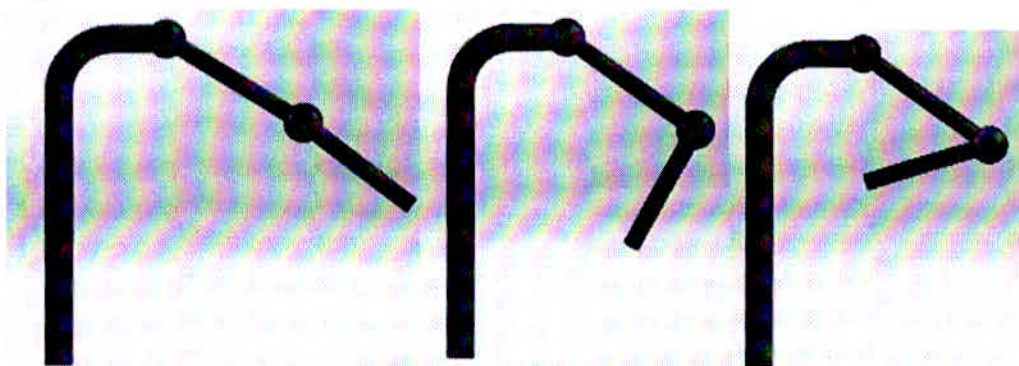


Fonte: O autor

Este movimento será limitado a uma angulação de  $90^\circ$ .

c) Movimento de flexão e extensão: movimentos caracterizados pela dobradura do membro e sua extensão.

Figura 16 – Movimento de flexão e extensão



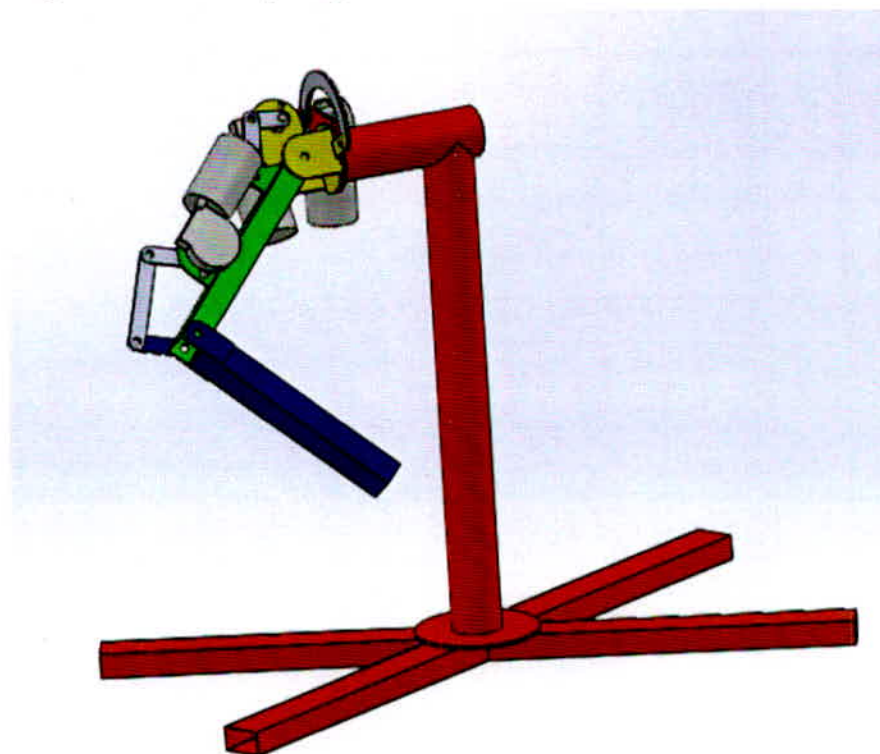
Fonte: O autor

Este movimento será limitado a  $135^\circ$ .

### 3.3.4 Concepção do modelo

Após a definição dos motores, dos graus de movimento e dos ângulos de mobilidade, foi executada a construção de um modelo matemático em 3D, utilizando-se de software CAD SolidWorks, para observação das características de mobilidade e dimensionais necessárias para adaptação dos motores e também o desenvolvimento de cada um dos mecanismos de transmissão de movimento dos atuadores.

Figura 17 – Modelo do protótipo



Fonte: O autor

Esta modelagem foi utilizada para observar a maneira como se moveriam as juntas do protótipo e também para verificar a presença de interferências que poderiam ser inconvenientes no momento da montagem.

A modelagem do sistema de transmissão por meio de hastes e alavancas foi útil para verificar qual seriam suas dimensões, as angulações do movimento e as forças exercidas pelos componentes, pois ela deveria ser limitada, a fim de minorar as dimensões do perfil da haste.

Com o modelo 3D foi facilitada a observação dos componentes que sofrem maiores esforços, ficando simples seu dimensionamento por meio de simulações realizadas utilizando perfis existentes no mercado.

#### 3.3.4 Estudos do modelo

a) Antebraço: no modelo estudado ficou claro que, considerando-se que a carga fosse aplicada na ponta do antebraço como esperado, este elemento estaria submetido apenas a um



esforço de flexão simples, em qualquer posição, e também sofreria menores esforços devido ao momento-fletor causado pela carga.

- b) Braço: observa-se um momento aplicado ao mesmo, sempre que o antebraço estiver fletido, causando, além de um esforço de flexão, também um de torção, criando assim uma flexo-torção no elemento.
- c) Base: a base do modelo foi construída em perfis tubulares redondos, ligados com juntas soldadas. A utilização do perfil tubular redondo nesta estrutura se deve ao fato de que estes perfis têm excelente desempenho em flexão, independente da direção do esforço.
- d) Suportes: os suportes de motores, como também o componente de articulação de ombro do modelo, deveriam ser montados a partir de chapas planas, pois cada um desses componentes deveria ser construído de forma fácil e com o menor custo possível.

Com as devidas adequações, o modelo ficou reduzido a apenas três tipos de perfis e uma chapa de espessura única em toda a estrutura, tornando mais prática e econômica a construção.

- a) Tubo retangular de aço: braço, antebraço e pés.
- b) Tubo redondo de aço: base.
- c) Barra chata: alavancas, hastes e controles.
- d) Chapa lisa: ombro, suportes e reforços.

### 3.3.5 Coeficiente de segurança

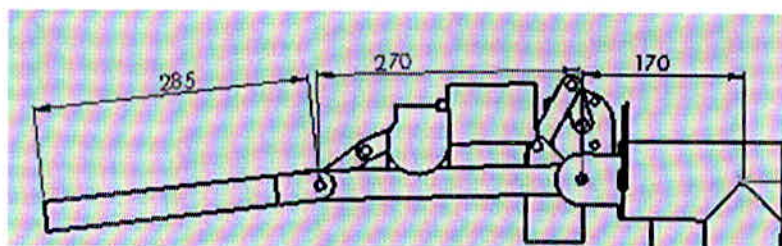
De acordo com a NBR 8400 (1984), pode-se definir a classe de utilização deste guindaste como sendo A, devido ao baixo índice de utilização com longos períodos de repouso, e seu estado de carga poderia ser definido como 0, devido à baixa carga que é utilizada, raramente sendo empregada cargas próximas a nominal. Sendo assim, de acordo com a norma citada, tem-se a classificação dos elementos de estrutura como sendo 1, que define que o coeficiente de majoração para este tipo de equipamento é igual a 1. Isto quer dizer que, para utilização nas condições descritas, não se aplica majoração ao equipamento, porém, devido ao local de utilização do equipamento em questão, que se dará em demonstrações em ambiente estudantil e feiras, próximo de grande número de pessoas, para a proteção dos mesmos será adotado fator de segurança superdimensionado igual a 3, evitando acidentes com estudantes e visitantes.

### 3.3.6 Esforços nos elementos estruturais

Utilizando do modelo desenvolvido em CAD, foi executada simulação por meio da ferramenta FEA. Tanto o desenho quanto a simulação de esforços utilizaram o software Solidworks.

Para o dimensionamento dos elementos estruturais do manipulador, foi realizado o dimensionamento a partir do momento fornecido pelos motoredutores utilizados, que podem ter valores de pico de 38 N.m. Sendo assim, podem-se mensurar os esforços nos elementos do equipamento, assim como a carga suportada por ele, por meio dos estudos descritos a seguir.

Figura 18 – Dimensões dos dispositivos submetidos à flexão



Fonte: O autor

O modelo foi criado para se assemelhar à mecânica da anatomia humana, a fim de criar uma identidade aprimorada de movimentação. Por este motivo foram utilizadas medidas que se aproximam das do braço humano, (Figura 14) sendo o antebraço com 285 mm e o braço com 270 mm, e ambos somados criam uma alavanca de 555 mm.

