

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS DE JESUS MACHADO CASTRO

**ALTERAÇÕES EM UMA MAQUETE CONTENDO TRÊS ELEVADORES E SEIS  
ANDARES COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SIMULADOR DESSA PLANTA**

SÃO LUÍS

2018

MATHEUS DE JESUS MACHADO CASTRO

**ALTERAÇÕES EM UMA MAQUETE CONTENDO TRÊS ELEVADORES E SEIS  
ANDARES COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SIMULADOR DESSA PLANTA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Buonocore

São Luís

2018

Castro, Matheus de Jesus Machado.

Alterações em uma maquete contendo três elevadores e seis andares com a implementação de um simulador dessa planta / Matheus de Jesus Machado Castro. - 2018.

89 p.

Orientador(a): Luciano Buonocore.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, UFMA, 2018.

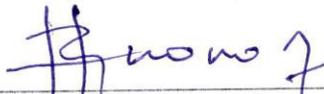
1. Maquete de elevadores. 2. Simuladores. 3. Sistemas embarcados. I. Buonocore, Luciano. II. Título.

MATHEUS DE JESUS MACHADO CASTRO

**ALTERAÇÕES EM UMA MAQUETE CONTENDO TRÊS ELEVADORES E SEIS ANDARES COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SIMULADOR DESSA PLANTA.**

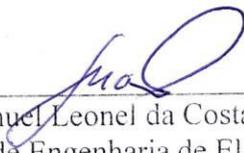
Aprovada em 13 /12 / 2018

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. Luciano Buonocore (Orientador)  
Departamento de Engenharia de Eletricidade - UFMA



---

Prof. Dr. Manuel Leonel da Costa Neto (Membro)  
Departamento de Engenharia de Eletricidade - UFMA



---

Prof. MSc. Nelson José Camelo (Membro)  
Departamento de Engenharia de Eletricidade - UFMA

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus familiares pelo amor, apoio e pela compreensão. Sem dúvidas que a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica só foi possível graças a esse apoio.

Ao meu orientador Luciano Buonocore, pela oportunidade de ingresso no laboratório, pela orientação neste trabalho e em outras atividades, força de vontade e disposição. Agradeço e tenho-o como um exemplo tanto de pessoa, como de profissional excelente.

A todos os amigos do LRC, pela grande ajuda, conselhos, pelos momentos compartilhados e pelo apoio. Agradeço a todos pelo tempo dedicado às minhas dúvidas, em especial, Daniel Velozo, Luiz Eugênio, Joelson Miller e Danilo Ferreira.

Aos colegas e professores do curso de Engenharia Elétrica, por participarem dessa jornada árdua e longa, porém, recompensadora. Agradeço a todos pelos ensinamentos e lições.

Por fim, dedico este trabalho à Raymundo Lima Machado Junior, um amigo, companheiro e irmão.

## Resumo

O deslocamento de pessoas e cargas, nas médias e grandes cidades, em edifícios residenciais, de serviços e de produção, faz uso de sistemas de elevadores, na medida em que as construções passaram a ser estruturadas no sentido vertical como forma de otimização do espaço ocupado nas cidades. O controle desses meios de transportes tem se tornado cada vez mais inteligentes de maneira a minimizar o tempo de atendimento de seus usuários e também da energia empregada, critérios bastante requeridos na atualidade. Nos prédios comerciais, especialmente, não raro hoje se encontram mais de um elevador, chegando a valores de algumas unidades, sendo comum empregarem até uma dezena deles. O presente trabalho tem como objetivo realizar adaptações em uma maquete física contendo três elevadores e seis andares, além de definir os circuitos e *layout* da placa eletrônica de interface entre a maquete e o sistema de controle. Para tal, foram desenvolvidos os principais módulos de um simulador da estrutura física da maquete e de sua eletrônica de interface, possibilitando futuro desenvolvimento do controle, inicialmente na versão simulada da maquete para, posteriormente, ser testado na planta física. Além de constituir uma ferramenta para pesquisa, as maquetes físicas e simuladas apresentam-se como ferramentas didáticas para a disciplina TEEE – Sistemas Embarcados oferecida regularmente ao Curso de Engenharia Elétrica da UFMA. Foram implementadas rotinas para testes das alterações mecânicas e eletrônicas realizadas na maquete física, bem como para a validação dos módulos desenvolvidos para o simulador, tendo sido obtidos resultados quantitativos e qualitativos satisfatórios.

Palavras-chave: Maquete de elevadores; Simuladores; Sistemas Embarcados.

## **Abstract**

The displacement of people and loads, in medium and large cities, in residential, service and production buildings, makes use of elevator systems, as the constructions were being structured vertically as a way of optimizing the space occupied in the cities. The control of these means of transport has become increasingly intelligent in a way to minimize the time of service of its users and also of the energy employed, criterion that are very much required at the present time. In commercial buildings, especially, more often than not, there is more than one elevator, reaching numbers of some units, and usually employing up to a dozen of them. This monograph made adaptations in a physical model containing three elevators and six floors, in addition to redefining the new circuits and layout of the interface electronic board between the model and the control system. The main modules of a simulator of the physical structure of the model and its interface electronics were developed, allowing for the future development of the control, initially in the simulated version of the model to be later tested in the physical plant. In addition to being a research tool, physical and simulated mockups are presented as teaching tools for the Embedded Systems course, offered regularly to the Electrical Engineering Course of the Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Routines were used to test the mechanical and electronic changes performed in the physical model, as well as for the validation of the modules developed for the simulator, obtaining satisfactory quantitative and qualitative results.

