

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**WAGNER RAFAEL SARTO LINHARES**

**SISTEMA DE CONTROLE DE CADEIRA DE RODAS PARA PORTADORES DE  
TETRAPLEGIA**

**CAMPO MOURÃO**

**2022**

**WAGNER RAFAEL SARTO LINHARES**

**SISTEMA DE CONTROLE DE CADEIRA DE RODAS PARA PORTADORES DE  
TETRAPLEGIA**

**Wheelchair control system for patients with tetraplegia**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Regis Monteiro

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**WAGNER RAFAEL SARTO LINHARES**

**SISTEMA DE CONTROLE DE CADEIRA DE RODAS PARA PORTADORES DE  
TETRAPLEGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica  
do Curso de Bacharelado em Engenharia  
Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná.

Data de aprovação: 18/novembro/2022

---

André Luiz Regis Monteiro  
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Lucas Ricken Garcia  
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Leandro Castilho Brolin  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**  
**2022**

Dedico este trabalho à minha querida Mãe  
Rosimara de F. Sarto e familiares que sempre  
acreditaram no meu potencial e me  
incentivaram.



## **AGRADECIMENTOS**

Em princípio meus agradecimentos são certamente à força que nos mantém firmes, independente da barreira que é Deus.

Gostaria de agradecer à minha família que disponibilizou total apoio independente da dificuldade, são minha base e me motivam a continuar sempre.

Agradeço a todos professores que tive o prazer conhecer ao longo de minha formação acadêmica, que se mostraram além de profissionais, grandes companheiros. Em especial ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz Regis Monteiro, pela sabedoria e incentivo durante essa trajetória.

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro Castilho Brolin que me auxiliou em um problema pontual no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Lucas Ricken Garcia grande amigo e incentivador, pela orientação ao longo do curso.

Aos meus colegas de sala e também amigos que pude conhecer.

A Secretaria do Curso e todos profissionais pela cooperação, sempre fornecendo o melhor suporte.

Desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

## RESUMO

As tecnologias assistivas são formas de acrescentar qualidade de vida aos portadores de deficiência, disponibilizando seus direitos básicos de acessibilidade. Este projeto busca acrescentar tecnologia assistiva, com foco em portadores de tetraplegia, no desenvolvimento de uma cadeira de rodas motorizada controlada apenas por movimentos da cabeça. Os dispositivos de sensoriamento são baseados em sensores inerciais, que captam a orientação destes movimentos e são enviados via *wireless* para um algoritmo proporcional, integral e derivativo (PID) que utiliza a orientação da cadeira como realimentação do controlador. Um modelo de cadeira de rodas de baixo custo foi adaptado com motores elétricos e um inversor na topologia em ponte completa para controle de direção e velocidade. Foi elaborado um controlador eletrônico baseado no microcontrolador ESP8266EX, responsável por operar os motores, aferir sensores e realizar comunicações. O controlador PID se mostrou suficiente na operação da planta, mesmo com as não linearidades impostas pelas limitações construtivas do protótipo.

**Palavras-chave:** tecnologias assistivas; sensores inerciais; algoritmo PID; tetraplegia.

## ABSTRACT

Assistive technologies are ways of adding quality of life to people with disabilities, providing their basic accessibility rights. This project seeks to add assistive technology, focusing on people with quadriplegia, in the development of a motorized wheelchair controlled only by head movements. The sensing devices are based on inertial sensors, which capture the orientation of these movements and are sent via *wireless* to a proportional, integral and derivative (PID) algorithm that uses the orientation of the chair as feedback to the controller. A low-cost wheelchair model was retrofitted with electric motors and an inverter in full-bridge topology for direction and speed control. An electronic controller based on the ESP8266EX microcontroller was developed, responsible for operating the motors, measuring sensors and performing communications. The PID controller proved to be sufficient in the operation of the plant, even with the non-linearities imposed by the constructive restrictions of the prototype.

**Keywords:** assistive technologies; inertial sensors; PID algorithm; quadriplegia.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama em Bloco BNO080 . . . . .	14
Figura 2 – Componentes básicos de um motor CC . . . . .	15
Figura 3 – Conversor em ponte completa . . . . .	16
Figura 4 – Modos de operação . . . . .	17
Figura 5 – Diagrama funcional ESP8266EX . . . . .	18
Figura 6 – Módulo ESP12-F . . . . .	18
Figura 7 – Modelo OSI vs TCP/IP . . . . .	19
Figura 8 – Malha de controle com realimentação . . . . .	21
Figura 9 – Resposta ao degrau para sistemas de segunda ordem . . . . .	21
Figura 10 – Cadeira modelo M2000 . . . . .	23
Figura 11 – Design virtual da adaptação . . . . .	24
Figura 12 – Montagem do rodízio . . . . .	24
Figura 13 – Sistema de tração elétrica . . . . .	25
Figura 14 – Diagrama de etapas . . . . .	26
Figura 15 – Diagrama em blocos do sistema eletrônico . . . . .	26
Figura 16 – Modelo 2D da PCI . . . . .	27
Figura 17 – Modelo 3D da PCI . . . . .	28
Figura 18 – Montagem do <i>hardware</i> de controle . . . . .	28
Figura 19 – Posicionamento do sensor na cabeça do usuário . . . . .	29
Figura 20 – Driver de acionamento . . . . .	30
Figura 21 – Diagrama em blocos do <i>firmware</i> . . . . .	31
Figura 22 – Movimentos para troca de estados . . . . .	31
Figura 23 – Movimentos para acelerar e desacelerar . . . . .	32
Figura 24 – Movimentos para controle da orientação . . . . .	32
Figura 25 – Adaptação em solda de componente . . . . .	34
Figura 26 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos $K_p$ . . . . .	35
Figura 27 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos $K_{pi}$ . . . . .	35
Figura 28 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos $K_{pid}$ . . . . .	36
Figura 29 – Desenho 2D detalhado . . . . .	43
Figura 30 – Esquemático do projeto . . . . .	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Significado de cada <i>tag</i></b> . . . . .	<b>20</b>
<b>Tabela 2 – Especificações do projeto</b> . . . . .	<b>36</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Tetraplegia</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Tecnologia assistivas</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistema de orientação inercial</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Motores de corrente contínua</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Microcontroladores</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Protocolo de comunicação <i>Open Sound Control (OSC)</i></b>	<b>19</b>
<b>2.7</b>	<b>Algoritmos de controle</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Mecânica</b>	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Eletrônica</b>	<b>25</b>
3.2.1	Concepção e requisitos	25
3.2.2	Elaboração do esquemático	26
3.2.3	Elaboração do <i>layout</i>	27
3.2.4	Montagem e testes	28
<b>3.3</b>	<b>Firmware</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Montagem estrutural da cadeira</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Montagem da placa de circuito impresso (PCI)</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Implementação do algoritmo de controle</b>	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Especificações do projeto</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>38</b>

<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>
<b>APÊNDICE A</b>	
<b>DESENHO 2D DETALHADO DO MODELO DE ADAPTAÇÃO DO RODÍZIO</b>	<b>44</b>
<b>APÊNDICE B</b>	
<b>ESQUEMÁTICO ELETRÔNICO (HARDWARE DE CONTROLE)</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma Pessoa com Deficiência (PcD) possui impedimento de longo prazo de natureza física, mental, intelectual ou sensorial a plena e efetiva participação na sociedade em igualdade de condições com as demais pessoas BRASIL (2015). Essa definição, se abordado isoladamente, naturalmente não condiz com a seguridade disposta na Constituição da República Federativa do Brasil (BRASIL, 1988).

Uma evolução no modelo de classificação de PcD, onde se considera apenas a incapacidade como um problema intrínseco da pessoa para uma abordagem dependente de um problema ou situação criada pela sociedade, é uma caminho que abre portas para uma melhor abordagem sobre seus direitos de acessibilidade, é o que relata Dischinger, Ely e Piardi (2012, p. 16), conforme citado pela *World Health Organization (WHO)* (2001) : "a incapacidade não é um atributo da pessoa, mas um conjunto complexo de condições, muitas das quais criadas pelo meio ambiente social". Dischinger, Ely e Piardi (2012) expõem que a solução para inclusão social vai além de ações políticas e legislativas e recaem em mudanças até mesmo culturais.

A política do Brasil possui avanços positivos no sentido garantidor dos direitos da PcD como é o caso do estatuto da pessoa com deficiência, que busca promover de forma transparente os direitos fundamentais da categoria, um termo recorrente utilizado é "tecnologia assistiva", que possui um significado amplo, abrangendo equipamentos, serviços e até metodologias que propõem-se melhorar a autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social (BRASIL, 2015).

A tetraplegia é uma subcategoria de PcD e se refere a um dos mais graves acometimentos que podem afetar o ser humano, resultando no prejuízo das funções motoras, sensitivas, autonômicas e psicoafetivas. No Brasil estima-se que ocorram a cada ano cerca de 10 mil novos casos, sendo o trauma a causa predominante, uma incidência muito elevada comparado a outros países. Estudos em centros de reabilitação revelam que acidentes automobilísticos, ferimentos por projétil de arma de fogo e quedas em obras de construção civil são as causas mais comuns (BRASIL, 2013).

No estudo de Almeida *et al.* (2013) onde se avalia o nível de depressão em indivíduos com lesões medulares portadores de úlcera por pressão é possível visualizar um quadro alto de incidência. No amostral de 50 pacientes, 50% apresentaram depressão, 60% retração social e 96% apontaram ideia suicida. Para a Organização Mundial da Saúde (OMS) (2013) estima-se que de 20-30% das pessoas com com a lesão apresentam sinais clinicamente significativos de depressão. Ainda, de acordo com a OMS (2013), muitas das consequências como a depressão, não resultam da condição traumática em si, mas de cuidados médicos, serviços de reabilitação inadequados e de barreiras nos ambientes físicos, sociais e políticos.

O rápido engajamento do indivíduo em tarefas diárias favorece a vivência e reduz os sentimentos de menos valia e baixa auto-estima, sentimentos esses que vão ao encontro do desenvolvimento de quadros depressivos (BRASIL, 2013). Avaliando todo cenário de tecnolo-



gia assistiva que busca atenuar os quadros secundários desenvolvidos por pacientes acometidos de tetraplegia, o presente trabalho dá enfoque em desenvolver uma cadeira de rodas que disponibiliza capacidade de mobilidade aos acidentados.

## **1.1 Objetivos**

A seguir são apresentados os objetivos deste trabalho.

### **1.1.1 Objetivo geral**

Desenvolver um sistema de controle de movimentação de cadeira de rodas sensível aos movimentos de rotação, extensão e flexão da cabeça, utilizando sensores inerciais.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Elaborar adaptação eletromecânica em uma cadeira de rodas convencional.
- Desenvolver um hardware eletrônico para gerenciar o sistema.
- Estabelecer uma comunicação sem fio com baixa latência.
- Elaborar um algoritmo de controle proporcional, integral e derivativo (PID).

## **1.2 Justificativa**

A inclusão de pessoas com deficiência abrange a conscientização em todos os níveis da esfera social e, o reconhecimento de suas diversidades é fundamental para promover seus direitos. Um dos diversos aspectos necessários para obtenção de uma inclusão é a disponibilidade de tecnologias assistivas, as quais acrescem as capacidades funcionais dos indivíduos e garantem efetivamente uma inclusão (DISCHINGER; ELY; PIARDI, 2012).

De acordo com Rosa, Freitas e Rosa (2020) a tecnologia assistiva pode ser caracterizada como uma tecnologia social atendendo alguns parâmetros como a razão, enfoque, abordagem etc. Considerando essas premissas, esse trabalho complementa o avanço e disseminação do termo tecnologia assistiva de cunho puramente social, abordando uma solução de mobilidade para PcD acometidos de tetraplegia, uma das condições físicas motoras mais complexas de tratamento e pouco explorada em tecnologia comparada a outros quadros. Juntamente a este cenário, a realização de um trabalho multidisciplinar onde é possível explorar alguns temas fora da grade curricular também se enquadram na motivação desse trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta de forma sucinta os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do projeto.

### 2.1 Tetraplegia

A classificação internacional de funcionalidade, incapacidade e saúde (CIF) é uma estrutura da OMS, para definição, mensuração e modelagem de políticas para saúde de PcD. Um indivíduo quando diagnosticado de alguma adversidade no modelo puramente médico que o torne PcD, pode ser classificado continuamente pela CIF, apontando constantes transições em seu quadro por diferentes condições funcionais (World Health Organization, 2002).

A tetraplegia é a condição onde uma lesão medular limita os movimentos do tronco. O paciente acometido estará sujeito a um longo programa de readaptação, e se faz necessário a utilização das ferramentas disponibilizadas pela CIF, para fornecer aos indivíduos a capacidade de evoluir continuamente suas condições funcionais. O processo de readaptação do paciente possui inúmeras etapas, dentre elas a classificação contínua CIF, diagnósticos, tratamentos cirúrgicos, acompanhamentos psicológicos etc. A etapa de reabilitação é umas das mais impactantes sobre a qualidade de vida dos tetraplégicos. Uma das fases da reabilitação é a transição do paciente acamado para uma cadeira de rodas, que depende da interação entre fatores individuais, ambientais e inerentes ao equipamento. Esta análise deve ser feita de forma criteriosa por um profissional, visando maximizar os benefícios decorrentes do uso da mesma (BRASIL, 2013).

### 2.2 Tecnologia assistivas

A tecnologia assistiva é um termo que agrega inúmeros recursos em sua definição, entretanto seus objetivos são pontuais e buscam melhorar habilidades funcionais de PcD. Os equipamentos assistivos são produtos de *design* inclusivo, que vão desde dispositivos para adequação de postura à sistemas computadorizados (BRASIL, 2015).