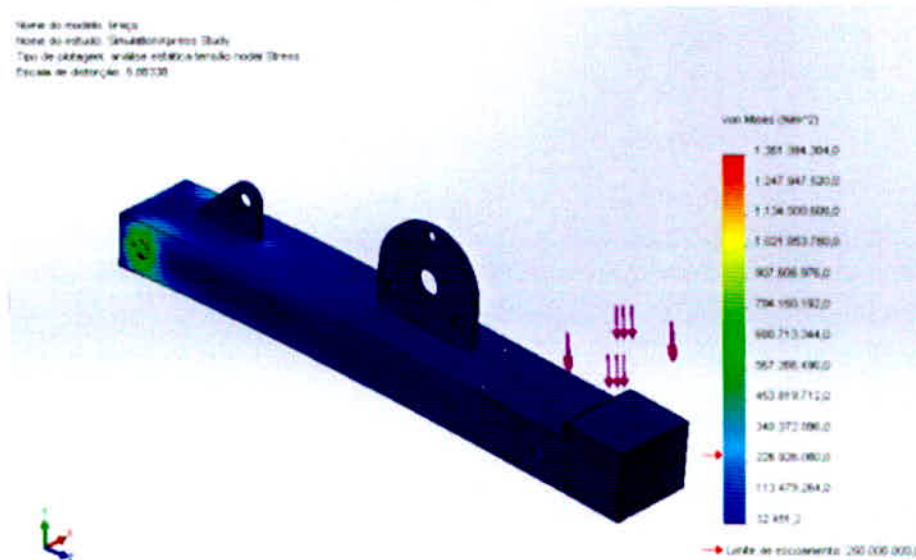
a) Perfil tubular retangular: pelo fato de a articulação entre o braço e o ombro criar movimento de 90°, sendo que o mecanismo de alavanca e haste possibilita um movimento máximo de 180°, pode ser utilizada alavanca de transmissão no motor de comprimento igual à metade da alavanca do ponto de fixação no braço, com isso dobrando o torque fornecido pelo motor. Portanto, a articulação teria um momento de 76 N.m aplicado no sentido da menor dimensão do perfil.

Com base nestas observações pode-se realizar simulação de aplicação de um momento fletor devido à atuação da junta de ombro e braço. Esta simulação pode ser realizada por meio da aplicação de uma força na extremidade do braço, capaz de causar o momento esperado, multiplicado pelo coeficiente de majoração 3.

$$F = 3 * \left( \frac{76}{0,27} \right) = 844,44 \text{ N} \quad (4)$$

Conforme equação 4, pode-se aplicar uma força de 844,44 N na extremidade do braço, para causar um momento fletor de 3 vezes 76N.m, que seria o torque do motor, com mecanismo de redução e dividido pela alavanca da peça multiplicado pela majoração.

Figura 19 - Simulação de esforço de flexão no braço



Fonte: O autor

O momento atuando sobre o braço nesse sentido causará uma força na extremidade do antebraço, capaz de erguer uma carga com força igual a  $F$ , mostrada na equação 5, sendo proporcional ao momento. Esta força pode ser utilizada para erguer a estrutura acrescida de uma carga.

$$F = \frac{76}{0,555} = 136,94 \text{ N} \quad (5)$$

Esta força de 136,94N seria a maior carga suportada pela estrutura, pois esta seria a posição em que o maior momento seria aplicado.

Por meio de análise de movimento realizada no modelo utilizando-se o software de modelagem, foi observado que a estrutura também poderia sofrer esforço de flexo-torção, causado quando houvesse uma força aplicada ao cotovelo, tendo seu máximo quando o mesmo fosse fletido em 90°. Esta força seria também proporcional ao momento do motor, sendo que, neste caso, tem-se o momento aplicado diretamente à articulação entre o ombro e a base de apoio, pois o mesmo tem movimentação de 180°.

Considerando o cotovelo em  $90^\circ$  e o momento de 38 N.m aplicado à junta entre ombro e base, tem-se uma força de torção igual ao momento do motor no braço, somada a uma força de flexão causada pela reação de apoio na extremidade do antebraço, que seria de 133,33 N, conforme equação 6.

$$F = \frac{38}{0,285} = 133,33N \quad (6)$$

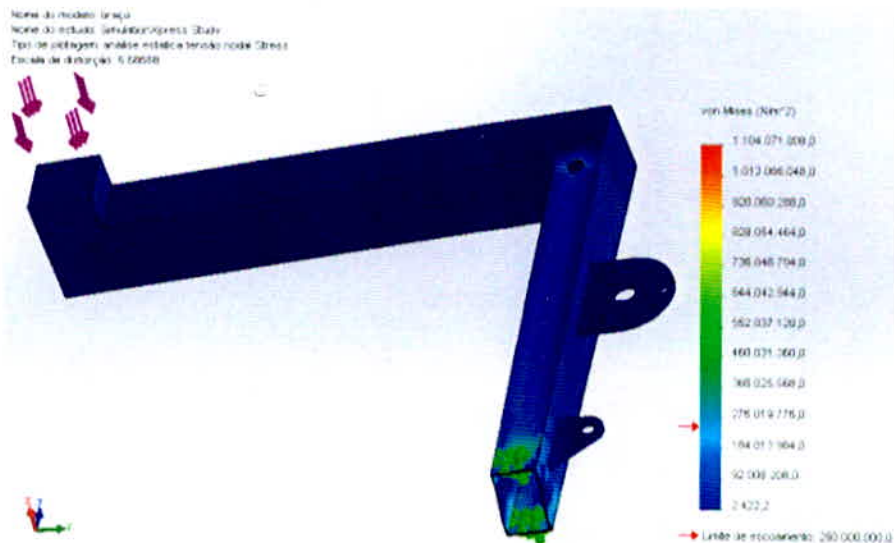
$$M = 133,33 * 0,27 = 36N \cdot m \quad (7)$$

Assim, tem-se torção com momento igual a 36 N.m, conforme equação 7 e momento fletor de 38 N.m, aplicado à estrutura do braço.

O esforço aplicado ao braço, neste caso, pode ser traduzido a uma única força aplicada na extremidade de dispositivo feito para simular a alavanca do antebraço atuando sobre o braço e tendo em vista o momento de 38 N.m, e a alavanca de 285 mm do antebraço, sem se esquecer do coeficiente de segurança, conforme equação 8.

$$F = 3 * \left( \frac{38}{0,285} \right) = 800N \quad (8)$$

Figura 20 – Flexo-torção aplicada ao braço



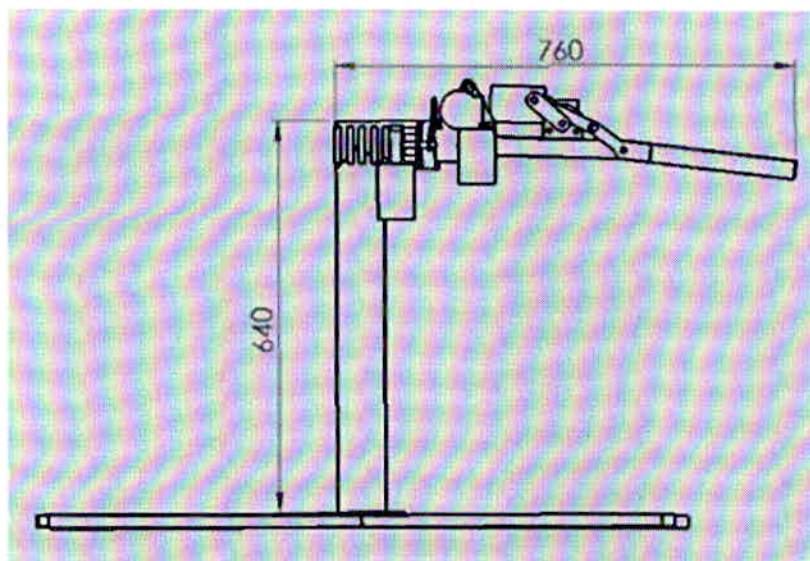
Fonte: O autor

A estrutura do antebraço, em todas as posições, tem apenas esforço de flexão, sendo abaixo do sofrido pelo braço. Dessa forma, o ponto de maior esforço sofrido pelo perfil tubular quadrado está localizado no braço, permitindo que o ensaio seja realizado apenas neste elemento, não havendo esforço maior sofrido pelos elementos retangulares.

Com base no teste de diversas configurações de perfis retangulares, o perfil mais adequado seria o de 30 X 50 mm com parede de 1 mm de espessura, que atende de maneira eficiente a todos os testes e simulações.

b) Tubo redondo: para fazer a sustentação de toda a estrutura, é necessário um elemento que suporte o esforço do braço, somado ao peso da estrutura e carga, que causa momento fletor. Para encontrar os esforços causados na base, é possível analisar o momento de maior amplitude exercido pelos motores, sendo o mesmo de 76 N.m, utilizado para calcular a força de atuação na extremidade da base.