**Keywords:** Lifts model; Simulators; Embedded Systems.

## Lista de Figuras

Figura 1	– Construção das pirâmides no Egito, provável uso inicial do elevador.....	18
Figura 2	– Máquinas de elevação propostas por Arquimedes.....	19
Figura 3	– Sistema de elevação de escravos utilizado na Roma Antiga.....	20
Figura 4	– Apresentação de Elisha (imagem à esquerda) em Exposição Mundial em Nova York.....	21
Figura 5	– Shanghai Tower, edifício com o elevador mais rápido do mundo.....	24
Figura 6	– Principais partes de um elevador.....	27
Figura 7	– Esquema de funcionamento de um elevador Multi.....	29
Figura 8	– Principais partes do Raspberry Pi 3 modelo B.....	36
Figura 9	– Interfaces da nova placa dos elevadores.....	43
Figura 10	– Esquema dos pinos da interface de entrada na placa.....	43
Figura 11	– Organização da palavra do PCF8574A do sensor óptico.....	46
Figura 12	– Organização da palavra referente aos <i>bumpers</i> .....	46
Figura 13	– Disposição dos <i>push buttons</i> na maquete de elevadores.....	47
Figura 14	– Detalhamento dos elementos da maquete: a) cabine, <i>push buttons</i> e sensor óptico e b) <i>bumper</i> e parte inferior do elevador.....	49
Figura 15	– Sensor óptico QRB1134 e sistema de identificação de andares.....	50
Figura 16	– Vistas da maquete de elevadores antes das alterações: a) frontal, b) traseira, c) lateral esquerda e d) lateral direita.....	51
Figura 17	– Maquete de elevadores após alterações realizadas.....	52
Figura 18	– Interface de conexão dos RPi3B do simulador (esquerda) com o de controle (direita).....	55
Figura 19	– Organização dos módulos do simulador.....	56
Figura 20	– Modulação em sinal PWM.....	57
Figura 21	– Fluxograma da rotina de identificação do sinal PWM.....	58
Figura 22	– Apresentação dos submódulos do processo de I2C.....	60
Figura 23	– Apresentação dos dados em tela.....	63
Figura 24	– Apresentação dos pedidos de descida em tela e da solicitação de acordo com a codificação.....	65
Figura 25	– Mapeamento dos PCFs na placa.....	69
Figura 26	– Fluxograma da rotina utilizada para testar os <i>bumpers</i> .....	71
Figura 27	– Rotina de testes dos sensores ópticos.....	72

Figura 28	– Fluxograma da rotina utilizada para identificar os pedidos feitos através dos <i>push buttons</i> .....	73
Figura 29	– Relação entre distância e corrente de coletor no sensor óptico.....	76
Figura 30	– Valores de PWM lidos e andares calculados logo após iniciar o funcionamento do simulador.....	82
Figura 31	– Valores de PWM lidos e andares calculados após determinado período de atuação do simulador.....	83
Figura 32	– Identificação dos andares do elevador.....	84
Figura 33	– Detecção dos <i>bumpers</i> inferiores.....	84
Figura 34	– Não detecção dos <i>bumpers</i> inferiores.....	85

## Lista de Tabelas

Tabela 1	– Funcionalidades esperadas da nova placa eletrônica.....	39
Tabela 2	– Lista dos componentes escolhidos de acordo com as funcionalidades executadas na placa.....	39
Tabela 3	– Características Elétricas PCF8574A.....	41
Tabela 4	– Características Elétricas 74LS244.....	41
Tabela 5	– Descrição lógica do funcionamento da Ponte H.....	44
Tabela 6	– Definição do movimento de cada elevador através dos sinais em dois pinos.....	61
Tabela 7	– Codificação dos tipos de pedidos realizados através do teclado matricial.....	64
Tabela 8	– Endereços disponíveis para comunicação no simulador.....	66
Tabela 9	– Correspondência entre os PCFs e os endereços.....	70
Tabela 10	– Percentual mínimo de identificação corretas de todos os andares em movimento de subida e descida.....	75
Tabela 11	– Valores de <i>duty cycle</i> aplicados ao simulador.....	78
Tabela 12	– Percentual de testes que operaram com sucesso no módulo I2C....	79
Tabela 13	– Percentual de reconhecimento de endereço e dados pelo simulador.....	80
Tabela 14	– Taxa de recepção correta de dados pelo mestre em modo leitura...	81
Tabela 15	– Média dos erros percentuais máximos relativos a leitura de PWM.....	82

## Lista de Abreviaturas e Siglas

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit.</i>
RPI3B	Raspberry Pi 3 Modelo B
TEEE	Tópicos Especiais em Engenharia Elétrica.
LED	<i>Light-Emitting Diode.</i>
LRC	Laboratório de Robótica Móvel e Comunicação Sem Fio.
CC	Corrente Contínua.
GPIO	<i>General Purpose Input Output.</i>
CSI	<i>Camera Serial Interface.</i>
DSI	<i>Display Serial Interface.</i>
SoC	<i>System on a Chip.</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit.</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface.</i>
CI	Circuito Integrado.
SSH	<i>Secure Shell.</i>
PC	Computador Pessoal.

## Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	14
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Motivação.....	15
1.3	Contextualização do trabalho.....	16
1.4	Organização do trabalho.....	16
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	17
2.1	Meios de transportes verticais e elevadores.....	17
2.2	História dos elevadores.....	18
2.3	Automação e controle dos elevadores.....	22
2.4	Elevadores modernos.....	23
2.5	Tipos de acionamento de elevadores.....	24
2.5.1	Elevadores hidráulicos.....	25
2.5.2	Elevadores elétricos.....	25
2.5.3	Elevadores elétricos.....	26
2.6	Principais componentes de um elevador.....	27
2.7	Sistemas de elevadores Multi e sistemas de elevadores inteligentes em prédios.....	28
2.8	Simuladores.....	30
2.8.1	Simuladores eletrônicos em outras áreas.....	31
2.8.2	Simuladores em engenharia.....	32
2.9	Sistemas embarcados de baixo custo.....	34
3	<b>ALTERAÇÕES NA PLACA ELETRÔNICA E NA MAQUETE DE ELEVADORES.....</b>	38
3.1	Alterações na placa eletrônica.....	38
3.1.1	Planejamento e confecção da placa eletrônica.....	38
3.1.2	Inserção do <i>buffer</i> 74LS244.....	40
3.1.3	Testes em protoboard.....	41
3.1.4	Criação do layout e confecção da placa.....	41
3.2	Mapeamento da nova placa de elevadores.....	42
3.2.1	Interface 1 - Entrada dos sinais do Raspberry PI 3 para a placa.....	42
3.2.2	Interface 2 - Motores.....	44

3.2.3	Interface 3 - LEDs.....	45
3.2.4	Interface 4 - LCD-teclado.....	45
3.2.5	Interface 5 - Sensores ópticos.....	45
3.2.6	Interface 6 - <i>Bumpers</i> .....	45
3.2.7	Interface 7 - <i>Push buttons</i> .....	47
3.2.8	Interface 8 - Alimentação.....	48
3.3	Alterações na planta física da maquete de elevadores.....	48
3.3.1	Descrição da maquete física de elevadores.....	48
3.3.2	Instabilidade dos elevadores.....	50
3.3.3	Despadronização dos conectores da maquete.....	52
4	<b>SIMULADOR DA MAQUETE DE ELEVADORES.....</b>	54
4.1	Concepção física do simulador.....	54
4.2	Organização em módulos.....	55
4.2.1	Módulo PWM.....	56
4.2.2	Módulo I2C.....	58
4.2.3	Módulo de processamento de recursos.....	60
4.2.4	Módulo de apresentação dos dados em tela.....	62
4.3	Simulação da placa eletrônica de interface.....	63
4.4	Simulação dos estados dos elementos da maquete.....	63
4.5	Exemplo de funcionamento do simulador.....	65
5	<b>EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....</b>	68
5.1	Descrição das rotinas de testes da nova placa eletrônica dos elevadores.....	68
5.1.1	Rotinas de testes dos LEDs da maquete.....	68
5.1.2	Rotina de testes dos <i>bumpers</i> e dos motores dos elevadores.....	69
5.1.3	Rotina de testes dos sensores ópticos.....	70
5.1.4	Rotina de testes dos <i>push buttons</i> .....	72
5.2	Resultados obtidos nos experimentos aplicados à nova placa eletrônica dos elevadores.....	73
5.2.1	Resultados dos testes dos LEDs da maquete.....	73
5.2.2	Resultados dos testes dos <i>bumpers</i> e de acionamento dos motores.....	74
5.2.3	Resultados dos testes de verificação dos sensores ópticos.....	74
5.3	Descrição das rotinas de testes para validação do simulador.....	75
5.3.1	Rotinas de testes do módulo I2C.....	76
5.3.2	Rotinas de testes do módulo PWM.....	77

5.3.3	Rotinas de testes do submódulo dos cálculos dos andares do simulador.....	77
5.3.4	Rotinas de identificação dos sensores ópticos e identificação dos andares.....	78
5.3.5	Rotina de verificação do funcionamento dos <i>bumpers</i> .....	78
5.3.6	Rotinas de verificação do funcionamento dos <i>push buttons</i> e <i>keypad</i> do simulador.....	78
5.4	Resultados obtidos nos experimentos aplicados ao simulador.....	79
5.4.1	Resultados das rotinas de testes do módulo I2C.....	79
5.4.2	Resultados das rotinas de testes do módulo de PWM.....	81
5.4.3	Resultados das rotinas de testes do submódulo dos cálculos dos andares do simulador.....	82
5.4.4	Resultados das rotinas de testes do submódulo dos sensores ópticos e identificação dos andares.....	83
5.4.5	Resultados das rotinas de verificação do funcionamento dos <i>bumpers</i> .....	83
6	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	86
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	