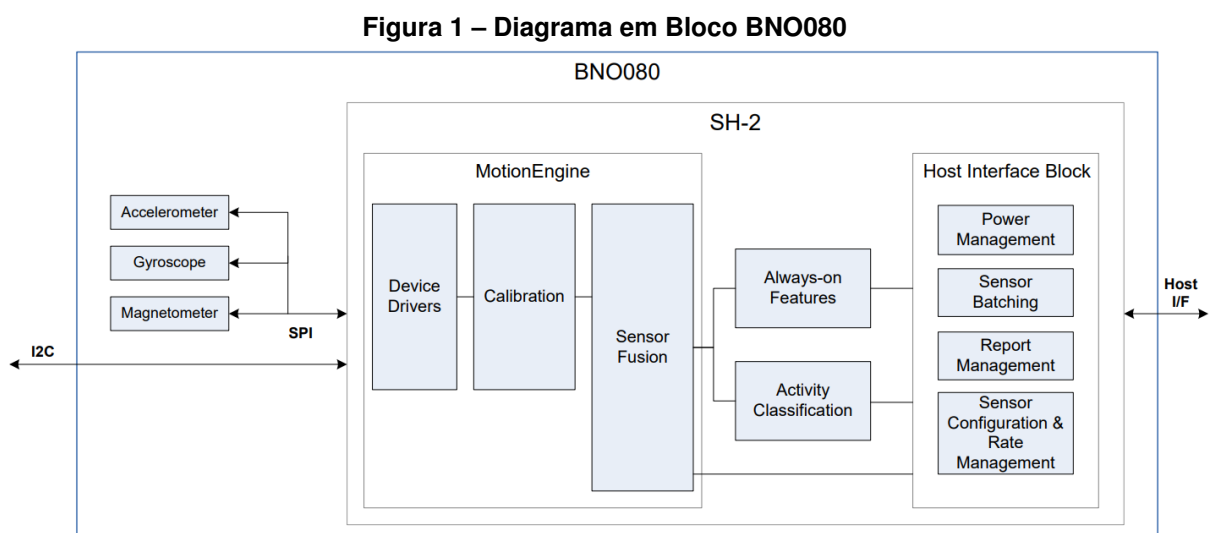
As cadeiras de rodas são equipamentos assistivos, e possuem diferentes complexidades tecnológicas. As mais comuns são as mecanomanuais, por atender grande parte das comorbidades. Para PcD com dificuldades mais complexas se fazem necessários equipamentos com tecnologia eletroeletrônica embarcada (ALVES, 2017). No trabalho de Al-Okby *et al.* (2019) uma abordagem de controle com sensores inerciais adjunto de reconhecimento de voz é elaborada e comparada. O controle utilizando sensores inerciais apresentaram maior assertividade e melhor tempo de resposta, quando previamente treinado pelo usuário. Apesar da vantagem, a combinação de ambos fornece maior flexibilidade ao usuário.

## 2.3 Sistema de orientação inercial

Uma Unidade de Medição Inercial (IMU) é a combinação de leituras de sensores do tipo acelerômetros e giroscópios, conhecidos como sensores inerciais. Essa categoria de sensores, considerados uma grande evolução, são capazes de mensurar variação de velocidade e aceleração através de forças inerciais aos quais o corpo do sensor é submetido (MADGWICK; HARRISON; VAIDYANATHAN, 2011). As forças envolvidas são capturadas por transdutores e convertidas em sinais elétricos que após tratativas podem ser interpretados. Os sistemas microeletromecânicos (MEMS) e sua natureza multidisciplinar, são os dispositivos que possibilitaram essa evolução (SPARKFUN ELECTRONICS, 2022; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2010).

Alguns modelos de MEMS possuem múltiplos sensores inerciais integrados. Essa característica proporciona a evolução de filtros e algoritmos de orientação, devido a captação de dados mais precisa. Um algoritmo de estimativa de orientação consiste em sucessivas técnicas de filtragem e fusões de dados, como é o algoritmo desenvolvido por Madgwick, Harrison e Vaidyanathan (2011), que propõe uma forma mais eficiente computacionalmente comparado a grande maioria dos dispositivos comerciais. Após a fusão os dados de saídas são fornecidos em formato de Ângulos de Euler ou Quatérnions<sup>1</sup>.

O Sensor BNO080 é um exemplo de MEMS que integra em um único pacote, múltiplos recursos, sendo eles um acelerômetro, giroscópio e magnetômetro ambos triaxiais e um microcontrolador ARM® cortex-M0+ de 32 bits integrados a um *firmware* da Hillcrestlabs. A Figura 1 apresenta seu diagrama em blocos. Através da leitura e escrita dos registradores do dispositivo é possível configurá-lo e coletar a orientação do sensor (Hillcrest Laboratories, 2017).



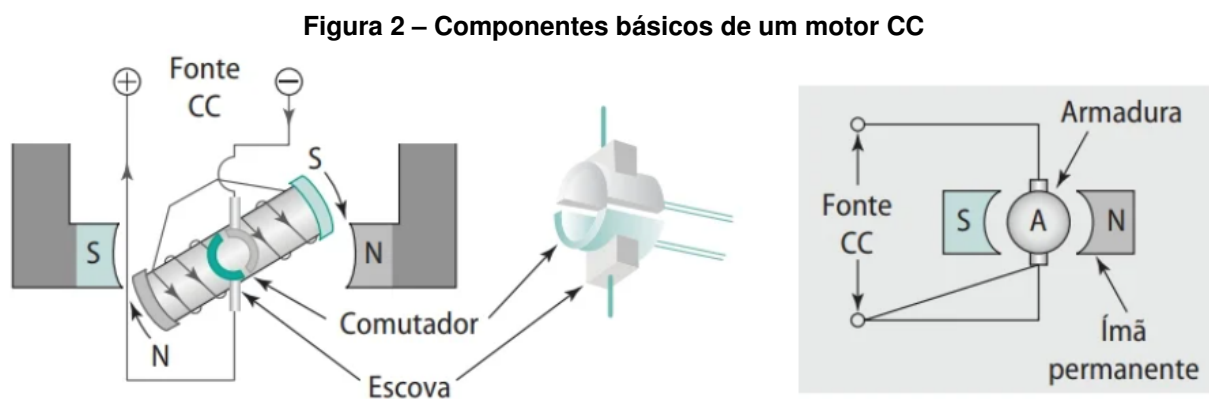
Fonte: Hillcrest Laboratories (2017, p. 1).

<sup>1</sup> Os quatérnions unitários são outra forma de representar a orientação, descoberta por Sir William Rowan Hamilton em 1843.

## 2.4 Motores de corrente contínua

Os motores são dispositivos utilizados para conversão de energia elétrica em energia mecânica, sendo uma das invenções mais utilizadas na indústria. Existem duas grandes famílias de motores, de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC). Este último são normalmente utilizados onde o controle de torque e velocidades são requisitos (PETRUZELLA, 2013).

Uma subdivisão dos motores CC são os de ímã permanente, constituídos por duas partes principais, um alojamento contendo ímãs de campo e uma armadura com bobinas de fio enroladas em um núcleo de ferro. Para alimentar as bobinas da armadura é necessário um comutador. Na Figura 2 pode-se visualizar seu princípio básico de funcionamento (PETRUZELLA, 2013).



**Fonte: PETRUZELLA (2013, p. 119).**

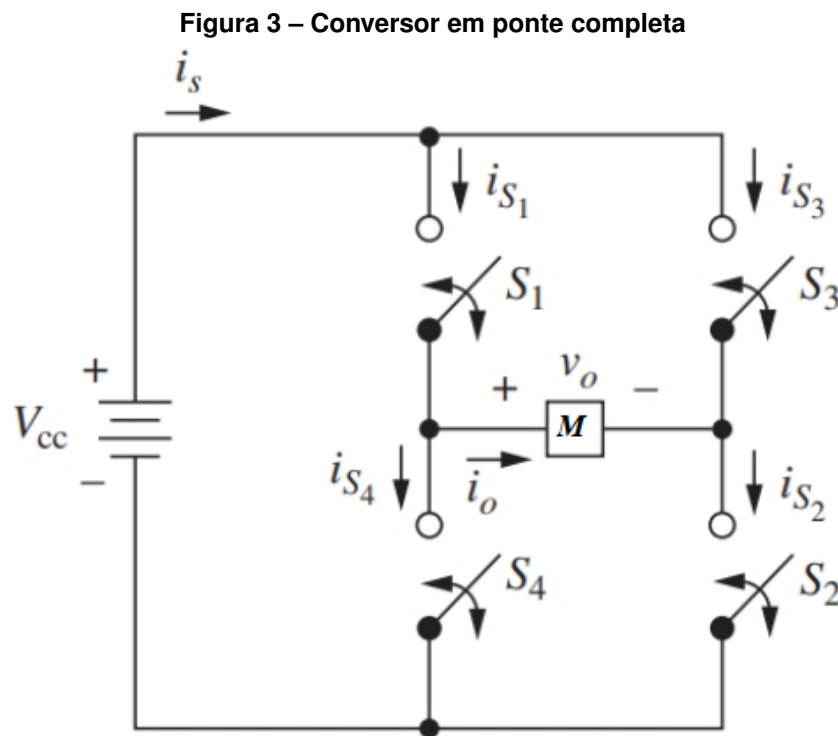
O princípio de funcionamento, pode ser entendido da seguinte forma:

1. A fonte CC faz uma corrente fluir através da bobina de armadura, fazendo a armadura se comportar como um eletroímã.
2. Os polos formados pelo eletroímã são atraídos pelos ímãs permanentes fazendo a armadura girar.
3. Quando os polos se alinham as escovas estão em um intervalo neutro, desativando a corrente que flui para armadura, neste ponto a inércia faz o motor seguir girando.
4. Após o ponto neutro a corrente flui inversamente devido ao comutador, assim um eletroímã com polos inversos são gerados e faz com que a armadura continue girando num ciclo contínuo.

De acordo com PETRUZELLA (2013) o sentido de rotação de um motor CC de ímã permanente pode ser alterado invertendo o sentido de corrente que flui através da armadura,

que pode ser obtida invertendo a fonte CC. Para realizar suscetivas mudanças no sentido de rotação, são utilizados circuitos eletrônicos inversores que alternam a fonte CC.

Os inversores são circuitos conversores de potência capazes de transferir potência de uma fonte CC para uma fonte CA. Através dessa técnica é possível operar um motor CC variando seu sentido de rotação e sua velocidade. O circuito em ponte completa da Figura 3 representa o diagrama de funcionamento, onde a abertura e fechamento das chaves eletrônicas em uma sequência adequada, produzem a saída necessária para inverter a direção e controlar a velocidade de um motor CC. Essa topologia quando aplicada a controle de direção e velocidade é conhecida como Ponte H (HART, 2011).

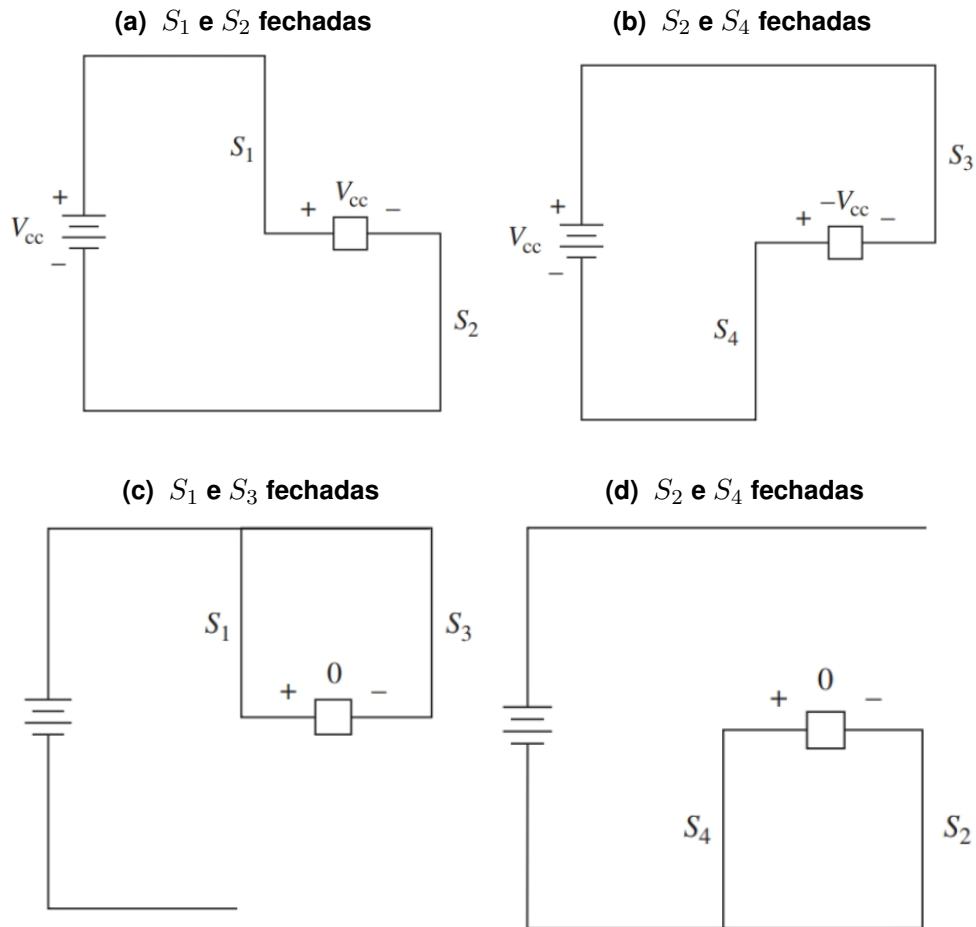


Fonte: Adaptado de HART (2011, p. 334).