Figura 21 – Dimensões globais da estrutura



Fonte: O autor

Na extremidade do antebraço, tem-se uma força que, já majorada devidamente, é de 844,44 N, conforme equação 4. Esta força causa um momento na extremidade superior da base que pode ser calculado na equação 9, conforme medidas da Figura 21.

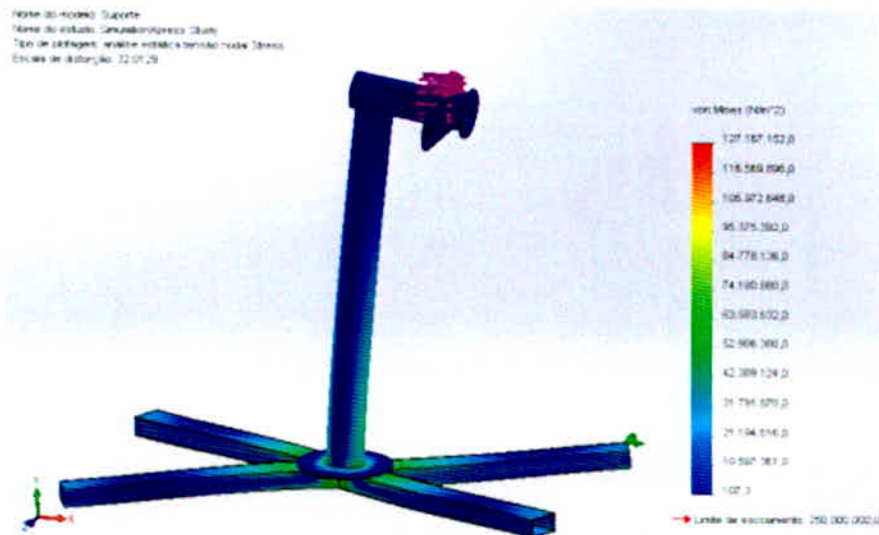
$$M = 0,76 \times 844,44 = 642,77 \text{ N.m} \quad (9)$$

Utilizando o momento da equação 9 e a alavanca causada pela altura da base, pode-se calcular a força que pode ser aplicada horizontalmente na articulação de ombro e base, simulando os esforços da base do equipamento.

$$F = \frac{642,77}{0,64} = 1002,77 \text{ N} \quad (10)$$

A equação 10 deu origem à força aplicada horizontalmente no modelo por meio da simulação, conforme Figura 22.

Figura 22 – Simulação de carga na base



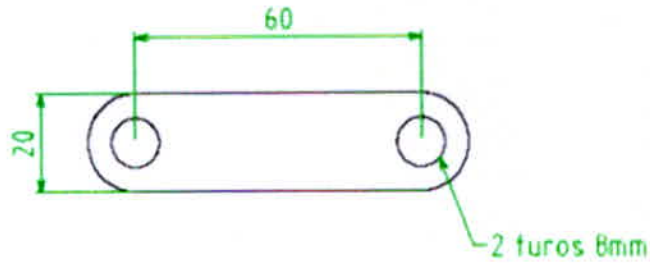
Fonte: O autor

Após avaliação dos resultados da simulação, o tubo de 60 mm de diâmetro e a parede de 3 mm de espessura se mostraram os mais adequados.

c) Barra chata: este perfil precisa resistir ao esforço de flexão sofrido pelas alavancas e o de compressão e tração da barra nas hastes, havendo a necessidade de realização de duas simulações.

Simulação de flexão com momento fletor igual ao torque de 38 N.m, fornecido pelo motor, pois não há nenhum mecanismo intermediário entre o eixo do motor e a alavanca.

Figura 23 – Alavanca de acionamento do motor

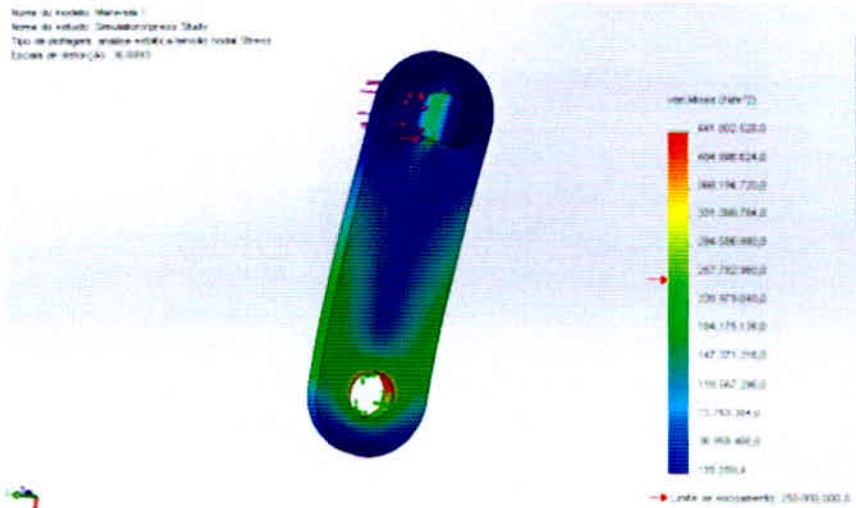


Fonte: O autor

O momento aplicado a uma extremidade da alavanca causa um esforço na outra extremidade, de força calculada conforme equação 11, sem esquecimento do coeficiente 3.

$$F = 3 * \left( \frac{38}{0,06} \right) = 1900 N \quad (11)$$

Figura 24 – Simulação de esforço na alavanca do motor

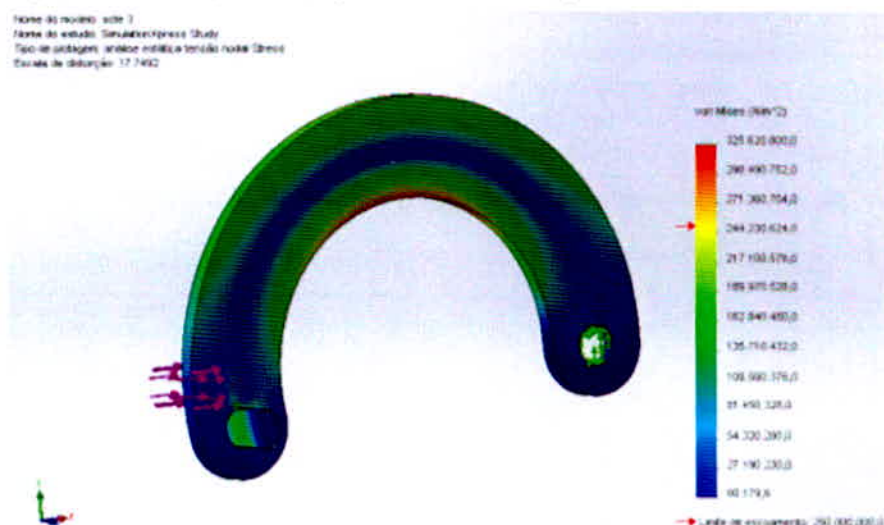


Fonte: O autor

Como segunda simulação, a haste mais vulnerável devido à sua forma foi submetida à força causada pelo momento do motor aplicado a uma alavanca de 50 mm, acrescida do coeficiente de segurança 3, demonstrado na equação 12.

$$F = 3 * \left( \frac{38}{0,05} \right) = 2280 N \quad (12)$$

Figura 25 – Simulação de esforço na haste da articulação ombro/base



Fonte: O autor

Para a utilização em alavancas e hastes, ficou definida a utilização da barra chata de 1" X 3/16", capaz de suportar todos os esforços necessários

### 3.3.7 Comandos

Utilizando os movimentos executáveis pelo sistema, iniciou-se a fase de projeto da estrutura de comando do protótipo, que utilizou os movimentos do braço humano como modelo da movimentação do manipulador.

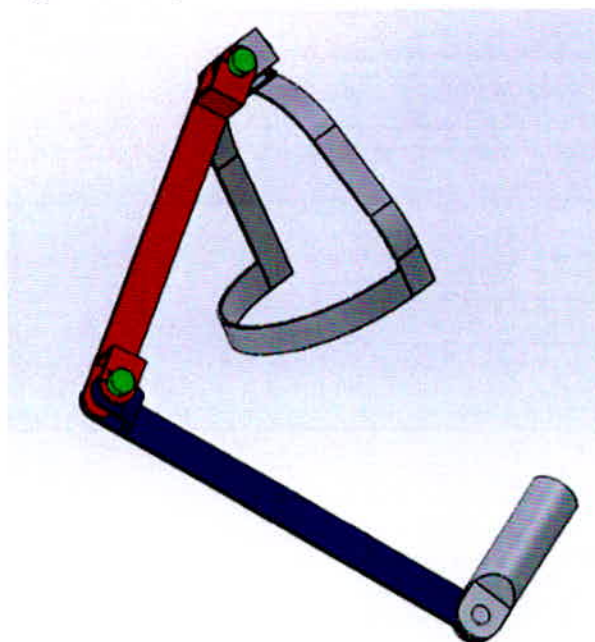
Para a execução dessa tarefa, é necessário que o sistema leia a posição das articulações do braço do operador a todo momento, para fornecer informações úteis ao processamento dos dados.