## 1 INTRODUÇÃO

Nos tempos modernos, os meios de transporte possibilitaram uma diminuição considerável no período de tempo gasto de deslocamento das pessoas dentro das cidades. Contudo, o grande fluxo de carros e pessoas acabam por diminuir de maneira considerável a quantidade de tempo, ou melhor, a vantagem proporcionada, segundo estudos da Firjan (Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro), onde informa que o brasileiro perde aproximadamente 2 horas e 30 minutos no deslocamento de sua casa para o trabalho<sup>1</sup>. Da mesma forma, os elevadores, que surgiram como meios de transporte verticais para deslocamento de pessoas e cargas dentro de edifícios, apresentam atualmente desafios que visam realizar a otimização de seu funcionamento, dentre os quais destacam-se a minimização do tempo de espera e da energia gasta no transporte.

As técnicas utilizadas para atender aos desafios propostos pelos elevadores modernos passam desde mudanças estruturais (formas de montagens) até a concepção de técnicas de controles inteligentes. Do ponto de vista estrutural, algumas medidas já incorporadas aos elevadores mostraram-se extremamente eficientes, dentre as quais se destacam a concepção de cabines sem casa de máquinas e a inserção de inversores de frequência (controle de velocidade através da variação de tensão e frequência) para controle de velocidade e acionamento dos motores dos mesmos. Essas medidas possibilitaram, dentre outras coisas, a operação dos elevadores com velocidades superiores às até então utilizadas. Já do ponto de vista do controle, a otimização do funcionamento dos elevadores vem sendo desenvolvida através de técnicas de inteligência artificial na tentativa de otimizar o atendimento aos pedidos dos elevadores. Além disso, há de se destacar também a necessidade atual desses equipamentos de transporte atenderem aos requisitos mínimos de eficiência energética. Entende-se por eficiência energética o funcionamento do elevador utilizando a menor quantidade de energia possível, ou seja, não proporcionando desperdícios quando o mesmo se encontra em operação. Essa otimização, seja através de mudanças estruturais (utilização de inversores de frequência, por exemplo) ou através de mecanismos de controle mais eficientes, pode possibilitar uma economia de até 30% no consumo de energia elétrica dos elevadores<sup>2</sup>.

Na presente monografia é descrita a estrutura física de uma maquete de seis andares com três elevadores e de sua placa eletrônica de interface, a qual condiciona os sinais de comando e

---

<sup>1</sup> Site:<https://oglobo.globo.com/rio/trabalhadores-gastam-mais-tempo-nos-engarrafamentos-20030340>

<sup>2</sup> Site:<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/159/sobe-e-desce-inteligente-elevadores-de-passageiros-tem-sistemas-285485-1.aspx>

sensoriamento que transitam entre ela e o sistema de controle. Ademais, foram desenvolvidos módulos importantes que visam implementar um simulador completo da maquete física, que representa uma ferramenta didático-pedagógica essencial para os testes de rotinas de controle a serem desenvolvidas antes de usá-las na maquete física.

## 1.1 Objetivos

Esta monografia tem como objetivo geral dispor de forma totalmente operacional uma maquete de seis andares com três elevadores, tanto física quanto simulada, para posterior uso em desenvolvimento e implementação de sistemas de controle da estrutura com ou sem o uso de técnicas de inteligência artificial.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- a) verificar a operacionalidade da maquete física e simulada em ações de comandos diversos de movimentos dos elevadores;
- b) validar a operação integrada dos diversos elementos sensores e atuadores presentes na maquete física e simulada, em diferentes perfis de acionamento dos elevadores; e
- c) emprego como ferramenta didático-pedagógica para o ensino da disciplina **TEEE – Sistemas Embarcados**, oferecida regularmente desde o segundo semestre de 2016 ao Curso de Engenharia Elétrica da UFMA.

## 1.3 Motivação

O desenvolvimento desta monografia está totalmente inserido na disponibilização de uma estrutura física e simulada de uma maquete de elevadores no LRC (Laboratório de Robótica Móvel e Comunicação Sem Fio), onde a pesquisa foi realizada. O escopo deste trabalho foi delimitado para lidar com as pesquisas que envolveram as alterações tanto mecânicas (na maquete de elevadores) quanto na placa eletrônica de interface (comunicação entre o controle e a maquete), além de sua contraparte simulada. Mesmo considerando uma estrutura de baixa quantidade de andares (seis), o problema abordado se torna significativo na medida em que o controle que venha a ser desenvolvido, utilizando ou não técnicas de inteligência artificial, deve tratar da alocação de recursos (três elevadores) com o objetivo de diminuir o tempo de espera do usuário do sistema com a otimização da energia gasta. Nesse contexto, uma maior quantidade de andares é menos importante que uma maior quantidade de recursos para

gerenciar. De qualquer modo, a maquete disponibilizada no projeto já tem suficiente complexidade para justificar sua utilização como ferramenta de pesquisa e desenvolvimento no Curso de Engenharia Elétrica da UFMA.