Os modos de operação da ponte H podem ser visualizados na Figura 4. Quando  $S_1$  e  $S_2$  são habilitadas à fonte, conforme Figura 4a,  $+V_{cc}$  é conectado ao motor, fornecendo um sentido de giro. Para as chaves  $S_3$  e  $S_4$  acionadas conforme Figura 4b, obtém-se  $-V_{cc}$ , logo um sentido de giro contrário ao anterior é estabelecido. Quando necessário realizar uma frenagem basta usar a topologia da Figura 4c ou 4d, onde os terminais do motor são interligados. Para evitar um curto na fonte de alimentação as chaves  $S_1$  e  $S_4$  não podem ser ligadas ao mesmo tempo, o mesmo ocorre com  $S_2$  e  $S_3$  (HART, 2011).

De acordo com PETRUZELLA (2013) para alterar a velocidade do motor CC, é comumente utilizado a técnica de modulação por largura de pulso (PWM). Esta técnica controla o tempo de acionamento das chaves dentro um período fixo. O tempo que a chave fica ligada é chamada de ciclo de trabalho. Ao variar o ciclo de trabalho obtém-se uma tensão média variável nos terminais do motor e conseqüentemente altera-se a velocidade do motor CC.

**Figura 4 – Modos de operação**



Fonte: HART (2011, p. 334).

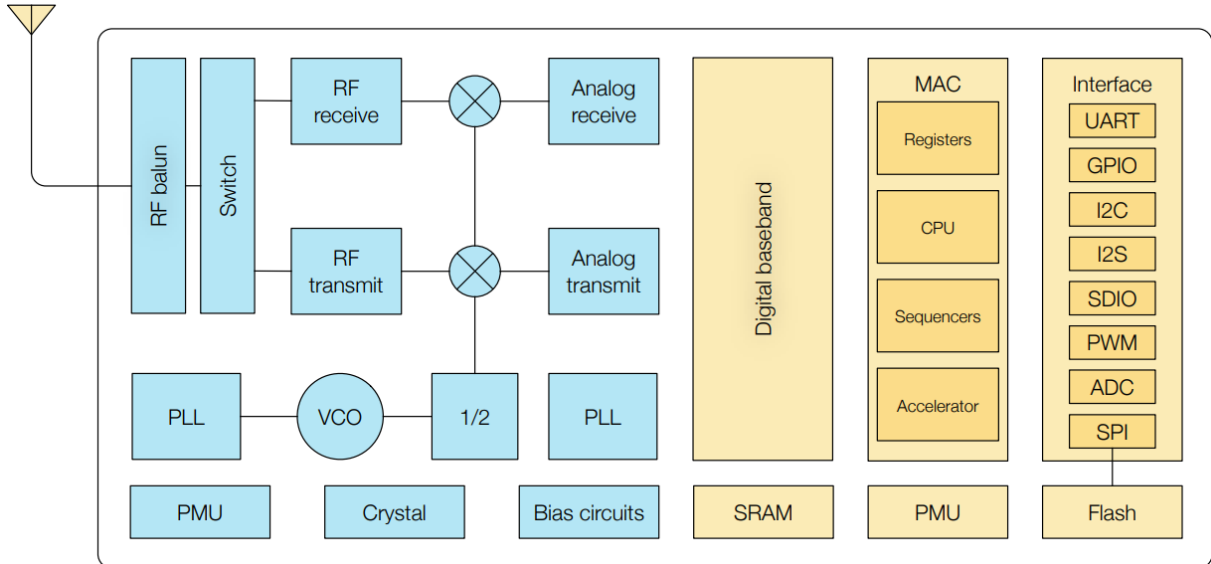
## 2.5 Microcontroladores

O avanço da microeletrônica, e mais recentemente a nanoeletrônica, possibilitou incorporar em um único circuito integrado todas as partes que formam um microcomputador, sendo elas microprocessador, memórias, portas de entrada/saída etc. Esse dispositivo é conhecido como microcontrolador. Um recurso importante desses dispositivos é a capacidade de lidar com rotinas periódicas precisamente. As interrupções do tipo síncronas, são enviadas para o processador, a fim de avisar que é necessário executar outra parte do código, salvando o ponto em que parou e retornando após realizá-la (GIMENEZ, 2010).

Existem inúmeros modelos de microcontroladores no mercado. Um modelo bem aceito é o ESP8266EX, que integra um processador de 32 bits e recursos de rede *Wireless* do tipo Wi-Fi com protocolos TCP/IP e padrão de rede 802.11 b/g/n. Com duas interfaces Wi-Fi virtuais o dispositivo pode operar em modo *Station* e *Acces point*, ou seja, pode se comportar como cliente ou como um roteador sem fio, respectivamente. Na Figura 5 é possível visualizar os blocos funcionais do dispositivo. Os blocos em azul se referem a estrutura analógica, responsável pelo envio e recebimento de sinais através de radiofrequência. Os blocos em amarelo representam a

estrutura digital, como memórias, processador e interface com o dispositivo. (Espressif Systems, 2022).

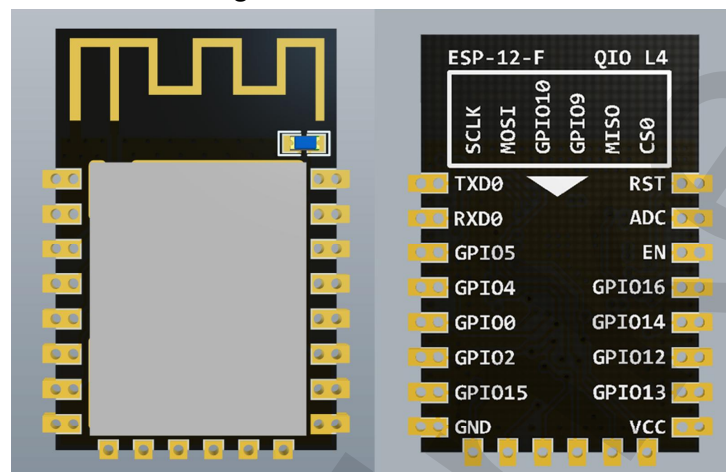
**Figura 5 – Diagrama funcional ESP8266EX**



Fonte: Espressif Systems (2022, p. 7).

O microcontrolador ESP8266EX é categorizado como um *System On Chip* (SOC), contudo é necessário adicionar alguns componentes passivos para seu funcionamento. Para aumentar a rapidez de desenvolvimento de produtos algumas empresas disponibilizam microcontroladores como módulos, como é o caso da Ai-Thinker Technology Co. (2018) que fabrica e comercializa o ESP12-F, um módulo com o *design* das antenas de radiofrequência e componentes passivos inclusos. A Figura 6 apresenta a disposição dos pinos de entrada e saída do módulo e sua aparência.

**Figura 6 – Módulo ESP12-F**

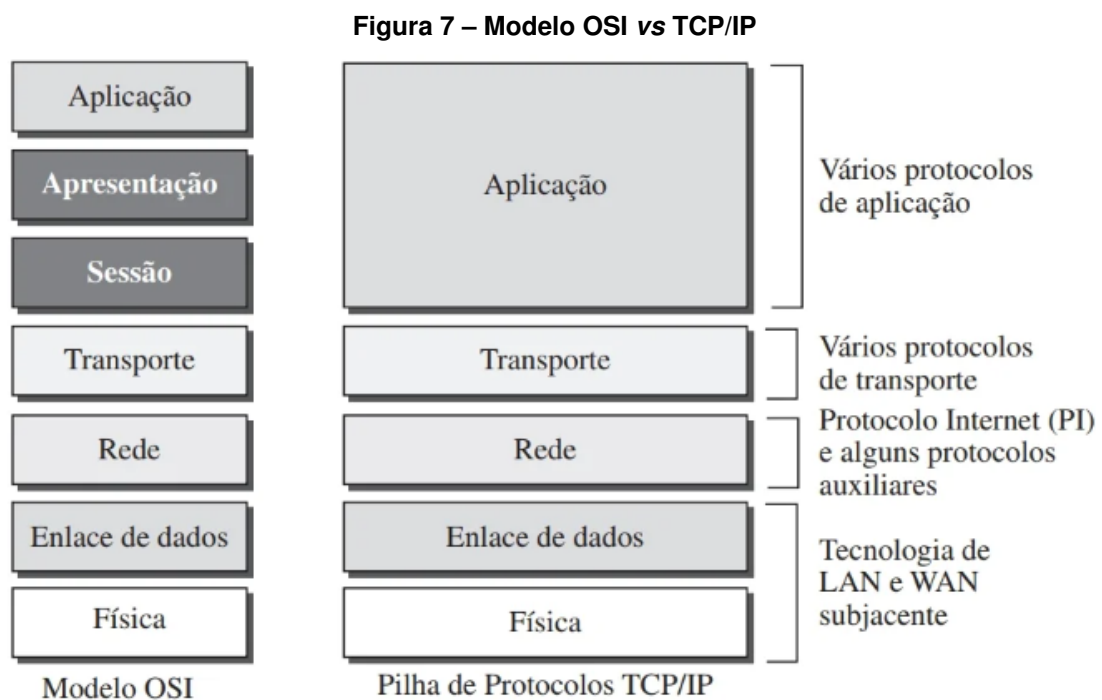


Fonte: Ai-Thinker Technology Co. (2018, p. 3).

## 2.6 Protocolo de comunicação *Open Sound Control* (OSC)

A *International Organization for Standardization* (ISO) é um órgão multinacional dedicado a criar padrões aceitos pela maioria dos países do mundo. Para redes de computadores, o modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) estabelecido pela ISO define e organiza as redes em 7 camadas, com objetivo de facilitar a comunicação entre sistemas. Considerando o tamanho da rede mundial, projetar uma arquitetura de rede que seja flexível, robusta e interoperável é praticamente impossível se não for padronizada (FOROUZAN; MOSHARRAF, 2013).

Outro modelo que é aceito pelo mercado é o *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP). O modelo possui uma aceitação maior por ter sido concebido e implantado primeiro, resultando em impactos financeiros numa eventual mudança. Acrescenta-se, também, que algumas camadas do modelo OSI nunca foram bem definidas para a rede de computadores por ser um modelo mais abrangente (FOROUZAN; MOSHARRAF, 2013). O modelo OSI e TCP/IP podem ser comparados na Figura 7.



Fonte: FOROUZAN e MOSHARRAF (2013, p. 21).

O protocolo OSC se encaixa na camada 7, conhecida como *camada de aplicação* do modelo OSI, projetado para comunicação de baixa latência, leve e flexível para uso em performance musical em tempo real. Independente da camada de transporte o mesmo é baseado em mensagens entre cliente e servidor. O envio de dados consiste em um padrão de endereço, seguido por uma *string*<sup>2</sup> de *tag* do tipo OSC seguida por zero ou mais argumentos OSC. O tamanho de cada tipo de dado atômico no OSC é um múltiplo de 32 bits (FREED; SCHMEDER, 2009).

<sup>2</sup> Uma *string* é qualquer série de caracteres interpretada literalmente por um *script*.



Como exemplo, uma mensagem de um sensor de temperatura que dispara dados do tipo ponto flutuante poderia ser montada da seguinte forma: Primeiro define-se um endereço que depende da regra de negócio e começa com o caractere '/' (barra), assim o endereço pode ser `"/sensor/1/temperatura"`; em seguida adiciona-se a cadeia de *tag* conforme Tabela 1 e, por fim, é adicionada uma temperatura genérica, resultando na seguinte mensagem `"/sensor/1/temperatura,f25.5"`. Antes de enviar o pacote deve-se adicionar caracteres nulos se os blocos de endereço, *tag* ou dados não forem múltiplos de 32 bits. O servidor está preparado para identificar e tratar esses dados conforme o esquema supracitado (FREED; SCHMEDER, 2009).

**Tabela 1 – Significado de cada *tag***

OSC tag	Argumento correspondente
i	int32
f	float32
s	OSC-string
b	OSC-blob

**Fonte: Autoria própria (2022).**

## 2.7 Algoritmos de controle

Para GARCIA (2017) manter, continuamente, certas variáveis de um processo nos valores desejados, sem ação humana direta, é o que caracteriza um controle automático. Saber quando, como e quanto mudar o valor de uma variável para obter uma melhor resposta do sistema é o problema central de uma estratégia de controle.

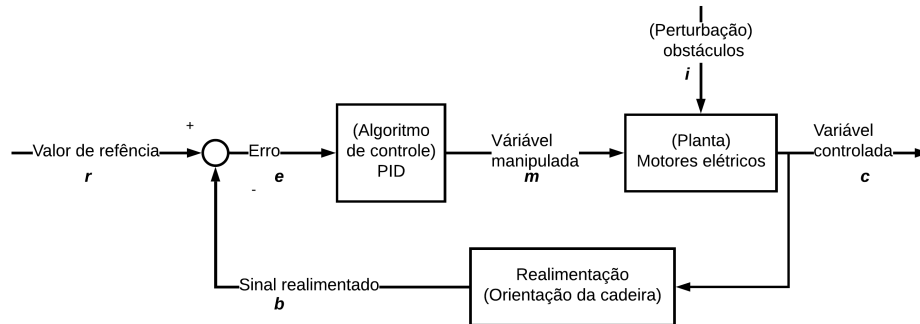
Em uma malha típica de controle automático tem-se as seguintes funções principais:

- Medição: Leitura de sensores.
- Comparação: Comparar variáveis medidas e desejadas.
- Computação: Executar algoritmo de controle.
- Atuação: Ajustar variáveis de entrada do processo.