Para tal função, é necessária a instalação de sensores tanto nas articulações do braço do operador quanto nas articulações do braço mecânico, para que o sistema de controle possa comparar suas posições e corrigi-las adequadamente.

Na captação dos movimentos do braço do operador, a estrutura projetada tem sensores instalados em cada articulação, para referenciar o posicionamento do membro. A estrutura foi elaborada para que o operador segure um manete e, ao mover seu braço, a estrutura assumira posição semelhante das articulações do braço do operador (Figura 26).



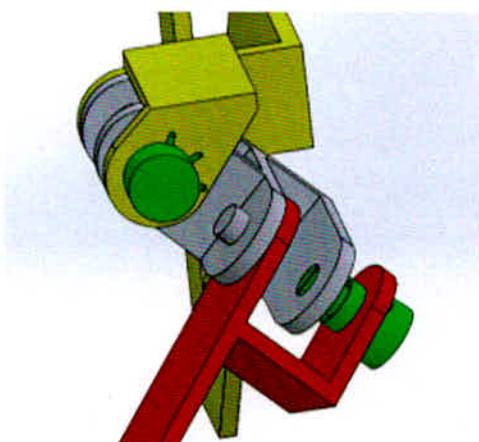
Figura 26 – Dispositivo de comando



Fonte: O autor

Os sensores são instalados nas articulações para apresentar movimento no eixo, equivalente ao exercido pela articulação, conforme detalhado na Figura 27.

Figura 27 – Sensores instalados nas articulações de comando



Fonte: O autor

Dessa forma, a única ligação entre o operador e o manipulador seria eletrônica, fazendo com que o operador possa estar distante vários metros do equipamento, para afastar riscos físicos, radiológicos, químicos e biológicos, entre outros.

### 3.3.8 Lógica de comando

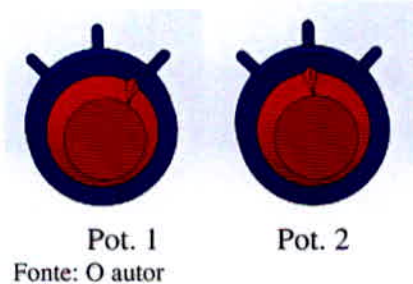
A lógica envolvida na operação do dispositivo deve ser capaz de perceber toda a mudança de posicionamento executada na articulação do braço do operador, transformando esta informação em comando para o manipulador, a fim de que o braço mecânico possa assumir posição semelhante ao comando.

Este sistema tem o objetivo de permanecer sempre em situação de equilíbrio entre o comando e o manipulador, fazendo com que o movimento do comando cause movimento motriz no manipulador, com o objetivo secundário de atingir o equilíbrio de posicionamento entre os dois mecanismos.

Para atingir esta funcionalidade, é preciso fazer algumas considerações a respeito do posicionamento dos sensores do comando e do manipulador. Considerando que o terminal esquerdo dos potenciômetros está ligado a 0 e o terminal direito está a V+, são observadas três situações distintas entre as voltagens de saída dos potenciômetros de comando e o do manipulador, que são:

a) Situação 1: Posição de Pot. 1 avançada em relação ao Pot. 2

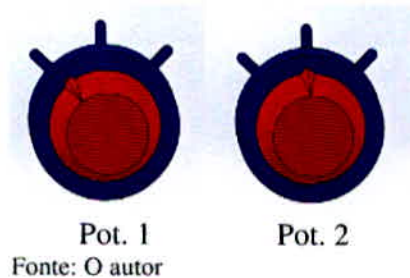
Figura 28 - Potenciômetro 1 avançado em relação ao 2



A medida de tensão do pino central de Pot. 1 estará elevada em relação à medida de Pot. 2.

b) Situação 2: Posição de Pot. 1 defasada em relação ao Pot. 2

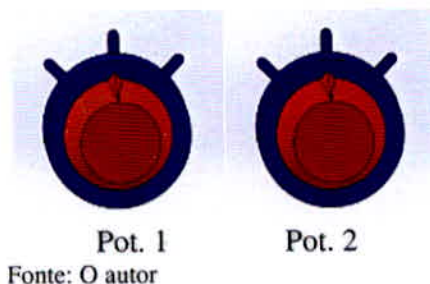
Figura 29 - Potenciômetro 1 defasado em relação ao 2



A medida de tensão do pino central de Pot. 1 estará defasada em relação à medida de Pot. 2.

c) Situação 3: Quando têm-se Pot. 1 e Pot. 2 com mesma posição.

Figura 30 – Potenciômetros 1 e 2 iguais



Nesta situação, quando se meda a tensão dos sensores, tem-se igualdade entre elas.

Tendo em vista estas três situações, pode-se utilizar as medidas dos sensores para criar um sistema que seja capaz de girar um motor sentido horário na situação 1, rodar sentido anti-horário na situação 2 e manter-se estático na situação 3.

Sendo assim, se instalar-se o Pot. 1 na articulação do braço do operador e Pot. 2 na articulação do braço do manipulador, pode-se fazer com que, quando o operador estenda o braço, o Pot. 1 altere o valor criando uma situação de incremento ou decremento de tensão em relação ao Pot. 2, comandando o motor do manipulador a acionar até que haja situação de equilíbrio entre as duas tensões novamente, devido ao fato de que o motor também moverá o Pot. 2, até que o mesmo seja regulado até a posição de repouso do sistema.

### 3.3.9 Controlador Lógico Programável

Devido às características de custos reduzidos que deveriam englobar o projeto, a plataforma programável utilizada não poderia ser do tipo industrial, pois plataformas com essa característica têm custo elevado.

Uma opção que vem tornando viável a concretização de vários projetos experimentais devido ao baixo custo e facilidade de programação é a plataforma ARDUINO, pois tem características interessantes que tornam viável a execução dos comandos lógicos necessários. A família ARDUINO abrange várias plataformas com recursos diferenciados e, por meio de análise das especificações partindo do modelo mais simples, foi detectada a compatibilidade do ARDUINO UNO para utilização neste sistema, apresentando as características descritas no Quadro 1.

Quadro 1: Especificação técnica ARDUINO UNO

|  |   |
|--|---|
| <b>Microcontrolador</b>                | ATmega328   |
| <b>Tensão de funcionamento</b>         | 5V  |
| <b>Tensão de entrada (recomendado)</b> | 7-12V   |
| <b>Tensão de entrada (limites)</b>     | 6-20V   |
| <b>Digital I / O pins</b>              | 14 (dos quais 6 oferecem saída PWM)                                   |
| <b>Pinos de entrada analógica</b>      | 6   |
| <b>Corrente DC por I / O Pin</b>       | 40 Ma   |
| <b>Corrente DC 3.3V para Pin</b>       | 50 Ma   |
| <b>Memória Flash</b>                   | 32 KB ( ATmega328 ) dos quais 0,5 KB utilizado pelo <i>bootloader</i> |
| <b>SRAM</b>                            | 2 KB ( ATmega328 )  |
| <b>EEPROM</b>                          | 1 KB ( ATmega328 )  |
| <b>Velocidade do relógio</b>           | 16 MHz  |

Fonte: adaptado de ARDUINO (2015).

Foram satisfeitas todas as necessidades do sistema por esse modelo, inclusive a sua voltagem de trabalho e capacidade de memória, ainda com a vantagem de o mesmo ser o mais barato entre todos.

A partir dessa escolha, foi preciso iniciar a elaboração do programa necessário para a movimentação adequada do protótipo.

### 3.3.10 Programação

Para alinhar o funcionamento dos servomotores com o do manipulador, foi desenvolvida programação para esta função. Esta programação pode ser aplicada ao servomotor com o objetivo de usá-lo em mecanismos e dispositivos em diversas outras funções.

A escrita do programa deveria atender ao critério básico de sentido de rotação, mas também outras funções mais complexas, como aceleração e desaceleração dos movimentos, para que estes sejam executados mais suavemente.

Sendo assim, a pergunta básica que a programação deveria executar seria se o sinal de um potenciômetro está maior que o outro. Se a resposta for positiva, ele movimenta o motor

para o sentido que equilibra a posição do potenciômetro. Esta parte do programa pode ser simbolizada pelas expressões 1 e 2.

$$\text{SE "pot1" > "pot2", "PWM1" acionado máximo} \quad (1)$$

$$\text{SE "pot1" < "pot2", "PWM2" acionado máximo} \quad (2)$$

Esta ordem definiria qual sentido de rotação os motores deveriam tomar, porém, devido à dificuldade de posicionamento causada pela inércia dos motores quando em movimento, os mesmos tenderiam a passar do ponto de posicionamento, criando uma situação em que a direção do motor deveria ser invertida, causando uma dificuldade de posicionamento do mecanismo.