#### **1.4 Contextualização do Trabalho**

Os objetivos apresentados nesta monografia baseiam-se na resolução de problemas detectados em uma monografia anterior, apresentada pelo aluno Bruno Gomes (2015) intitulada “Controle de uma maquete com três elevadores usando FPGA”. No projeto desenvolvido houve a utilização da maquete de elevadores e da placa eletrônica de interface, onde detectou-se um excesso de vibração na estrutura quando os elevadores estavam em movimento o que dificultava a inserção do controle à maquete e, além disso, a placa eletrônica desenvolvida não contemplava de maneira satisfatória todos os circuitos necessários para controle dos elevadores.

Diante dos problemas detectados verificou-se a necessidade de se realizar alterações na planta física e a confecção de uma nova placa eletrônica que possibilitassem a implementação confiável de alguma forma de controle seja a regra fixas ou baseado em inteligência artificial.

#### **1.5 Organização do Trabalho**

O presente trabalho de monografia foi estruturado, conforme segue abaixo.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, onde são abordados o desenvolvimento histórico e os principais tipos de elevadores existentes de acordo com a forma de acionamento. Além disso são explorados também os conceitos pertinentes aos simuladores, os seus existentes e a utilização em diversas áreas, destacando-se o uso na área de Engenharia Elétrica.

No Capítulo 3 é descrita a maquete de elevadores física e as alterações nela realizadas, além de se apresentar o processo de confecção da nova placa de interface entre os elementos da maquete e o controle.

O Capítulo 4 é dedicado à implementação do simulador, descrevendo a operação de cada módulo desenvolvido e a correspondência destes com a placa de interface e a planta física.

No Capítulo 5 são apresentados os experimentos que foram aplicados tanto à planta física, quanto ao simulador, além de se mostrar os resultados obtidos com esses testes.

Finalmente, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão dessa pesquisa com sugestões de propostas para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar a evolução histórica dos elevadores, partindo-se da concepção do transporte vertical de cargas e pessoas até a propostas implementadas de cabinas móveis mais confortáveis e rápidas do mundo. São apresentados os tipos de elevadores, as suas principais partes e os atuais desafios da indústria deste segmento.

Ainda neste capítulo são abordados os simuladores utilizados em Engenharia Elétrica, com ênfase naqueles que modelam em computadores comportamentos de uma planta física. No caso deste trabalho, refere-se a maquete dos elevadores e a eletrônica de interface que media a troca de informações entre os dispositivos existentes na maquete (motores, botões, LEDs, etc.) e o controle do sistema de elevadores que permite o funcionamento satisfatório de um ou mais dessas três cabinas.

### 2.1 Meios de transporte verticais e elevadores

A partir da segunda metade do século XX, o Brasil passou por um intenso processo de urbanização o que acarretou em um grande crescimento, tanto a nível populacional, quanto a territorial dos principais centros industrializados do país. A análise de crescimento de uma cidade permite claramente identificar etapas que a constituem. A primeira etapa é a expansão da cidade, onde verifica-se a transformação do solo rural em urbano. Em seguida tem-se a fase da consolidação e, por fim, tem-se a da densificação, a qual consiste no processo de verticalização das cidades, ou seja, o crescimento em altura. É no processo de verticalização das cidades que os meios de transporte verticais se fazem cada vez mais necessários para realizar o deslocamento de pessoas e cargas no interior dos edifícios<sup>3</sup>.

Entende-se por meios de transporte verticais as máquinas empregadas para mover cargas em estabelecimentos ou áreas, departamentos, fábricas e indústrias, nos locais de construção, de armazenagem e recarga (RUDENKO, 1976). O conceito acima, apesar de especificar apenas o emprego para o transporte de cargas, pode também ser estendido para pessoas. Desta forma, os elevadores constituem um tipo de meio de transporte vertical destinado a movimentação de pessoas e cargas dentro de estruturas tais como edifícios, destinados a levantar cargas de forma guiada, por serem grupos de máquinas de ação periódica, (RUDENKO, 1976).