Na Figura 8 o intuito é manter a variável controlada  $c$  no valor de referência  $r$ , mesmo com perturbações  $i$  no sistema. Através do erro ( $e = r - b$ ) calcula-se uma intensidade de  $m$  para atuar no processo ou planta.

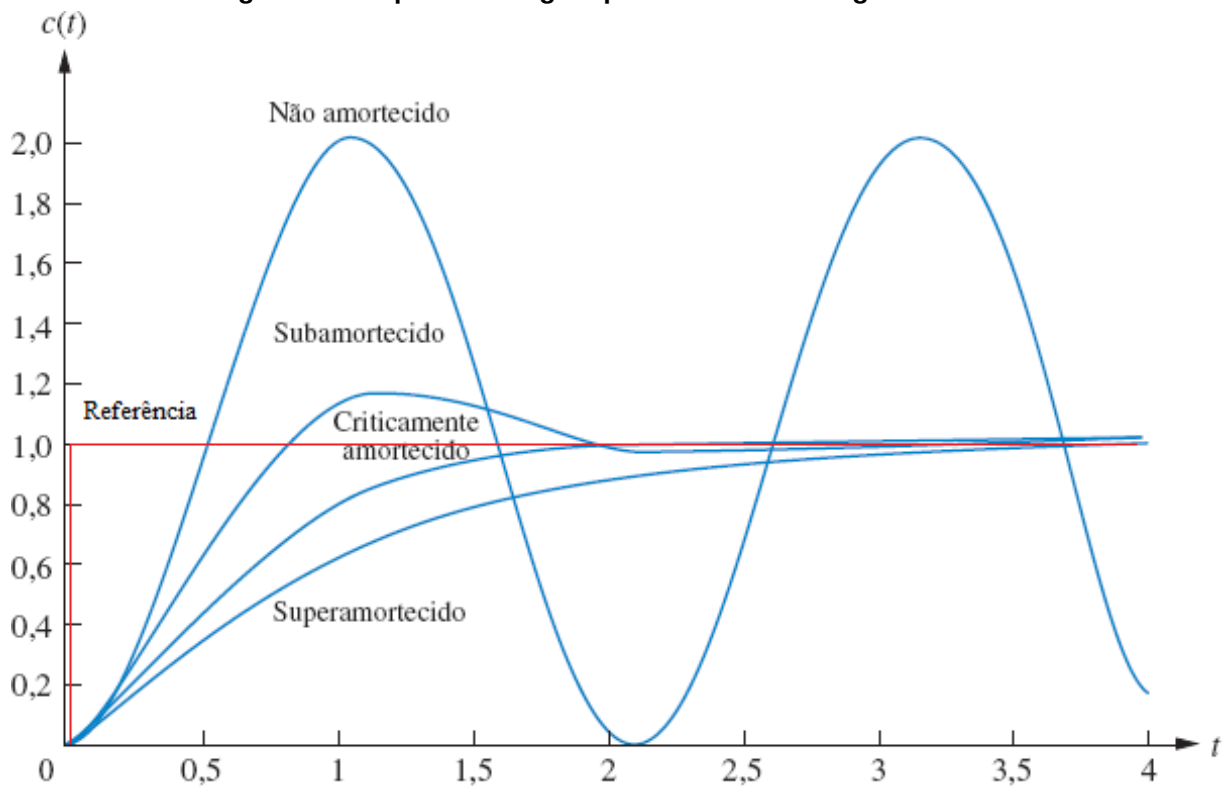
O controle por realimentação é a técnica mais utilizada para controle de processos, e sua vantagem é a habilidade de lidar com perturbações, oferecendo uma ação corretiva rapidamente quando o valor de referência se afasta do valor desejado, seu principal objetivo é garantir boas respostas estacionárias e transitórias. Na Figura 9 pode-se visualizar respostas transitórias para

**Figura 8 – Malha de controle com realimentação**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 9 – Resposta ao degrau para sistemas de segunda ordem**



Fonte: Adaptado de Nise (2017, p. 138).

sistemas de segunda ordem. Para obter a resposta transitória de um sistema é necessário aplicar um degrau unitário e monitorar sua resposta (NISE, 2017).

A seguir tem-se alguns critérios de desempenho e robustez para controladores de um sistema (GARCIA, 2017).

1. Malha fechada estável.
2. Regulação eficiente independente de perturbações.
3. Mudanças na referência devem ser seguidas de forma rápida e suave.
4. Erros em regime permanente nulo.

Apesar do surgimento de técnicas de controle avançado, um dos algoritmos mais utilizados para controladores continua sendo o Proporcional, Integral, Derivativo (PID). De acordo GARCIA (2017), isso ocorre devido a sua fácil implementação e versatilidade, fornecendo na maioria das vezes resultados satisfatórios mesmo com distúrbios. Outro fator decisivo na escolha desse algoritmo é não requerer conhecimento aprofundado da planta.

A equação no domínio do tempo que define o valor da variável de saída do algoritmo PID para atuar na planta é dada pela Equação 1. Nota-se que a equação é composta pela soma de três itens, sendo eles: o controlador proporcional, representado pela constante  $K_p$  vezes o erro, segue-se com o controlador integral, que multiplica a constante  $K_i$  com a integral do erro, e por fim, o controlador derivativo que multiplica a constante  $K_d$  com a derivada do erro.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

O controlador proporcional é sempre aplicado em controladores PID, sua atuação é estática em relação ao erro e age assim que o mesmo surge. Esse controlador quando aplicado individualmente para valores elevados de ganho pode causar instabilidade. O controlador integral elimina o erro estacionário, mas tende adicionar oscilação ao sistema. Por fim o controlador derivativo reduz tanto a intensidade de oscilações e tempo de resposta gerais do sistema, mas deve-se atentar em sistemas ruidosos onde os mesmos podem ser amplificados (GARCIA, 2017).

Os parâmetros de um controlador devem ser ajustados cuidadosamente, esse processo é conhecido como sintonia do controlador e devem atender aos requisitos do sistema aplicado. Realizar a sintonia consiste em definir as constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  da Equação 1 para o sistema. Três abordagens são amplamente utilizadas nessa etapa, quando se conhece o modelo matemático da planta, métodos de projeto como análise em frequência, lugar geométrico das raízes e espaço de estados podem ser utilizadas. Quando a planta é desconhecida, uma forma comum e muito empregada é a tentativa e erro, onde utiliza-se experiência prévia com sistemas similares e análise da curva de reação da variável controlada. Por fim, pode-se determinar um modelo para o sistema baseando-se em métodos de identificação de sistemas.

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho foi separado em três frentes distintas e seus avanços ocorreram de forma não concorrente, sendo elas mecânica, eletrônica e *firmware*. Abaixo analisam-se ambas individualmente.

#### 3.1 Mecânica

O dispositivo central do ponto de vista mecânico é a cadeira de rodas. A escolha deste item seguiu dois requisitos, sendo eles, custo e estrutura para futuras adaptações. O modelo selecionado foi o M2000 conforme Figura 10 da empresa CDS Cadeiras®. As características relevantes são as seguintes: fabricada em aço carbono, apoio para pés removíveis, rodas dianteiras aro 6 polegadas com pneus maciços, rodas traseiras aro 24 polegadas em alumínio com pneus maciços e distância entre eixos de 42 centímetros.

**Figura 10 – Cadeira modelo M2000**



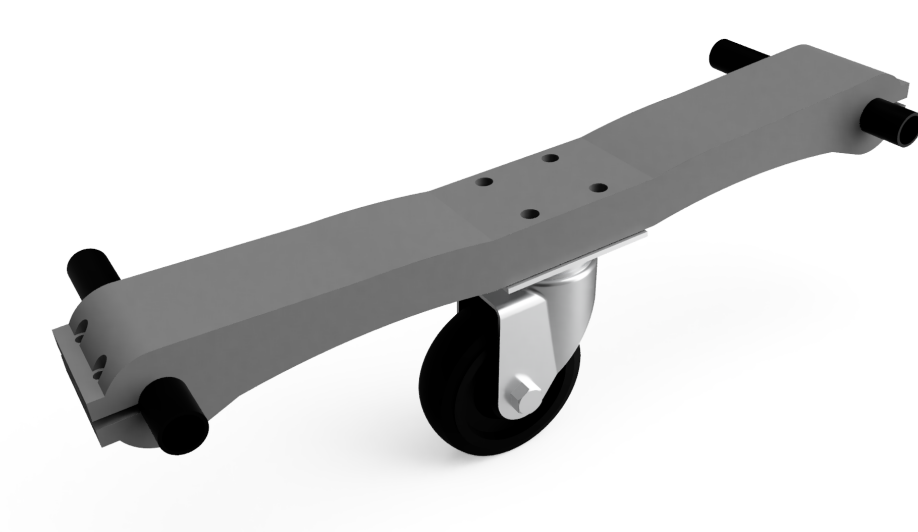
**Fonte: CDS Cadeiras© (2022).**

Antes de desenvolver qualquer concepção de adaptação foi realizado o uso do equipamento para entender as limitações e a manobrabilidade. Dois fatos foram evidenciados nesta etapa, o primeiro é que o centro de massa do usuário, quando concentrado entre as rodas traseiras e dianteiras, dificultava a movimentação e impactava negativamente o próximo item. O Segundo é a forma de construção das rodas dianteiras, por serem livres para girar, em determinados alinhamentos geravam necessidade de maior torque (força nos braços) para sair da inércia, e quando superadas, realizavam movimentos laterais bruscos proporcionais à força aplicada, antes de se alinharem completamente e seguir o movimento.

Considerando as avaliações realizadas, optou-se por realizar duas adaptações na cadeira para melhor atender ao propósito do projeto. Uma delas foi o aumento da distância entre os eixos para melhorar a distribuição de massa. A outra adaptação, foi a retirada das rodas dianteiras e apoios de pé, substituindo-os por apoio de suporte com única roda.

O processo de concepção iniciou com o design 3D do arranjo, utilizando o software Fusion 360 da Autodesk, Inc<sup>®</sup>, onde foram elaboradas duas peças, simétricas, para serem impressas em processo de modelagem por fusão e deposição, conhecido comercialmente como "impressão 3D". O *design* final pode ser visualizado na Figura 11 e seu modelo 2D detalhado pode ser encontrado no Apêndice A.

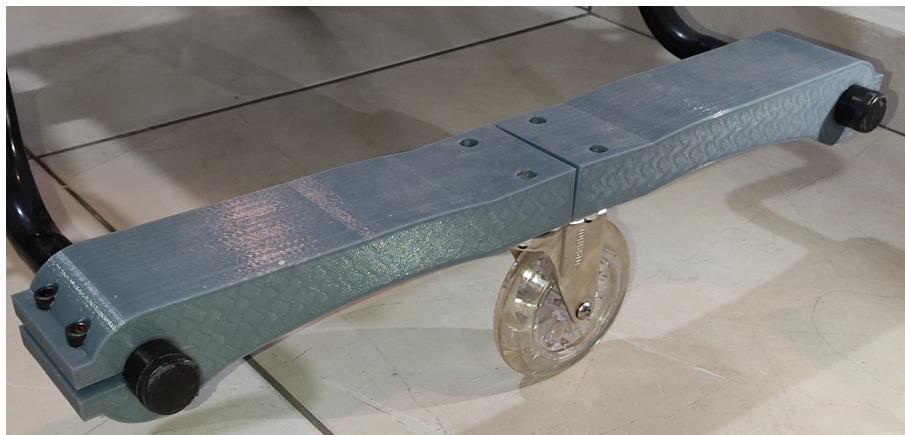
**Figura 11 – Design virtual da adaptação**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Em seguida foi realizada a montagem das peças impressas junto do rodízio, o resultado final pode ser visualizado na Figura 12.

**Figura 12 – Montagem do rodízio**

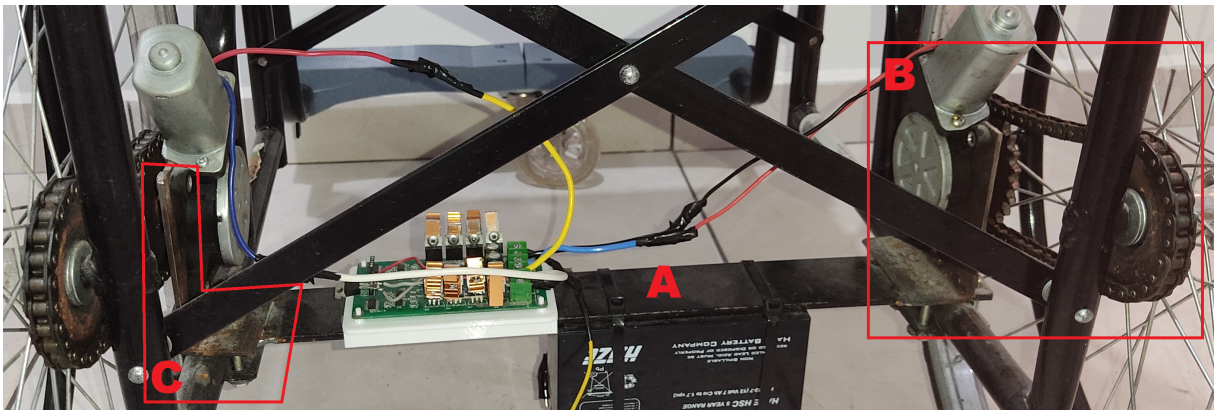


**Fonte: Autoria própria (2022).**

O sistema de tração elétrica é composto por dois motores de acionamento de vidro elétricos automotivo, modelo MABUCHI®. A escolha desse modelo foi devido a seu tamanho, disponibilidade e capacidade de torque. As especificações mais importantes do dispositivo são sua tensão e corrente nominais, de 12 Volts e 7,5 Amperes respectivamente, ambas necessárias para dimensionar um driver de acionamento eletrônico com capacidade adequada.