Para controlar a velocidade para que as paradas fossem menos bruscas, foi adicionada uma ordem ao sistema que utiliza da amplitude da diferença de potencial gerada entre os sensores, para regular a velocidade do motor, fazendo com que a partida e a parada sejam suaves, pois, quanto mais próximos, maior será o decremento da velocidade.

Foi criada uma variável de nome velocidade expressa em módulo (expressão 3).

$$\text{"velocidade"} = | (\text{"pot1"} - \text{"pot2"}) * 10 | \quad (3)$$

Essa informação é utilizada para regular a velocidade do motor conforme expressões 4 e 5.

$$\text{SE "pot1" > "pot2", "PWM1" acionado com intensidade = "velocidade"}. \quad (4)$$

$$\text{SE "pot1" < "pot2", "PWM2" acionado com intensidade = "velocidade"}. \quad (5)$$

Sendo assim, ocorre que, quando uma das duas condições é satisfeita, o motor gira na direção correspondente, numa velocidade compatível com a diferença de potencial entre os potenciômetros, sendo multiplicado por uma constante que, neste caso, vale 10, para adequar o sinal.

Para o melhoramento do ponto de parada, evitando que o manipulador execute movimentos desnecessários, foi introduzido um ponto de parada nos momentos nos quais o valor da variável não esteja em um intervalo designando.

Para tanto, foi inserida mais uma expressão à programação, em que existe um intervalo no qual o programa não executa nenhuma ação, por meio da expressão 6.

$$SE (\text{modulo de "velocidade"}) < 5, \text{ loop.} \quad (6)$$

Com esta condição, em um intervalo no qual a diferença de potencial entre os sensores for menor que 10, o valor do movimento será zerado. Sendo assim, pode-se ter um controle de sensibilidade totalmente digital, em todos os aspectos do sistema, resolvendo o problema da parada abrupta e da oscilação no ponto de equilíbrio do sistema.

### 3.3.11 Fabricação do Protótipo

Após a modelagem matemática do protótipo em Solidwork, foram gerados os desenhos técnicos em 2D, conforme conteúdo do anexo A, para a fabricação do protótipo.

O modelo do protótipo foi planejado de forma a facilitar sua fabricação manual utilizando os meios disponíveis para a sua execução, sendo utilizadas ferramentas de menor complexidade, como serra policorte, furadeira de bancada, lixadeira e máquina de solda a eletrodo revestido.

A fabricação seguiu algumas etapas, conforme descrição a seguir:

- a) execução do corte de todos os componentes, seguindo as informações contidas em desenho;
- b) montagem de estruturas soldadas;
- c) execução das furações de união das juntas;
- d) montagem da estrutura;
- e) montagem dos motores;
- f) montagem dos mecanismos de transmissão;
- g) montagem dos sensores;
- h) instalação da parte eletrônica de comando dos motores.

### 3.3.12 Custos de Produção

Os custos de construção do protótipo puderam ser reduzidos por meio de doações e empréstimos de equipamentos por parte de colaboradores anônimos, sendo utilizado menor volume de recursos próprios. No Quadro 2 descrevem-se os materiais empregados, incluindo os valores de itens doados ou emprestados.

Quadro 2: Valores dos componentes do protótipo

| Descrição            | Quantidade | Valor unitário | Total      | Origem     |
|----------------------|------------|----------------|------------|------------|
| ARDUINO UNO          | 1          | R\$ 50,00      | R\$ 50,00  | Adquirido  |
| Potenciômetro de 20K | 6          | R\$ 3,20       | R\$ 19,20  | Adquirido  |
| Foto acoplador 4N35  | 6          | R\$ 3,50       | R\$ 21,00  | Adquirido  |
| diodo in4007         | 6          | R\$ 0,60       | R\$ 3,60   | Adquirido  |
| Mica                 | 12         | R\$ 0,30       | R\$ 3,60   | Adquirido  |
| IRF 540              | 6          | R\$ 5,00       | R\$ 30,00  | Adquirido  |
| IRF 9540             | 6          | R\$ 5,00       | R\$ 30,00  | Adquirido  |
| Placa de fenolite    | 1          | R\$ 18,00      | R\$ 18,00  | Adquirido  |
| Estanho              | 1          | R\$ 25,00      | R\$ 25,00  | Adquirido  |
| Resistores           | 24         | R\$ 0,15       | R\$ 3,60   | Adquirido  |
| Metalon 50x30x1 mm   | 2,4        | R\$ 6,00       | R\$ 14,40  | Adquirido  |
| Eletrodo 7018        | 1          | R\$ 15,00      | R\$ 15,00  | Adquirido  |
| Tubo de 60x3 mm      | 15         | R\$ 0,60       | R\$ 9,00   | Doação     |
| Bateria de 12v 45 ah | 1          | R\$ 250,00     | R\$ 250,00 | Empréstimo |
| Disco de desbaste    | 1          | R\$ 6,00       | R\$ 6,00   | Doação     |
| Disco de corte       | 4          | R\$ 5,00       | R\$ 20,00  | Doação     |
| Motores              | 3          | R\$ 150,00     | R\$ 450,00 | Doação     |
| Total                |            |                | R\$ 968,40 |            |
| Descontos            |            |                | R\$ 735,00 |            |
| Total Real           |            |                | R\$ 233,40 |            |

Fonte: O autor

Por meio destes custos é possível calcular o valor médio de cada movimento que, neste caso, excluindo-se a bateria que não necessitaria ser substituída no caso de adição de mais movimentos, é de R\$239,47, para cada movimento. Porém, este valor pode ser alterado de acordo com o tipo de construção do equipamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento deste projeto abre precedentes para diversas aplicações que podem utilizar essa tecnologia para melhorar vários aspectos da vida do homem, sendo os principais a segurança e a saúde, e também ampliar o alcance da sua atuação a regiões inabitáveis.

### 4.1 Desempenho do Protótipo

O equipamento construído apresentou características que ficaram acima das expectativas, principalmente em relação à velocidade, à precisão da parada e à assimilação rápida da operação. Porém, também foi possível observar algumas deficiências na estabilidade, na compatibilidade estrutural do comando com muitos operadores e na quantidade de movimentos, que podem ser objeto de estudos futuros nesta área.

#### 4.1.1 Pontos Positivos

a) Velocidade: em relação à velocidade de resposta e movimentação foram obtidos resultados que surpreenderam principalmente em relação à resposta, mesmo tendo em vista que os mecanismos de transmissão visam à transferência da máxima velocidade possível, devido à rotação elevada transmitida ao sistema.

Em relação ao tempo de resposta, seu desempenho é de um nível que impressiona, pois se tem a sensação de resposta em tempo real, não sendo perceptível o atraso de resposta a olhos menos atentos.

É importante salientar que foi introduzida linha no programa, representada pela expressão 6, que cria um intervalo considerável de ociosidade no sistema, em que os movimentos do operador não criam movimento no manipulador e, mesmo com isso, a resposta se opera de maneira a ser percebida como quase instantânea.

b) Precisão de parada: este ponto merece atenção especial, principalmente se considerarmos que este equipamento não é provido de freios, contando apenas com a redução de velocidade obtida pela criação de campo magnético no próprio motor, oriundo do fluxo de eletricidade causado pela inércia do mesmo, além de pequeno contragolpe, quando ultrapassado o ponto de parada.

As expectativas iniciais eram de paradas que seriam antecidas por pequena vibração perceptível, porém, os diodos de proteção da ponte "H" atuam de maneira a permitir o



fluxo de eletricidade internamente nos motores, que causam uma força contrária ao movimento quando se diminui o fornecimento de eletricidade ao motor, criando uma força de frenagem que se torna maior de acordo com o crescimento da velocidade do movimento.

- c) Assimilação rápida de operação: foi observado que a maioria das pessoas que se dispuseram a tentar operar o sistema assimilou rapidamente a dinâmica de operação do equipamento. Isto se deve, principalmente, ao comando por replicação, que lê a posição das articulações do operador.

Vale salientar que, apesar de o número de movimentos desenvolvidos pelo equipamento ser bastante inferior ao do braço humano verdadeiro, a identidade do operador com o braço ocorre em questão de segundos.

#### 4.1.2 Pontos Negativos

- a) Estabilidade do posicionamento: durante os testes foi observada pequena instabilidade na parada, quando o equipamento experimenta leve desequilíbrio no posicionamento entre o comando e o manipulador. Porém, quando a posição se equilibra, esta instabilidade traduzida em pequena oscilação de movimento desaparece.