---

<sup>3</sup>Site: <https://www.archdaily.com.br/br/01-92172/observando-as-torres-como-a-cidade-tende-a-crescer>

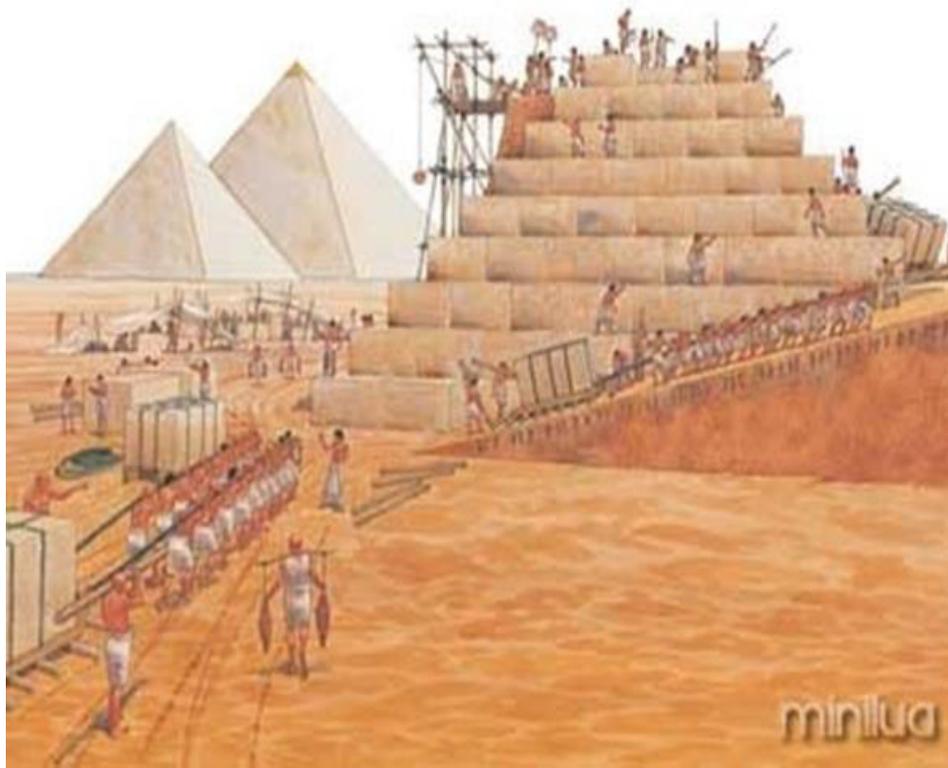
## 2.2 História da evolução dos elevadores

O nascimento dos elevadores partiu da necessidade do ser humano erguer cargas e pessoas. A invenção remonta ao Egito Antigo onde verificam-se os primeiros registros do uso de alguma ferramenta que era capaz de erguer as águas do rio Nilo, conforme cartilha da LifeElevadores<sup>4</sup>: “As primeiras utilizações de elevadores que se tem notícia datam de 1500 A.C, quando os Egípcios elevavam as águas do Rio Nilo, por meio da utilização de animais e pessoas para realizarem a tração que puxavam grandes vasilhames com água”.

Porém, antes disso, por volta de 2580 A.C, os Egípcios construíram as pirâmides, onde ainda hoje é um enigma a forma com que essas estruturas de quase 150 metros de altura foram construídas utilizando pesados blocos de pedra (Figura 1). Segundo SANTOS (2007), um historiador grego que se baseou em histórias de pastores antigos – que também escutaram de outras pessoas – foram utilizadas máquinas de elevação para a construção das pirâmides, já que foram descobertas marcas de ganchos, datadas do século VI A.C.

Os gregos antigos, por sua vez, também trouxeram grandes avanços para a concepção do que viria a ser posteriormente um elevador, conforme Santos (2007) e ilustrado na Figura 2.

Figura 1 – Construção de pirâmides no Egito, provável uso inicial do elevador.



Fonte: <http://www.rayselevadores.com.br/a-historia-do-elevador>

<sup>4</sup>Site: <http://www.lifeelevadores.com.br/images/cartilha-do-elevador.pdf>

Figura 2 - Máquinas de elevação propostas por Arquimedes.



Fonte: (SANTOS, 2007)

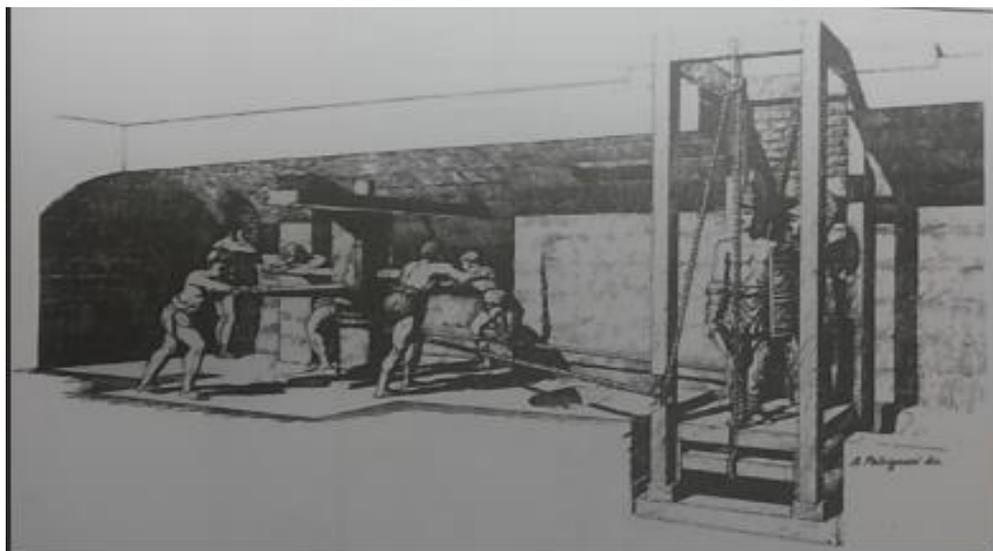
“O grego Arquimedes, por exemplo, desenvolveu um dispositivo de levantamento operado por cordas e talhas, nos quais as cordas de içamento eram enroladas ao redor de um tambor sinuoso[...].O filósofo grego Aristóteles conta em seus livros como o sistema de roldanas e manivelas poderiam ter sido utilizados para transportar materiais pesados, mas não informa o tamanho da carga e a que distância elas eram carregadas[...]. No século I d.C., Heron de Alexandria listou cinco tipos de máquinas que moveriam grandes cargas: roldanas, manivelas, cunhas e correias.”