A Figura 13 apresenta a disposição final dos itens. Os motores estão fixados em uma chapa em formato de "L", identificado na imagem pela letra "C". Esse formato é necessário devido a caixa de redução angular do motor, que transmite o torque ortogonalmente ao eixo do mesmo. O sistema de transmissão está identificado na imagem pela letra "B". O mesmo é composto por um pinhão de 24 dentes soldado ao eixo de transmissão do motor e uma coroa de 24 dentes ligada a roda traseira, ambos estão interligados através de uma corrente de aço. Os motores estão fixados por uma chapa central identificado na imagem pela letra "A", cujo objetivo é firmar componentes auxiliares e permitir o deslocamento dos motores no sentido radial do eixo de transmissão que, conseqüentemente estica as correntes.

**Figura 13 – Sistema de tração elétrica**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

## 3.2 Eletrônica

Todo o projeto eletrônico seguiu um fluxo de etapas que pode ser visualizado na Figura 14.

### 3.2.1 Concepção e requisitos

A etapa de concepção é reflexo do objetivo proposto na 1.1.1 e serviu como base para o levantamento dos requisitos. Os resultados dessa etapa podem ser visualizados abaixo:

1. Obtenção de orientação inercial.

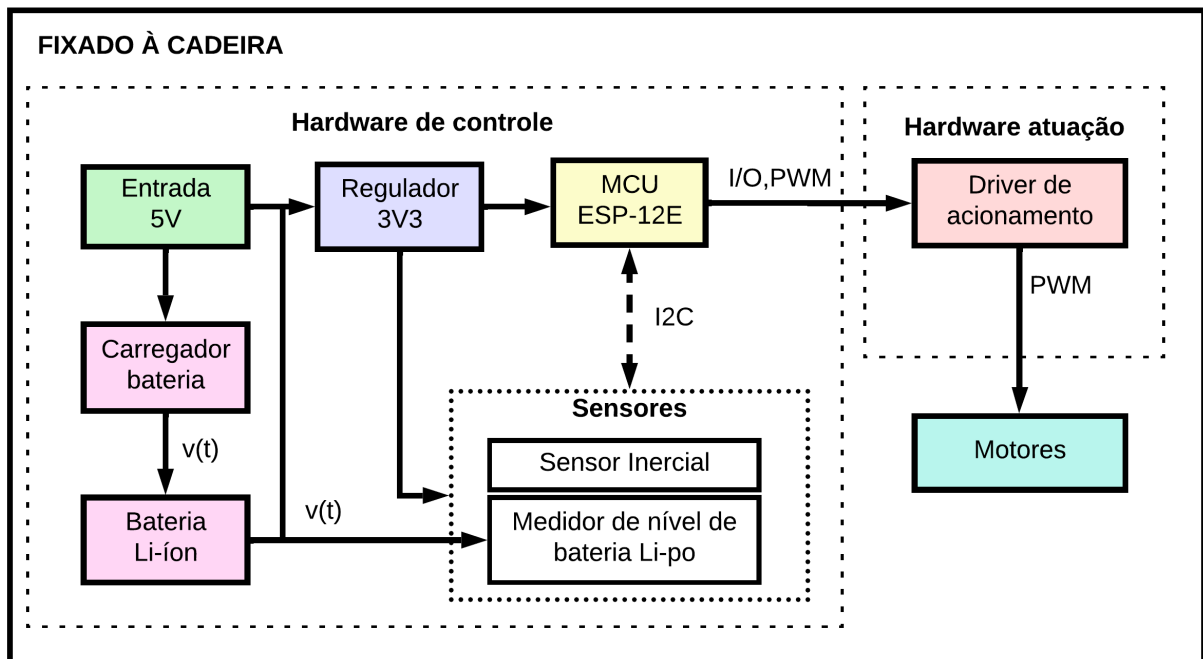
Figura 14 – Diagrama de etapas



Fonte: Autoria própria (2022).

2. Tráfego de dados sem fio.
3. Entradas e saídas digitais disponíveis para comunicar com sensores.
4. Dispositivo leve e pequeno.
5. Driver de acionamento com potência de operação maior que potência nominal dos motores.

Figura 15 – Diagrama em blocos do sistema eletrônico



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.2 Elaboração do esquemático

Para atender o primeiro requisito do Item 3.2.1 foi necessário selecionar um sensor especial. O sensor inercial foi selecionado conforme descrito na sessão 2.3 e o ponto mais importante para escolha é a capacidade do mesmo em realizar a fusão dos dados do acelerômetro e

giroscópio e entregar o resultado em formato de Quaternion ou Ângulo de Euler. O Microcontrolador foi selecionado conforme sessão 2.5, e sua escolha se deve à capacidade de operar uma rede sem fio (*wireless*), e conseqüentemente atender ao segundo e terceiro requisitos.

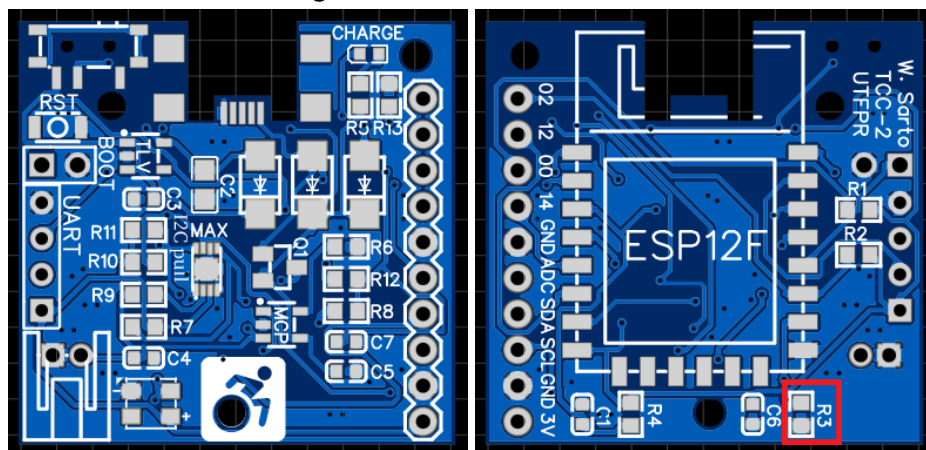
A etapa de esquematização da Placa de Circuito Impresso (PCI) foi elaborada baseando-se nos requisitos e no diagrama em blocos da Figura 15. Duas placas eletrônicas foram elaboradas, uma responsável por adquirir os dados de orientação da cabeça e enviá-los a segunda, para processamento e atuação na cadeira. O diagrama representa todos os itens posicionados na cadeira, e para otimização de recurso, o bloco (*hardware* de controle) foi planejado para representar também o dispositivo posicionado na cabeça. Todo processo foi elaborado utilizando o EasyEDA® um software de design de PCI e simulação online, essa ferramenta é integrada a um catálogo de componentes e um serviço de fabricação, que representam um ecossistema para ajudar os usuários a economizarem tempo em prototipação (EASYEDA, 2022).

No Apêndice B é possível verificar o esquemático completo do bloco (*hardware* de controle).

### 3.2.3 Elaboração do *layout*

A elaboração do *layout* foi realizada no mesmo software utilizado no item 3.2.2, e teve como foco atender o quarto requisito indicado em 3.2.1 e produzir uma PCI compacta para não gerar desconforto ao utilizá-la posicionada na cabeça. O tamanho da PCI final foi de 30 mm x 31 mm e pode ser vista na Figura 16 e Figura 17. Para chegar a este tamanho, foram utilizados os menores encapsulamentos possíveis num processo de solda manual. Como referência, o menor componente utilizado foi de 1 mm x 0,5 mm.

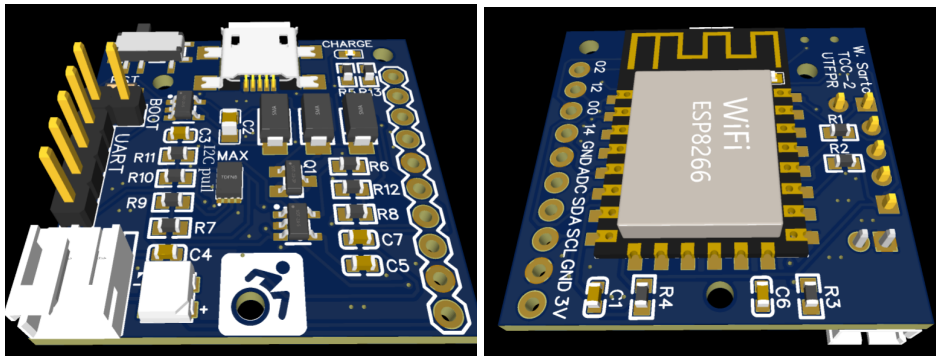
Figura 16 – Modelo 2D da PCI



Fonte: Autoria própria (2022).



Figura 17 – Modelo 3D da PCI

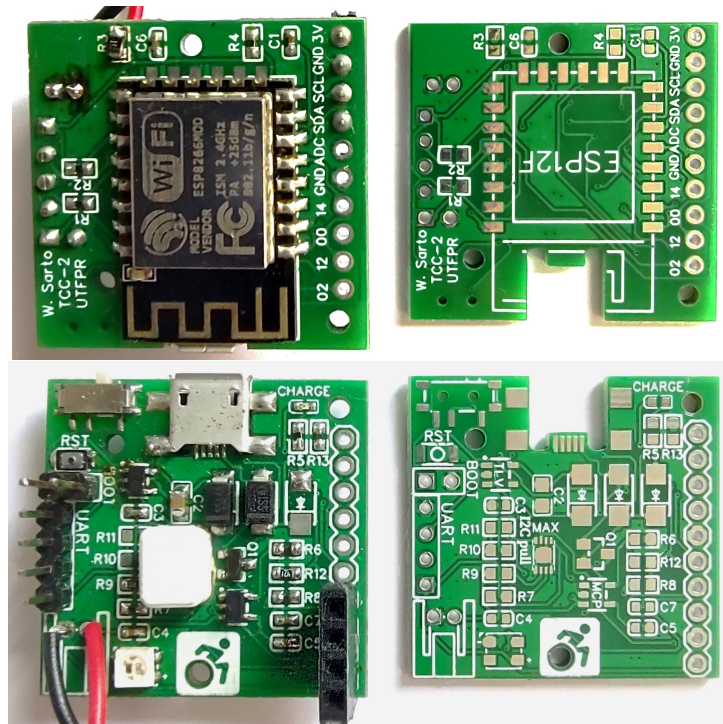


Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.4 Montagem e testes

Devido a natureza delicada dos pequenos componentes, foi utilizada uma estação de solda e ar quente profissional modelo 702B+ da fabricante Yaxun com controle eletrônico de temperatura. O processo foi elaborado manualmente com o auxílio de uma pinça para o posicionamento dos componentes. O resultado pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Montagem do *hardware* de controle



Fonte: Autoria própria (2022).

Após a montagem da PCI, foi realizada a fixação da mesma utilizando um cinto com fechamento em velcro. O posicionamento na cabeça do usuário pode ser visualizada na Figura 19.

**Figura 19 – Posicionamento do sensor na cabeça do usuário**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

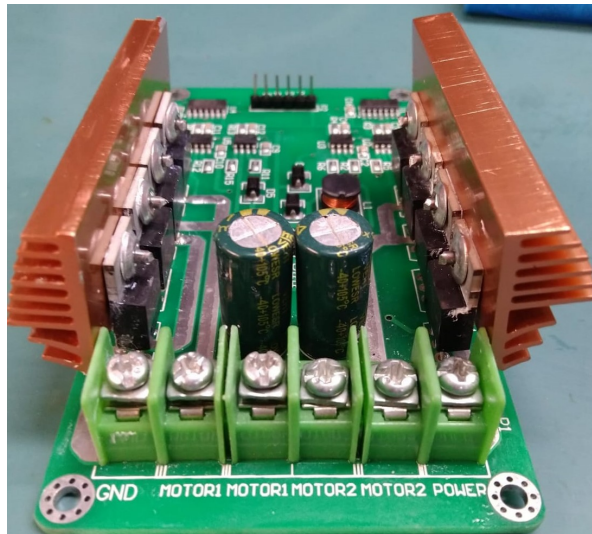
Os primeiros testes foram efetuados alimentando a PCI. Na sequência foi verificado se o computador reconhecia o microcontrolador através de um conversor *Universal Serial Bus* (USB) - *Universal asynchronous receiver/transmitter* (UART) modelo CP2102, como os resultados não foram positivos, foi necessário avaliar e reparar as falhas de solda com o auxílio de um multímetro digital modelo ET-1100-A. O único componente substituído foi o resistor *pull-down* R3 de  $12\text{ k}\Omega$ , para um de  $9,1\text{ k}\Omega$ , pois não estava exercendo sua função de aterrar o pino 15 do microcontrolador. A Figura 16 evidencia a posição do resistor substituído.

Com a PCI validada fez-se sua integração com o *hardware* de atuação, conforme indicado na Figura 15 para atender o quinto e último item disposto em 3.2.1. Para este *hardware* adquiriu-se um modelo comercial que atendesse os níveis de potência requeridos pelos motores. O driver selecionado pode ser visualizado na Figura 20 e possui as seguintes características:

- Duplo canal de acionamento;
- Tensão nominal 3 V à 36 V;
- Corrente nominal 10 A;
- Corrente de pico 30 A;
- Dimensões 108 mm x 58 mm;

Um ponto de atenção nessa etapa é que o driver de acionamento dos motores é acionado através de portas lógicas 74HCT02, que necessitam de alimentação 5 V (NEXPERIA, 2021). Um componente regulador de tensão modelo 7805 foi anexado utilizando-se da alimentação dos motores (Texas Instruments, 2003).