A oscilação pode ser causada por dois motivos:

- interferências externas no sinal dos sensores;
- deficiência de programação.

No caso da interferência, poderia ser utilizada filtragem com capacitores, a fim de estabilizar o sinal emitido.

Já para a programação, deve ser dada atenção para a questão da velocidade mínima de atuação do motor, pois, em situações nas quais ocorre uma carga aplicada ao manipulador, em que o software não tem sinal de saída compatível com o torque necessário, pode ocorrer um conflito entre a carga e o momento do motor, que não conseguem se equilibrar.

- b) Compatibilidade do comando com o operador: esta situação fica agravada devido ao fato de as dimensões anatômicas de cada ser humano serem diferentes de um para outro. Com isso, existe uma dificuldade no que diz à operação do sistema por vários operadores, pois a estrutura de comando não se encaixa em todos os operadores. A alternativa seria criar estrutura de comando ajustável, que poderia ser compatível com maior número de biofísicos.

- c) Quantidade de movimentos: a quantidade de movimentos executada pelo protótipo é reduzida em relação à quantidade possível de ser executada pelo braço humano. Com isso, ocorre que, em algumas situações, observam-se dificuldades na assimilação do movimento do operador por parte do manipulador, criando confusão na operação. Pelas observações, é notado que os movimentos que mais fazem falta para o manipulador são os de rotação de braço e antebraço, além de uma garra ou mão acoplada à extremidade.

## 4.2 Áreas de Aplicação

É possível citar algumas áreas que podem utilizar esta tecnologia com vantagens do ponto de vista financeiro, de segurança, operacionais e estratégicos. Estas possíveis aplicações são apenas um breve deslumbre sobre as diversas áreas de utilização de tecnologia que seja fruto destes estudos.

### 4.2.1 Saúde

Existem muitas aplicações que podem se beneficiar com esta tecnologia na saúde. Isto já vem ocorrendo com a utilização de manipuladores específicos para cirurgias, que utilizam tecnologia de replicação de movimentos aplicados a ferramentas remotamente controladas.

Podem-se citar algumas outras situações em que esta tecnologia poderia ser aplicada para a melhoria dos sistemas já existentes ou de maneira mais inovadora. São elas:

- a) cirurgias: esta tecnologia que vem auxiliando grande número de pacientes ainda pode ser aprimorada por meio da utilização da replicação total do movimento braquial por parte do manipulador, dando uma liberdade ainda maior à cirurgia e modificando o modo de execução deste procedimento, pois, em vez de atuar sobre ferramentas, agora a atuação poderia ser executada de forma direta, como se o cirurgião tocasse diretamente os tecidos;
- b) consultas: pode-se utilizar um modelo mais completo de equipamento que possa servir para a atuação remota do profissional da saúde, a fim de criar uma situação de presença remota, que pode ser útil em situações nas quais ele não pode estar presente, por riscos biológicos ou por estar distante do local de atuação;
- c) fisioterapia: esta replicação de movimento poderia ser utilizada de forma a auxiliar pacientes em reabilitação a recuperarem seus movimentos, de forma que possam observar o profissional de fisioterapia se movendo, ao mesmo tempo em que um manipulador acoplado execute esforço que move o braço do paciente para a posição que o membro do

fisioterapeuta se encontra. Com isso, a associação se tornaria muito mais rápida, além de diminuir os esforços que, muitas vezes, causam lesões aos profissionais.

Uma importante tecnologia que é sugerida por este projeto vai ao encontro do principal problema, que faz com que muitas outras técnicas não sejam acessíveis a todos e que diz respeito ao custo, pois abrange a utilização de um tipo de servomotor que poderia ser construído a baixo custo, devido aos tipos de componentes utilizados.

#### 4.2.2 Seguimento Militar

Pode ser aplicada esta tecnologia para evitar a exposição de seres humanos a riscos de morte, criando uma situação de presença virtual no local onde haja conflitos.

Para tanto, pode ser criado modelo que seja capaz de realizar a maioria dos movimentos dos membros superiores do homem, e se deslocar com facilidade dentro das regiões de atuação, podendo interagir com ambientes criados para o homem. Este modelo seria controlado a distância por um ser humano treinado militarmente, que ficaria em local seguro.

Esta plataforma seria utilizada de maneira semelhante aos veículos aéreos não tripulados (VANTs), porém, em aplicações terrestres e com a vantagem de poder interagir com o meio ambiente, de maneira semelhante ao ser humano. Poderia ser utilizado para operar remotamente máquinas, armas ou equipamentos, além da aplicação médica que também se dá militarmente.

#### 4.2.3 Segurança Laboral

Talvez, a maior vocação do sistema se aplique à segurança laboral do trabalhador nas mais diversificadas áreas. Com o controle de manipuladores desse tipo remotamente é possível eliminar totalmente o risco de atividades como a área de energia nuclear, em que ainda ocorrem deficiências em relação à segurança do trabalhador, o qual é exposto a situações de risco eminente de contaminação radioativa.

Esta aplicação não somente teria benefícios à qualidade de vida dos colaboradores, como também traz retorno, em médio prazo, do investimento, pois sua aplicação implicaria no não pagamento de encargos relacionados à insalubridade ou à periculosidade de atividades, além de tornar desnecessárias as medidas de jornada reduzida de trabalho ou de descansos em

atividades penosas, pois o peso destas estaria sobre os ombros da máquina, poupando o ser humano.

#### 4.2.4 Movimentação de cargas

Guindastes são utilizados para o erguimento de cargas pesadas a alturas muito elevadas, para a construção de prédios ou pontes ou movimentação de cargas em carregamento de navios e posicionamento de peças pesadas.

Esses equipamentos, devido ao tipo de operação por botões e alavancas, podem sujeitar o operador a erros que são causadores de acidentes que podem produzir ferimentos e morte dos envolvidos. Outra desvantagem desse tipo de operação é a velocidade, que tem de ser limitada para diminuir os riscos, além de o número de comandos que podem ser executados simultaneamente ser reduzido à quantidade de mecanismos que o operador consegue utilizar simultaneamente.

No caso da operação por comando direto do braço do operador, tem-se vantagem em relação à menor possibilidade de acidente, devido à diminuição da possibilidade de erro de operação, pois, quando o operador move seu braço para a direita, o guindaste também se move para a direita. Com isso, torna mais difícil a ocorrência de enganos na operação.

Esta intuição do movimento pode ser utilizada para dar mais segurança à operação do equipamento, que por sua vez pode ser aplicada para aumentar a potência dos guindastes, dando mais velocidade aos equipamentos. Assim, ter-se-á uma operação mais rápida por dois motivos. Um seria a intuição de movimentação e outro, a maior velocidade possível de ser utilizada no equipamento.

É importante salientar a fácil adaptabilidade desses equipamentos com sistemas hidráulicos, o que seria muito conveniente em guindastes.

### 4.3 Publicações e Eventos

Para melhorar a visibilidade do projeto e do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, e também aprofundar os estudos a respeito do assunto, este trabalho foi inscrito em várias feiras e congressos, em âmbito municipal, estadual, nacional e internacional, listados a seguir.

- a) FEICINTEC 2014: primeira apresentação, em evento desse tipo, de um trabalho envolvendo este tema. Teve a participação dos alunos do curso de Engenharia Mecânica do

8º período Eldrick D` Martins, Mike Gomes de Moura, Orlando Junior Leonel Martins, Paulo Carvalho Souza e Wagner Roberto da Silva, orientados pelo professor Alexandre de Oliveira Lopes, os quais auxiliaram na confecção do protótipo e também na elaboração do trabalho apresentado.

Feira realizada pelo CREA-MG, no intuito de promover a criatividade e o espírito de inovação, da qual podem participar alunos dos cursos de graduação de abrangência do CREA, dentro do estado de Minas Gerais.

Este evento teve sua segunda edição realizada nos dias 10 e 11 de dezembro de 2014, na sede do CREA-MG, em Belo Horizonte, com a participação de 40 trabalhos qualificados entre os 136 inscritos. O trabalho foi classificado em 7º lugar, superando as expectativas, além do recebimento de prêmio em dinheiro no valor de R\$2.000,00.