Em 100 A.C o arquiteto e engenheiro romano chamado Vitruvius desenvolveu o primeiro gancho manual, considerado por muitos como o primeiro elevador de cargas. Outros legados deixados por esse engenheiro, que serviu para orientar a concepção dos elevadores modernos, foi a sua obra “*De Architectura*”, o qual consiste em um tratado greco-romano que chegou aos dias atuais com a concepção da manivela, descoberta por Arquimedes, como o primeiro sistema de elevação<sup>5</sup>.

O uso de sistemas de elevação foi largamente desenvolvido no império Romano, onde os imperadores faziam usos desses sistemas nas mais diversas situações, conforme ilustra a Figura 3. Por exemplo, o imperador romano Nero instalou um requintado elevador no palácio imperial cuja principal característica era a tração por cabos e um sistema especial de segurança para o caso de falhas ou atentado. Outro exemplo do uso de elevadores primitivos no império Romano foi a utilização de 12 elevadores que realizavam a elevação dos gladiadores para o nível da arena no anfiteatro do coliseu romano, onde esses sistemas de elevação utilizavam a força braçal.

<sup>5</sup>Site: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo>

Figura 3 – Sistema de elevação de escravos utilizado na Roma Antiga.



Fonte: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo>

Após a queda do império Romano, o conhecimento e desenvolvimento das técnicas de içamento acabaram-se por estagnar na Europa, contudo no Oriente essas técnicas atingiram o ápice de seu desenvolvimento. Como exemplo, tem-se que no ano 100 D.C., o transporte vertical de cargas permitiu a construção em Gomdan, no país do Iemen, do mais antigo castelo do mundo com 20 andares<sup>6</sup>.

O renascimento europeu retomou o desenvolvimento das técnicas de elevação de cargas e pessoas.

“No século XV, Leonardo da Vinci deixou inúmeros desenhos de máquinas, especialmente o de um içador e uma nova máquina de elevação. [...]. Em 1515, o papa Leão X instalou uma ‘cadeira voadora’ em sua residência para locomover-se, pois sofria de artrite. O artefato utilizado pelo pontífice foi o precursor do elevador.” (SANTOS, 2007).

Até então, as formas de tração utilizadas para o içamento de cargas e pessoas baseava-se na força humana, na força animal e nas forças da natureza. Com o advento da Revolução Industrial e a invenção de motores elétricos e à combustão, bem como das máquinas à vapor, ocorreu a gradativa substituição das fontes de tração para elevação de cargas.