**Figura 20 – Driver de acionamento**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para garantir um funcionamento dentro da faixa de temperatura admissível para os transistores, foram anexados dissipadores de calor. O resultado final da instalação foi evidenciado na Figura 13.

### 3.3 Firmware

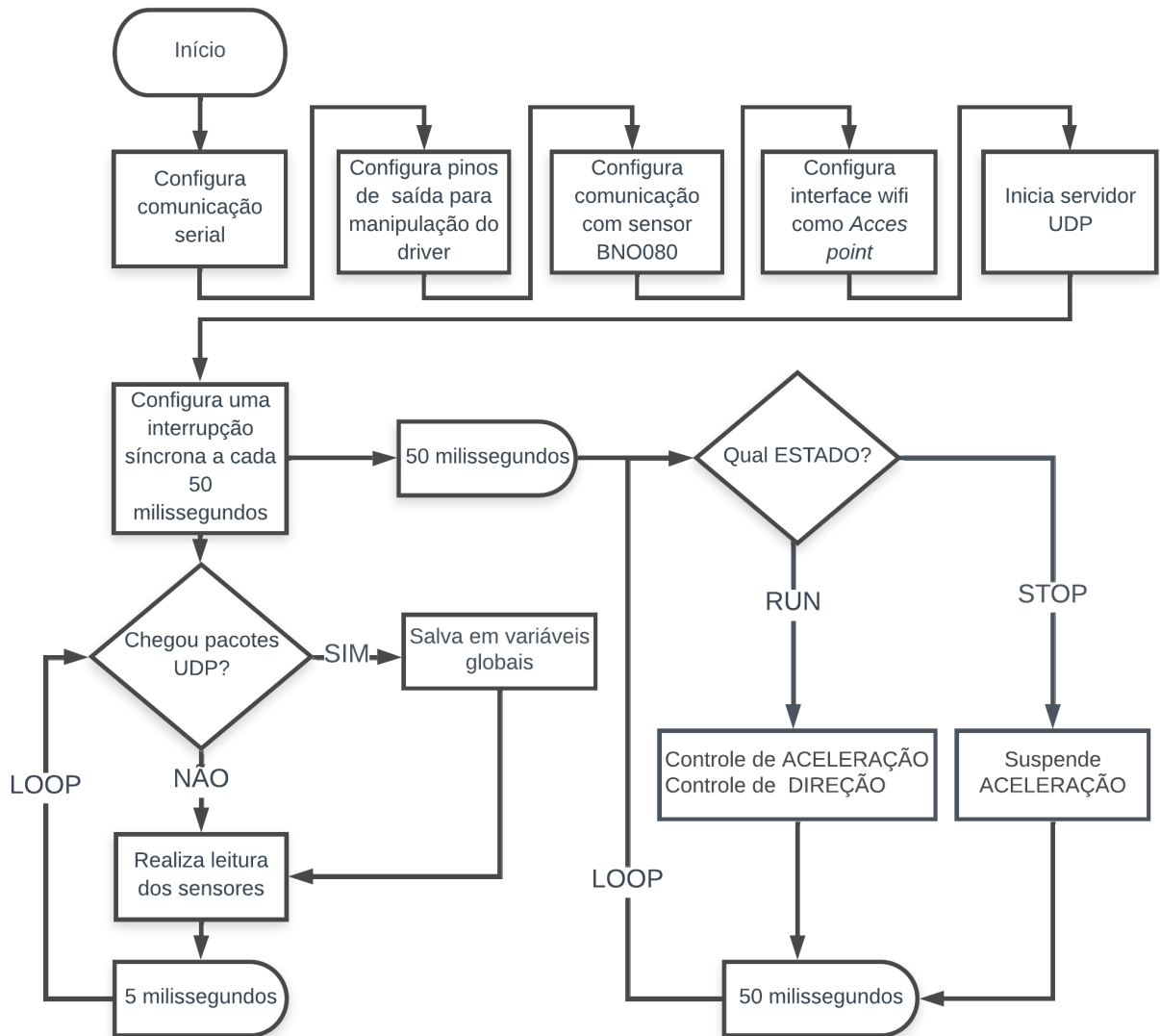
A etapa *firmware* é dependente das etapas anteriores e foi executada após a conclusão dos itens 3.1 e 3.2. Para realizar a programação foi utilizado o software *open-source* ARDUÍNO-IDE (BANZI *et al.*, 2021).

A Figura 21 apresenta o diagrama em blocos do *firmware* elaborado para o *hardware* posto na cadeira. O sistema inicia realizando a configuração dos periféricos e estabelecendo um servidor *User Datagram Protocol* (UDP) para otimizar a velocidade. Neste ponto, o hardware posicionado na cabeça pode estabelecer uma conexão. Após estabelecer conexão, realiza-se o tráfego de dados através do protocolo OSC, conforme 2.6.

O bloco **Chegou Pacotes UDP**, verifica continuamente o recebimento de dados de orientação provenientes do movimento da cabeça. Paralelamente uma rotina de interrupção executa o bloco **Verifica ESTADO**, onde a flexão e extensão sob os ombros (plano frontal) realizam a troca de estados, conforme Figura 22.

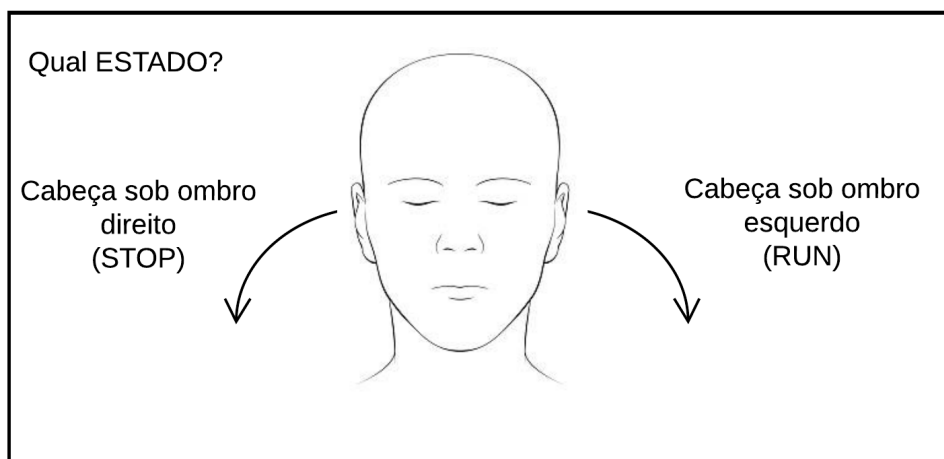
Os itens **controle ACELERAÇÃO e DIREÇÃO** estão representados em um único bloco devido ao processamento ser realizado na mesma função. Entretanto, deve-se interpretá-los individualmente. Para acelerar e desacelerar, deve-se realizar movimentos de flexão e extensão da cabeça. Para disponibilizar maior controle de velocidade da cadeira foram definidas 4 zonas de aceleração, conforme Figura 23.

**Figura 21 – Diagrama em blocos do *firmware***



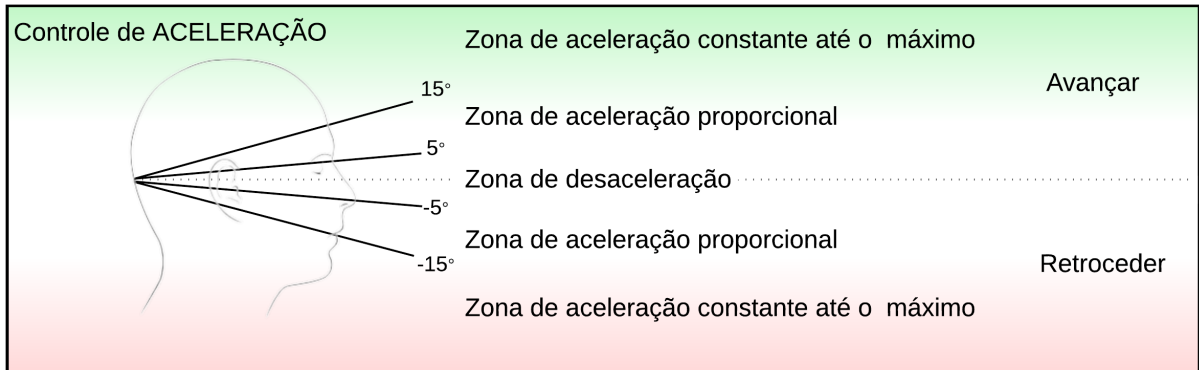
Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 22 – Movimentos para troca de estados**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 23 – Movimentos para acelerar e desacelerar**

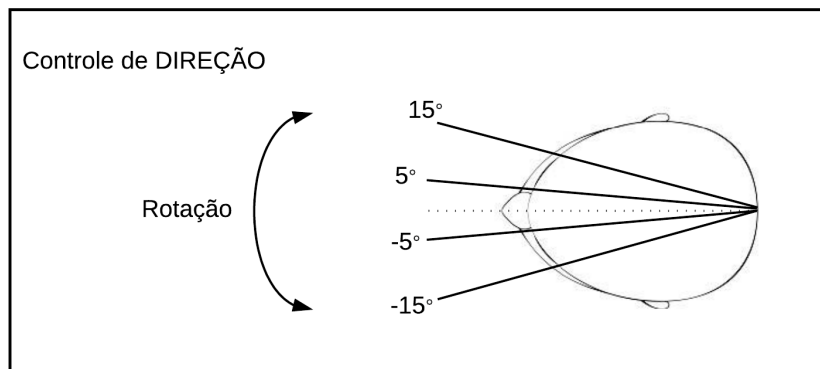


Fonte: Autoria própria (2022).

O controle da orientação da cadeira é realizado pela rotação da cabeça, conforme Figura 24. Os dados coletados deste movimento alimentam um algoritmo PID conforme descrito em 2.7. O algoritmo identifica a orientação da cadeira como realimentação do sistema, e busca manter a cadeira sempre alinhada à cabeça do usuário. A definição dos parâmetros do algoritmo PID seguiu os seguintes passos conforme GARCIA (2017):

1. Eliminar as ações integral e derivativa;
2. Ajustar  $K_c$  em um valor baixo (por exemplo 0,5) e aplicar um degrau;
3. Aumentar a constante  $K_c$  lentamente até verificar oscilações contínuas;
4. Reduzir  $K_c$  à metade;
5. Escolha valores  $K_i$  relativamente alto e diminua lentamente até que as oscilações contínuas ocorram. Ajuste  $K_i$  igual a três vezes esse valor;
6. Aumente  $K_d$  até que as oscilações contínuas ocorram. Ajuste  $K_d$  em um terço desse valor;

**Figura 24 – Movimentos para controle da orientação**



Fonte: Autoria própria (2022).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados diretos e indiretos obtidos com trabalho, analisando seu funcionamento e desempenho. Os resultados diretos referem-se a tudo que era esperado no processo e que pôde ser obtido. Como resultados indiretos, consideram-se elementos não esperados neste desenvolvimento.

### 4.1 Montagem estrutural da cadeira

A concepção e montagem da cadeira de rodas não passou por inúmeras versões de desenvolvimento e foi um processo linear. Dois fatos foram evidenciados com a problemática de movimentação da cadeira:

- Movimentação difícil devido à distância entre eixos.
- Rodas dianteiras com dinâmica de movimentação inapropriada.

A adaptação do rodízio no local do suporte para os pés atendeu os dois itens supracitados, com uma nova distância entre eixos de 76 centímetros. Ao manusear a cadeira foi possível identificar facilidade em manobrá-la, o que forneceu maior segurança para instalar os motores.

A instalação dos motores foi realizada por um serviço terceiro e a qualidade foi avaliada apenas no quesito funcionalidade, a qual atendeu conforme as expectativas. O custo da instalação foi relativamente alto ao considerar aspectos de acabamento visual.

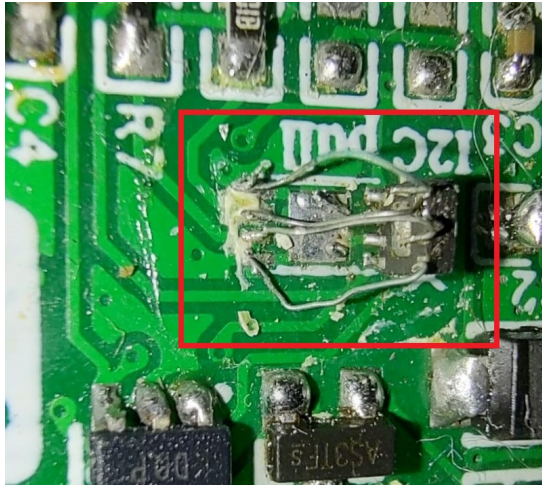
A fiação do conjunto de alimentação dos motores foi efetuada respeitando o diâmetro mínimo para o nível de potência requerida, entretanto, a fiação utilizada foi obtida através de retalhos, limitando o comprimento total e adicionando dificuldades na etapa de desenvolvimento.

### 4.2 Montagem da placa de circuito impresso (PCI)

A montagem completa dos pequenos componentes na PCI pode ser visualizada na Figura 18. Todo processo manual foi cuidadosamente revisado para evitar falhas elétricas. Uma observação que tornou o processo de montagem moroso, é que um dos componentes estava com seu desenho (*footprint*) ligeiramente menor do que o especificado pelo fabricante. Isso resultou na necessidade de adaptação, que pode ser visualizada na Figura 25, sendo extremamente, complexa sua realização. A espessura dos fios é inferior a  $300 \mu m$  e foi necessário adicionar uma pequena peça de plástico para protegê-los. Os resíduos de pasta de solda ao redor não foram removidos para não danificar as conexões.