- b) II Congresso de Fisioterapia UNIS-MG: com auxílio do coordenador do curso de Engenharia Mecânica foi realizada breve apresentação para demonstrar a aplicabilidade deste sistema na fisioterapia, conforme descrição na seção 421 alínea a, no dia 26 de maio de 2015, na Cidade Universitária do UNIS-MG. Foi realizada apresentação prática demonstrando o funcionamento do protótipo.
- c) I Congresso Internacional ACINET: foi elaborado artigo científico para apresentação neste congresso, que se realizou nos dias de 4 a 9 de maio de 2015, na Cidade Universitária do UNIS-MG, com o objetivo principal de demonstrar os aspectos técnicos funcionais do sistema e suas diversas aplicações. Esta apresentação rendeu ainda uma publicação de artigo na revista UIIPS (ISSN 2182-9608).
- d) 10º Seminário Anual de Iniciação Científica do CDTN: foi realizada participação neste seminário para apresentação de trabalho sobre o tema exposto, a fim de discutir as aplicações do dispositivo na área de utilização nuclear, nos dias 21 e 22 de outubro de 2015, no campus da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte. Este trabalho foi premiado neste evento pela sua apresentação oral.
- e) I SEAPI – Semana de Engenharia e agronomia do Piauí: por meio de convite do CREA-PI foram ministrados cursos e palestras sobre a tecnologia e métodos de desenvolvimento de tecnologias voltadas para a robótica e a automação, com apresentação do protótipo do equipamento, nos dias de 25 a 29 de agosto de 2015, no Centro de Convenções Atlantic City, em Teresina, Piauí.
- f) Congresso Internacional Cobem 2015: foi aprovada publicação do artigo para participação e publicação na edição do evento que ocorrerá de 6 a 11 de dezembro de 2015, no Windsor

Barra Hotel, na cidade do Rio de Janeiro, RJ. Além do autor, também participará o aluno Mike Gomes de Moura.

## 5 CONCLUSÃO

A construção do modelo ajudou a demonstrar que os sistemas propostos têm viabilidade técnica e prática. Quando submetido a testes, foi claro o desempenho em todos os critérios principais que o sistema tinha como objetivo, mostrando, mesmo, que os mecanismos utilizados podem se desenvolver para dar origem a equipamentos prontos para uso prático, sendo comercialmente atrativo para indústrias e outros segmentos, do ponto de vista técnico e financeiro.

Estes objetivos podem ser expostos de acordo com os três tópicos propostos no desenvolvimento do projeto:

- a) comando intuitivo: este tipo de comando tem um enorme potencial para utilização em todos os setores descritos durante o trabalho, pois a assimilação mnemônica de operação se opera em segundos, para operações básicas, não deixando dúvida de que o comando intuitivo para braços manipuladores com semelhança mecânica com a anatomia humana tem lugar garantido no futuro das mais diversas atividades, podendo, até mesmo, revolucionar conceitos na área do trabalho humano;
- b) servomotor: este mecanismo demonstrou desempenho notável, sendo possível aplicá-lo a diversos mecanismos de robótica e automação, com a vantagem de ter custo bem reduzido, se comparado a mecanismos semelhantes em potência e funcionalidade. Estes custos podem se apresentar na ordem de dez vezes menor que o custo de um servomotor. Provavelmente, este sistema não é compatível com todas as aplicações industriais, mas, certamente, atingiu o objetivo de tornar possível o posicionamento angular de precisão, a fim de viabilizar outros equipamentos que necessitem desta tecnologia a menores custos;
- c) protótipo do manipulador: sem dúvida, as observações colhidas a respeito dos comandos e servos tiveram como origem principal os experimentos realizados utilizando o protótipo, que foi de grande sucesso e, ainda, dando um rumo à questão das melhorias necessárias para o seu funcionamento, a estrutura se mostrou robusta, conforme previsto, sendo que, desde a sua construção, não foram necessários consertos importantes. A mobilidade do comando impressiona, pois, mesmo não permitindo todos os movimentos do braço humano, ele dá grande liberdade de movimentação do braço do operador, este ficando praticamente livre para atuar no raio de alcance do manipulador.

O funcionamento integral e conjunto dos sistemas pode ser conceituado como bem acima das expectativas, pois, mesmo com o pensamento de que seria possível esboçar o funcionamento dos sistemas, existia a ideia de que o desempenho seria inferior ao obtido, contendo um maior número de observações em relação às deficiências do sistema.

## 5.1 Próximos Passos do Projeto

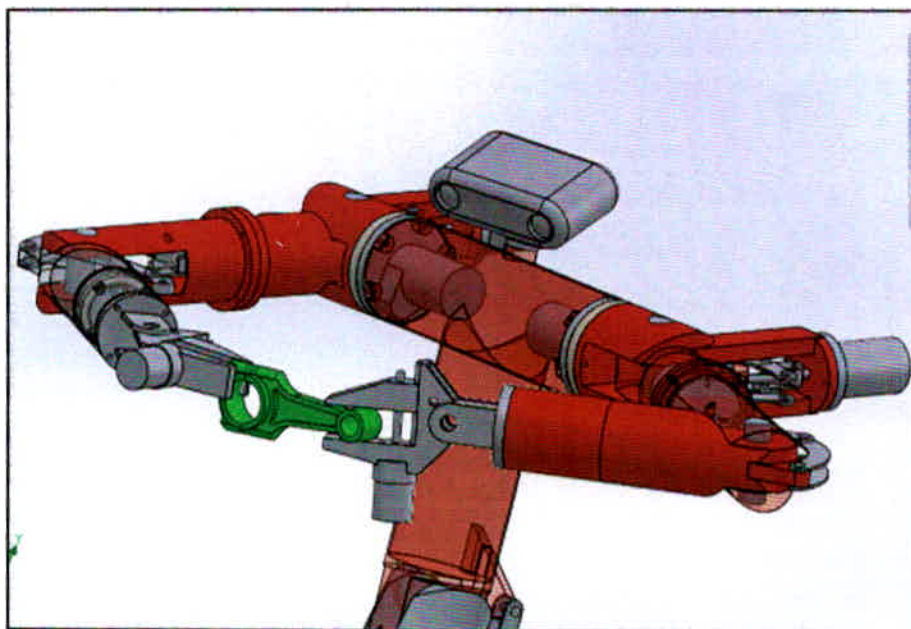
Este projeto é digno de desenvolvimentos futuros, devido à utilidade de tal sistema e sua potencial importância para o desenvolvimento humano e a proteção do trabalhador. Além disso, tendo em vista o bom desempenho obtido do protótipo e o grande número de deficiências que podem ser sanadas facilmente, fica imperativo o desenvolvimento desta tecnologia, pois, se o mesmo cessar neste momento, é certo que será objeto de pesquisas futuras de origens diferentes da deste trabalho.

### 5.1.2 Desenvolvimento

Este equipamento encontra-se ainda em estado didático e demonstrativo, podendo evoluir até o ponto de produto pronto para o mercado, mas, para tanto, tem-se em vista que são necessárias implementações tecnológicas e o desenvolvimento das tecnologias utilizadas, como descrito a seguir:

- a) servomotor: melhoria na precisão, com avanços de programação e filtragem nos sensores, conforme já citado e torque com a utilização de mecanismos de transmissão, para criar maior capacidade de erguimento de cargas, ampliando a sua aplicabilidade;
- b) graus de liberdade: para utilização prática, é importante o aumento do número de graus de liberdade do manipulador, para que o modelo se aproxime mais da proposta de operação intuitiva com replicação de movimentos do operador. O novo modelo pode desempenhar a maioria dos movimentos dos braços humanos e, ainda, acrescido de movimentos de costas e pescoço, como na Figura 31. Estes melhoramentos podem tornar possível a manipulação de objetos e ferramentas, para que seja utilizado em atividades práticas.

Figura 31 – Protótipo avançado com 16 graus de liberdade



Fonte: O autor

Em desenvolvimentos futuros, o modelo pode contar com mãos que tenham dedos para serem utilizadas em ferramentas e dispositivos projetados para as mãos humanas;

c) Visão: para uma completa imersão do operador no ambiente em que o manipulador se encontra, é bastante conveniente que a visão do operador esteja em posição de semelhança com a configuração do corpo humano. Para isso podem ser acopladas câmeras à parte correspondente à cabeça do equipamento, permitindo que a posição da mesma obedeça à posição da cabeça do operador, completando a sensação de presença virtual tão comentada neste trabalho.

As imagens seriam transmitidas para um par de óculos de realidade virtual dos modelos que vêm sendo utilizados para criar esta mesma sensação de presença remota, como na Figura 32.

Figura 32 - Óculos de realidade aumentada com hologramas da Microsoft



Fonte: Olhar Digital UOL



Dispositivos desta natureza trariam o operador para dentro do ambiente de operação do manipulador, fazendo com que se sinta operando seus próprios braços diretamente.

### 5.1.3 Considerações finais

A produção comercial de um equipamento capaz de realizar uma presença virtualizada do ser humano no local de trabalho pode acarretar consequências notáveis para a sociedade, como a diminuição significativa da incidência de acidentes de trabalho decorrentes de atividades perigosas e a extinção da necessidade de descanso especial em atividades penosas.

Este equipamento pode revolucionar o desempenho de diversas funções, fazendo com que o homem entre em uma nova era em que os acidentes e os danos à saúde oriundos das atividades humanas sejam coisas do passado.