**Figura 25 – Adaptação em solda de componente**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

### 4.3 Implementação do algoritmo de controle

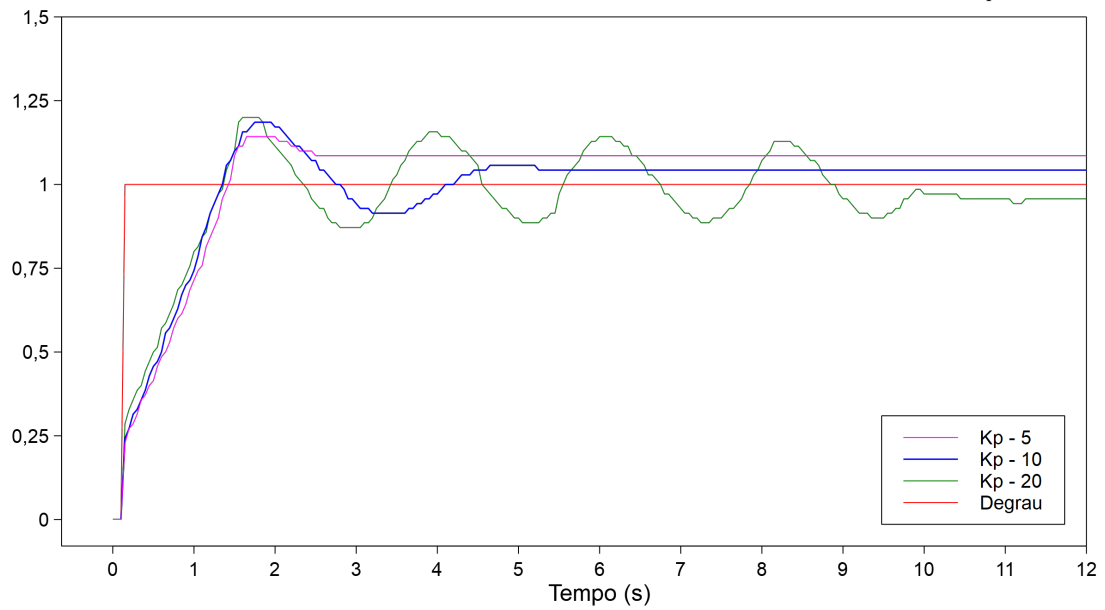
A primeira métrica coletada foi a latência de troca de mensagens entre o dispositivo posicionado na cadeira e os sensores posicionados na cabeça. Um *firmware* básico foi implementado, e a resposta média foi de 46 milissegundos. A latência delimita o tempo mínimo de atualização do algoritmo PID e, quanto menor esse valor mais cálculos por segundo o sistema realiza, tornando-o mais responsivo. O período de amostragem do sistema foi definido ligeiramente maior que a latência de troca de dados e atualização do algoritmo, neste caso em 50 milissegundos. Esse período é aproximadamente 20 vezes menor que a constante de tempo do sistema.

Ao iniciar a sintonia do algoritmo PID, os parâmetros constantes da Equação 1 disposta na sessão 2.7 foram ajustados, buscando um sistema criticamente amortecido, conforme Figura 9.

O degrau aplicado ao sistema da cadeira é representado por uma rotação de 180 graus, ou seja, um semicírculo. A resposta é a coleta dessa orientação em graus ao longo do tempo. O primeiro parâmetro analisado foi  $K_p$ , onde foi aplicado uma resposta em degrau com diferentes valores de  $K_p$  configurados. A influência do ganho pode ser visualizada na Figura 26. Ao reduzir o ganho o sistema tem menor oscilação contudo, o erro em estado estacionário aumenta.

Em seguida foi adicionado o termo integral, e sua resposta em degrau pode ser visualizada na Figura 27. Uma das características da integral é melhorar o erro em regime permanente. Entretanto, para essa planta, ao aumentarmos  $K_i$  o sistema se torna instável. Esse fato pode ser observado pelo aumento do sobressinal para um pequeno aumento de  $K_i$ . Para valores baixos o sistema converge depois de um longo tempo. Vale ressaltar que o controlador integral é sempre utilizado junto do proporcional, por isso, foi utilizado o melhor valor de acordo com o item anterior.

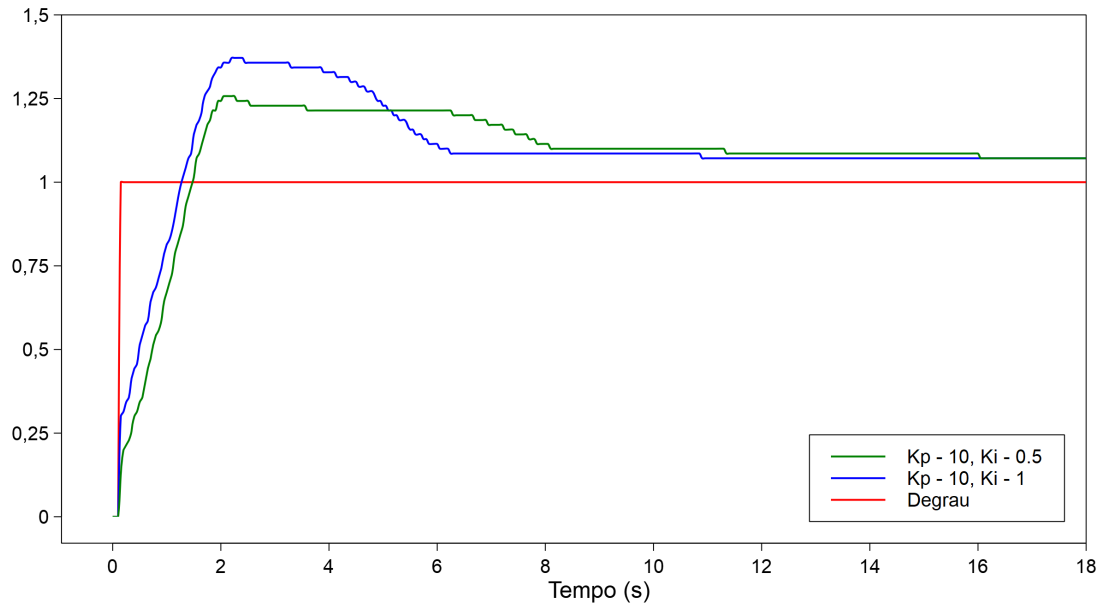
**Figura 26 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos  $K_p$**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Por fim, o termo derivativo foi adicionado, considerando o controlador completo PID foram testadas uma dezena de valores, e as constantes que melhor atendem a dinâmica do sistema foram expostas junto de sua resposta ao degrau na Figura 28. A derivada fornece propriedades antecipativas, e pode-se notá-las na estabilização do sistema mais rapidamente.

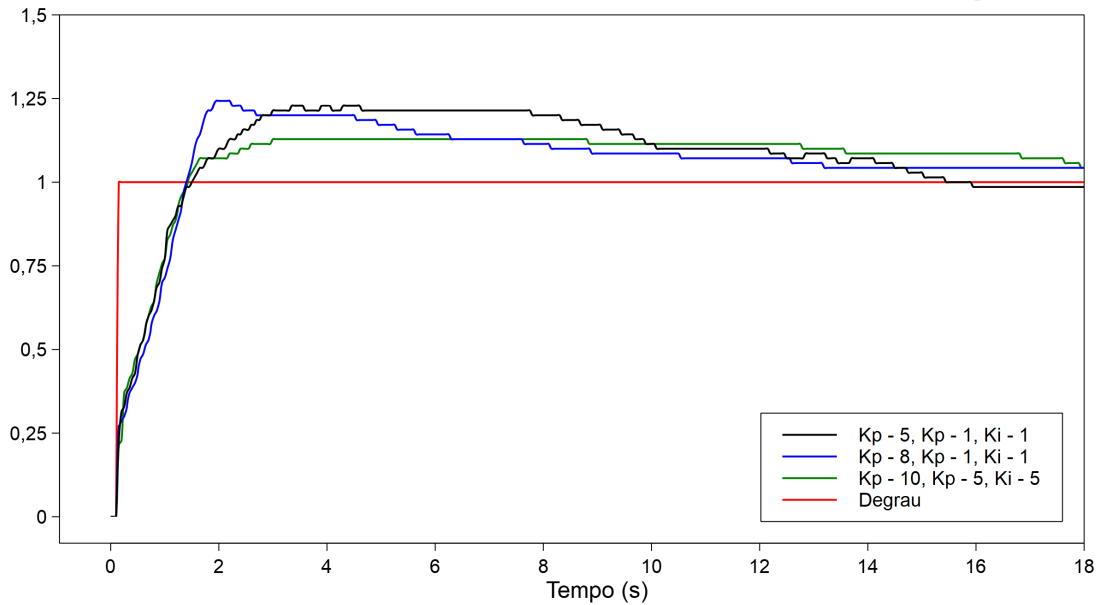
**Figura 27 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos  $K_{pi}$**



**Fonte: Autoria própria (2022).**



**Figura 28 – Resposta normalizada ao degrau para diferentes ganhos  $K_{pid}$**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### 4.4 Especificações do projeto

As especificações do projeto podem ser visualizada na Tabela 2. A velocidade pode ser considerada abaixo da média de produtos comerciais. Isso ocorre em virtude da bateria e sua capacidade de suprir os motores em plena carga. Para estimar a velocidade, coletou-se o tempo para cruzar uma distância de 10 metros sem carga.

**Tabela 2 – Especificações do projeto**

Atributo	Valor
Potência do motor	90 W - 12 V
Bateria	12 V - 7 Ah
Peso da bateria	2 kg
Carregador	13,7 V - 1 A
Velocidade máxima sem carga	4,38 km/h

**Fonte: Autoria própria (2022).**

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada adaptação eletromecânica de uma cadeira de rodas comum no mercado. A adaptação mecânica foi o mais simples possível, sendo anexados apenas, dois motores elétricos comuns e modificações das rodas dianteiras. O sistema eletrônico de controle é baseado em sinais de sensores inerciais. Os movimentos da cabeça são coletados e enviados para um algoritmo PID, que ajusta a orientação da cadeira. Um *firmware* baseado em estados melhoram a confiabilidade, desempenho e segurança do usuário.

O microcontrolador selecionado e a placa de circuito impresso elaborada atenderam as expectativas, conforme planejado. Uma conexão sem fio com latência aceitável foi estabelecida para tráfego de dados e o tamanho final possibilitou o posicionamento do item na cabeça.

O sistema foi sintonizado e testado em condições controladas e o algoritmo PID apresentou sucesso em ajustar a orientação do sistema, contudo, não foi possível configurá-lo com resposta transitória do tipo criticamente amortecido, isso ocorreu pois nesta configuração o sistema não estabilizava em tempo hábil.

Depois dos testes, um conhecimento aprofundado sobre a dinâmica da planta possibilitou conclusões mais assertivas sobre o sistema. Os motores elétricos escolhidos possuem uma zona "morta", onde ao aplicar uma tensão média abaixo de um limiar o motor não disponibilizava torque suficiente. Essa característica alterou toda dinâmica transitória do algoritmo.

### 5.1 Trabalhos futuros

Para aprimorar o projeto, sugere-se os seguintes itens.

- Utilizar uma segunda forma de realimentação baseada em detecção de posição e velocidade do motor (*encoder*).
- Realizar uma análise de movimentação da cadeira considerando a NBR ISO 7176.
- As cadeiras de rodas devem apresentar obrigatoriamente um sistema *quick-release*, que permite a rápida montagem e desmontagem das mesmas, tornando o transporte da cadeira mais prática. Com base nessa premissa, realizar um projeto que utiliza motores acoplados à roda é uma excelente abordagem.
- Utilizar motores com baixa rotação e torque maior.
- Realizar tratativas em *firmware* para desconexões.

## **5.2 Considerações finais**

O resultado macro do projeto pode ser avaliado como positivo, pois comprovou a possibilidade de realizar o controle da cadeira de rodas apenas com movimentos da cabeça. Todos os objetivos foram abordados, e as conclusões fornecem base para um projeto futuro completo.

## REFERÊNCIAS

- Ai-Thinker Technology Co. **ESP12-F**. Publicação eletrônica, 2018. 14 p. Version 1. Disponível em: [https://docs.ai-thinker.com/\\_media/esp8266/docs/esp-12f\\_product\\_specification\\_en.pdf](https://docs.ai-thinker.com/_media/esp8266/docs/esp-12f_product_specification_en.pdf). Acesso em: 09 out. 2022.
- AL-OKBY, M. F. R. *et al.* **Low-Cost, Flexible, and Reliable Hybrid Wheelchair Controller for Patients with Tetraplegia**. 2019. 177-183 p.
- ALMEIDA, S. A. d. *et al.* **Depressão em indivíduos com lesão traumática de medula espinal com úlcera por pressão**. Pouso Alegre, MG: [s.n.], 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcp/a/4GrgCkJhxmVPWNj99R9Cbmm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 21 set. 2022.
- ALVES, J. O. **Concepção de veículo motorizado elétrico modular de acoplamento universal em cadeiras de rodas mecanomanual**. ago. 2017. 178 p. Tese (Doutorado) — Engenharia mecânica, Faculdade Estadual Paulista de Guaratinguetá, Guaratinguetá, ago. 2017.
- BANZI, M. *et al.* **Arduino IDE**. Publicação eletrônica, 2021. Version 1.8.19. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 1 nov. 2022.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 1988. Disponível em: <https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/publicacaoLegislacaoAnotada/anexo/constituicao.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.
- BRASIL. **Diretrizes de Atenção à Pessoa com Lesão Medular**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: [www.saude.gov.br/bvs](http://www.saude.gov.br/bvs). Acesso em: 20 set. 2022.
- BRASIL. **LEI n.º 13.146**: institui a lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência (estatuto da pessoa com deficiência). Brasília, DF, 2015. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2015/Lei/L13146.htm#art112](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13146.htm#art112). Acesso em: 12 set. 2022.
- CDS Cadeiras©. **M2000**. 2022. Disponível em: <https://cdscadeiraderodas.com.br/m2000/>. Acesso em: 22 set. 2022.
- DISCHINGER, M.; ELY, V. H. M. B.; PIARDI, S. M. D. G. **Promovendo acessibilidade espacial nos edifícios públicos**: Programa de acessibilidade as pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida nas edificações de uso público. Flórianópolis, SC: MPSC, 2012. 161 p. Disponível em: [https://www.mpam.mp.br/attachments/article/5533/manual\\_acessibilidade\\_compactado.pdf](https://www.mpam.mp.br/attachments/article/5533/manual_acessibilidade_compactado.pdf). Acesso em: 1 set. 2022.
- EASYEDA. **PCB design simulação de circuitos online**. Publicação eletrônica, 2022. Version 6.5.20. Disponível em: <https://easyeda.com/page/about>. Acesso em: 1 nov. 2022.
- World Health Organization. **Towards a Common Language for Functioning, Disability and Health**: Icf the international classification of functioning, disability and health. Geneva, 2002. 21 p. Disponível em: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/classification/icf/icfbeginnersguide.pdf>. Acesso em: 3 out. 2022.
- Espressif Systems. **ESP8266EX**. Publicação eletrônica, 2022. 31 p. Version 6.7. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf). Acesso em: 09 out. 2022.

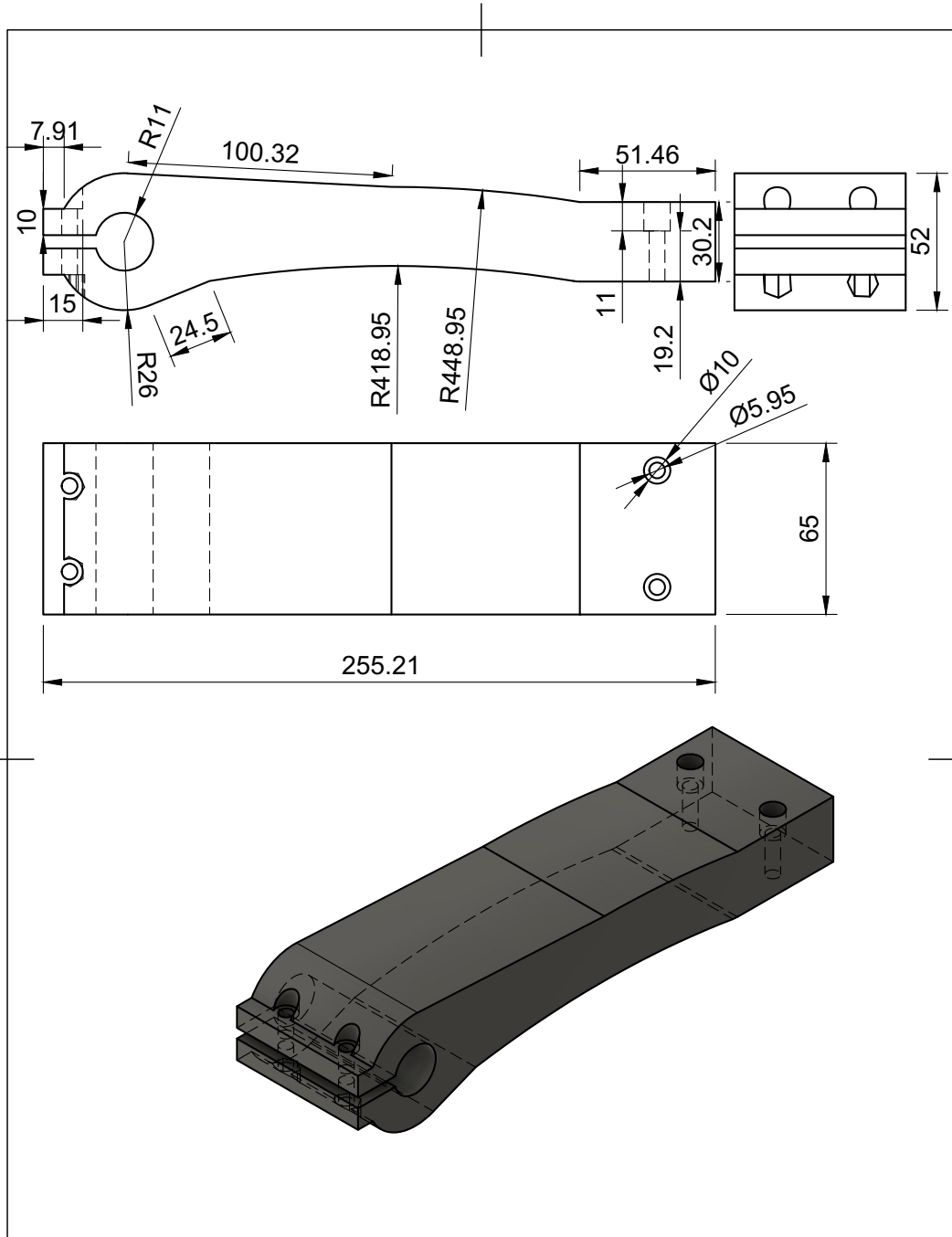
- FOROUZAN, B. A.; MOSHARRAF, F. **Redes de computadores**: uma abordagem top-down. 1a. ed. Porto alegre: AMGH, 2013. 860 p. E-book. ISBN 9788580551693. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580551693>. Acesso em: 09 out. 2022.
- FREED, A.; SCHMEDER, A. **Features and Future of Open Sound Control version 1.1 for NIME**. Berkeley, CA, 2009. 5 p. Version 1. Disponível em: <https://opensoundcontrol.stanford.edu/files/2009-NIME-OSC-1.1.pdf>. Acesso em: 09 out. 2022.
- GARCIA, C. **Controle de processos industriais**: Estratégias convencionais. Editora Blucher, 2017. 588 p. E-book. ISBN 9788521211860. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211860>. Acesso em: 10 out. 2022.
- GIMENEZ, S. P. **Microcontroladores 8051**: Teoria e prática. 1a. ed. São paulo: Érica, 2010. 320 p. E-book. ISBN 9788536519913. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519913>. Acesso em: 09 out. 2022.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência**: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre: AMGH, 2011. 490 p. E-book. ISBN 9788580550474. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550474>. Acesso em: 09 out. 2022.
- Hillcrest Laboratories. **BNO080 Data Sheet**. Publicação eletrônica, 2017. 57 p. Disponível em: [https://cdn.sparkfun.com/assets/1/3/4/5/9/BNO080\\_Datasheet\\_v1.3.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/1/3/4/5/9/BNO080_Datasheet_v1.3.pdf). Acesso em: 5 Nov. 2022.
- MADGWICK, S. O. H.; HARRISON, A. J. L.; VAIDYANATHAN, R. **Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm**. 2011. 1-7 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5975346>. Acesso em: 1 out. 2022.
- NEXPERIA. **74HC02; 74HCT02**: Quad 2-input nor gate. Publicação eletrônica, 2021. 13 p. Disponível em: [https://br.mouser.com/datasheet/2/916/74HC\\_HCT02-1517193.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/916/74HC_HCT02-1517193.pdf). Acesso em: 30 set. 2022.
- NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de janeiro: Grupo GEN, 2017. 588 p. E-book. ISBN 9788521634379. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634379>. Acesso em: 12 out. 2022.
- Organização Mundial da Saúde (OMS). **Spinal cord injury**. 2013. Disponível em: <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>. Acesso em: 21 set. 2022.
- PETRUZELLA, F. D. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre: AMGH, 2013. 366 p. E-book. ISBN 9788580552584. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552584>. Acesso em: 08 out. 2022.
- ROSA, M. A. B. F.; FREITAS, C. C. G.; ROSA, V. F. **Tecnologia assistiva e tecnologia social**: análise dos limites da relação entre ambas. 2020. 1-17 p. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/8010>. Acesso em: 21 set. 2022.
- SPARKFUN ELECTRONICS. **Accelerometer, Gyro and IMU Buying Guide**. Publicação eletrônica, 2022. Disponível em: [https://www.sparkfun.com/pages/accel\\_gyro\\_guide](https://www.sparkfun.com/pages/accel_gyro_guide). Acesso em: 5 nov. 2022.
- Texas Instruments. **A7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS**. Publicação eletrônica, 2003. 12 p. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>. Acesso em: 30 set. 2022.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. d. **Sensores industriais**: fundamentos e aplicações. São paulo: Érica, 2010. 224 p. ISBN 9788580550443.

*WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO)*. **International Classification of Functionality, Disability and Health (ICF)**. Geneva: [s.n.], 2001. Disponível em: <http://www.asphi.it/english/disabilitaoggi/definizionioms.htm>. Acesso em: 21 set. 2022.

**APÊNDICE A – Desenho 2D detalhado do modelo de adaptação do rodízio**

Figura 29 – Desenho 2D detalhado

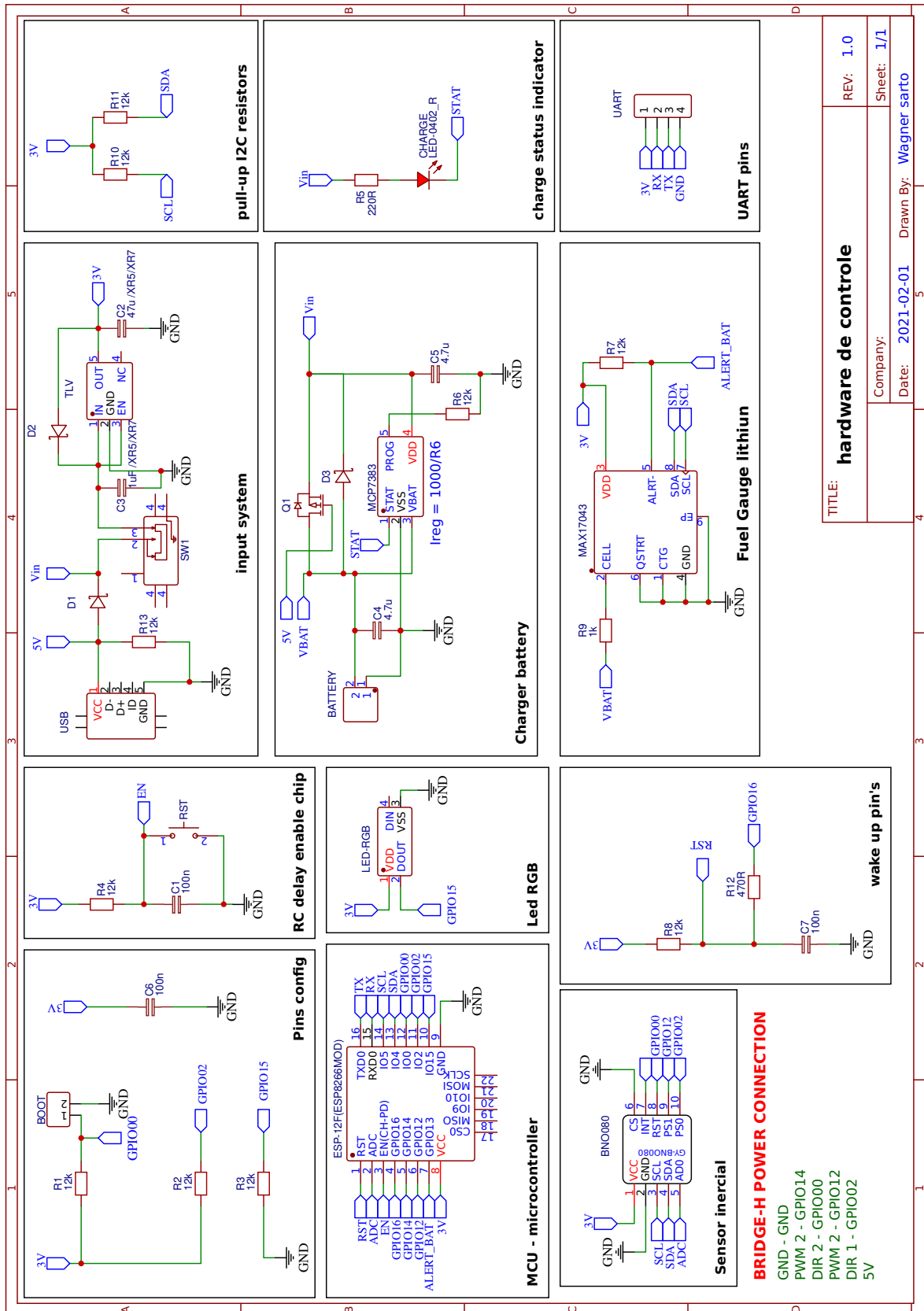


Dept.	Technical reference	Created by Wagner R. Sarto 28/09/2022	Approved by
UNIDADES: mm ESCALA: $\frac{1}{2}$		Document type	Document status
		Title Suporte para rodízio	DWG No.
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	



## **APÊNDICE B – Esquemático eletrônico (hardware de controle)**

Figura 30 – Esquemático do projeto



Fonte: Autoria própria (2022).