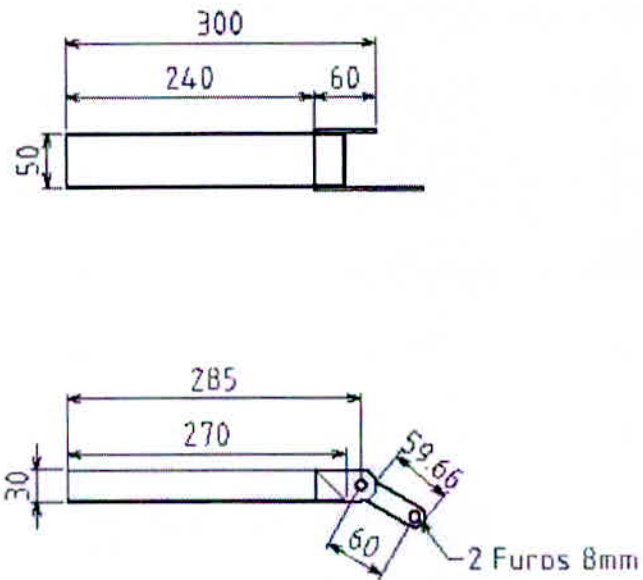
## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, F. M. ÁLVARO. **Método dos Elementos Finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003.
- ARDUINO. **Controles PWM**. Disponível em: <[www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM](http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM)> Acesso em: 10/04/2015.
- BORODIN, N. **Machine Design**. Moscow: MIR Publishers, 1988.
- CAPELLI, A. **Automação Industrial**. São Paulo: Érica, 2009.
- LAMB, FRANK. **Industrial Automation Hands-on**. New York/ New York: McGraw-Hill Global Education Holdings, 2013.
- NOBERTO PIRES. **Automação Industrial**, 5. ed. Coimbra: Lidel, 2012.
- FIGINI, G. **Eletrônica Industrial**. Curitiba: Hemos, 2002
- MALVINO, Albert; BATES, David J, **Eletrônica**. 7. ed. Porto Alegre/RS: McGraw Hill Brasil, 2008. Volume 2.
- MARSTON, Ray **PRINCIPLES AND CIRCUITS – FIELD EFFECT TRANSISTORS - Nuts & Volts Magazine – mai/2000 - T & L Publications, Inc., 2000**
- MELCONIAN, SARKIS. **Elementos de Máquinas**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- MIZRAHI, V. V. **Treinamento em linguagem C++ Modulo 1**. São Paulo: Pearson Education, 2006.
- MORAIS, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- PETRUZELLA, F. D. **Controladores Lógicos Programáveis**, 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- RIVIN, E. **Mechanical Design of Robots**. New York: McGraw-Hill Inc, 1988.
- ROSÁRIO, JOÃO MAURÍCIO. **Automação Industrial**. 4. ed. São Paulo: Baraúna, 2009
- WEG. DT – 3 CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E CONVERSORES CA/CC, WEG Drives & Controls – Automação LTDA. WEG. 2014. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Conversor-CA-CC>>. Acesso em: 02/set/2014.
- WEG. Manual do Usuário, Série: CTW900, Idioma: Português, N° do Documento: 10001528547/02, Versão de Software: 1.0X, Data da Publicação: 05/2014, WEG Drives & Controls – Automação LTDA. WEG. 2014. Disponível em: <

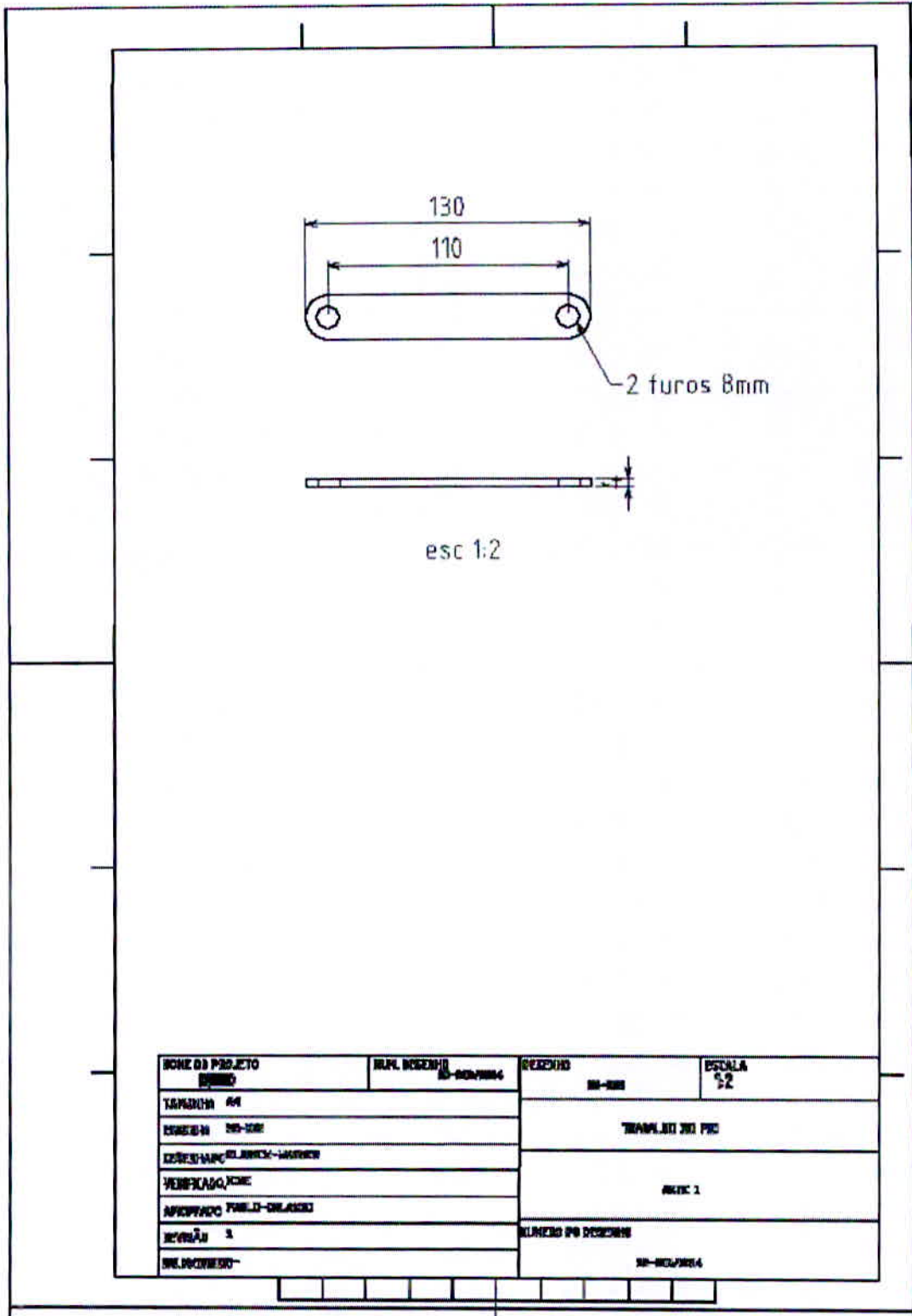
<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Conversor-CA-CC> >. Acesso em: 02/set/2014.

DA VINCI SURGICAL. 2015. Disponível em: <http://www.davincisurgery.com/da-vinci-surgery/da-vinci-surgical-system/>. Acesso em: 30/set/2015.





|                                   |                              |                    |               |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------|
| ROTE DO ARQUIVO<br>BRAÇO ROBOTICO | NUM. DESENHO:<br>30-001/2014 | DESENHO<br>30-001  | ESCALA<br>1:5 |
| TAMANHO: A4                       |                              | TRABALHO DO PIC    |               |
| DESENHO: 30-001                   |                              | ANTE BRAÇO         |               |
| DESENHADO: ELZBIETA WAGNER        |                              |                    |               |
| VERIFICADO: NINE                  |                              |                    |               |
| APROVADO: PAULO ORLANDO           |                              |                    |               |
| REVISÃO: 1                        |                              | NUMERO DO DESENHO: |               |
| CONTRATO: -                       |                              | 30-001/2014        |               |



|                |                  |         |        |
|----------------|------------------|---------|--------|
| SCHEMA PROJETO | NUM. DESENHO     | DESENHO | ESCALA |
| 00000          | 00-000004        | 00-000  | 1:2    |
| TITULO         | TITULO DO PROJ   |         |        |
| REVISOR        | AUTOR            |         |        |
| REVISADO       | AUTOR DO DESENHO |         |        |
| APROVADO       | 00-000004        |         |        |
| REVISOR        |                  |         |        |
| REVISADO       |                  |         |        |