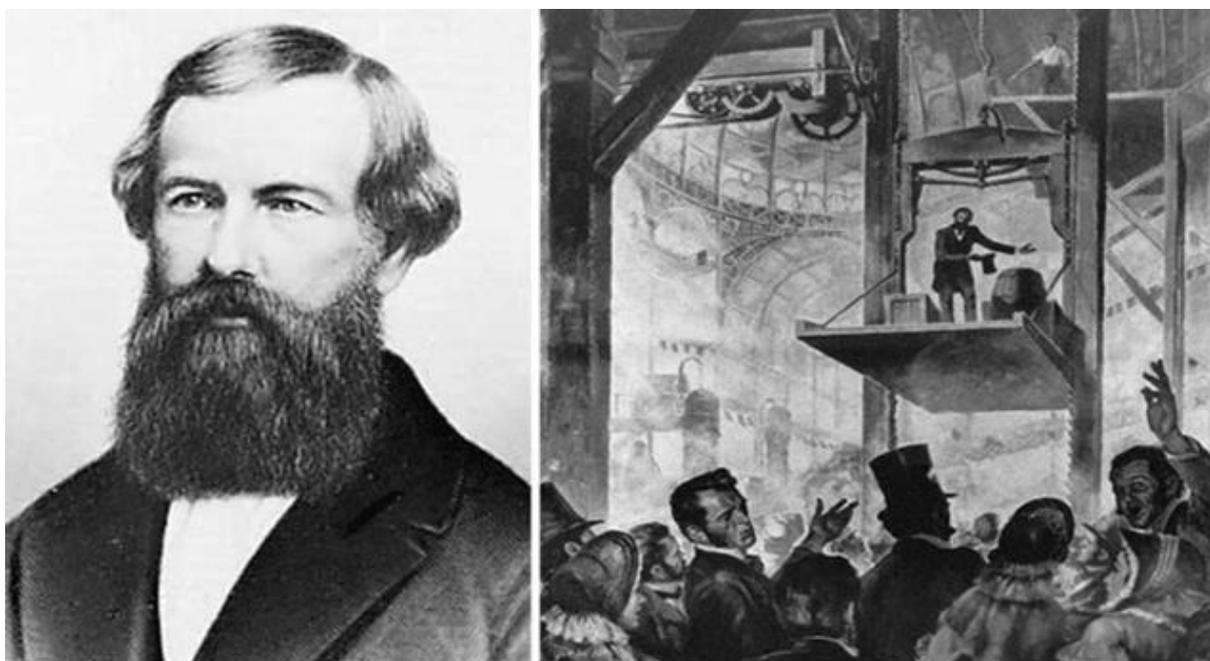
---

<sup>6</sup>Site: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo>

“Dessa forma, os elevadores modernos foram desenvolvidos a partir do século XIX. Estes elevadores eram rudimentares que evoluíram lentamente de sistema à vapor hidráulico. Os primeiros elevadores hidráulicos foram projetados usando a pressão da água como fonte de energia. Estes elevadores eram usados somente em fábricas, minas e armazéns. O transporte de pessoas nesta época era inseguro.”<sup>7</sup>

Como visto, o século XIX apresentou grandes avanços na concepção do elevador tal como conhecemos na era contemporânea. Contudo até então esses elevadores tinham um grande problema, no caso, a falta de segurança. Esse problema era expresso no fato de que, caso as cordas que tracionavam o elevador rompessem, a queda seria fatal para os usuários presentes na cabina. Com o objetivo de solucionar o problema Elisha Graves Ottis apresentou em 1853, durante uma exposição realizada na cidade de Nova York nos Estados Unidos, o primeiro elevador com um sistema de freio de segurança que evitava a queda livre do elevador, caso os cabos de tração se rompessem, conforme ilustra a Figura 4 com destaque à direita da imagem do inventor<sup>8</sup>.

Figura 4 - Apresentação de Elisha (imagem à esquerda) em Exposição Mundial em Nova York.



Fonte : <https://www.thinglink.com/scene/834204413408051200>

<sup>7</sup>Site: <http://www.lifeelevadores.com.br/images/cartilha-do-elevador.pdf>

<sup>8</sup>Site: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo/>

Graças à invenção de Ottis, a indústria dos elevadores ganhou um grande impulso e, nas décadas seguintes, foram acrescentados mais elementos que tornaram o uso dessas cabinas mais seguras e otimizadas. Também ao sistema de freio de segurança proposto foi possível construir edifícios cada vez mais altos, o que revela a relação direta entre a invenção dos elevadores e a verticalização das grandes metrópoles mundiais<sup>9</sup>.

Em 1880, Werner Von Siemens e Hulstie apresentam na feira de indústria da Alemanha o primeiro elevador movido a motor elétrico que conseguia percorrer uma torre de 20 andares em apenas 11 segundos. O motor utilizado era de corrente contínua devido à facilidade do controle de velocidade e utilizava-se um sistema de subida e descida através do princípio de enrolar e desenrolar uma corda em um tambor. Além disso, o peso da cabina era compensado por um conjunto de dois contrapesos. Em Massachussets, no ano de 1894, foi instalado o primeiro elevador elétrico por Frank J. Sprague que apresentava como diferencial o fato de a velocidade se manter constante independente da carga transportada.<sup>10</sup>

Até o início do século XX os elevadores eram predominantemente hidráulicos. Em 1899 é desenvolvido o primeiro elevador movido a motor de corrente alternada. Os avanços na tecnologia dos elevadores prosseguiram concomitantemente com o crescimento dos edifícios. Em 1937 foram instalados 67 elevadores no Empire State Building que tinha 102 metros de altura e, por muito tempo, foi o prédio mais alto do mundo, contendo as seguintes configurações:

“Estes elevadores empregavam basicamente o mesmo modelo usado até os dias de hoje, um motor elétrico, situado numa casa de máquinas em cima ou embaixo do fosso, movimentando uma cabina ligada a um contrapeso por meio de cabos de aço que eram tracionados por uma polia acoplada a um motor, com todo o seu sistema automatizado, bastando apertar um botão para dar sequência ao movimento.”<sup>11</sup>

### **2.3 Automação e controle dos elevadores**

Até a década de 50, os elevadores eram controlados manualmente por um funcionário chamado de ascensorista, o qual atuava no comando manual da cabina, verificando a presença de pessoas no interior da cabina e do lado de fora de forma a atender aos pedidos feitos pelos usuários. O ascensorista pode ser comparado atualmente a um motorista de ônibus encarregado

---

<sup>9</sup>Site: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-surgiu-o-elevador/>

<sup>10</sup>Site: <http://origemdascoisas.com/a-origem-do-elevador/>

<sup>11</sup>Site: <https://vetraelevadores.com.br/historia/elevador-no-mundo/>

de conduzir as pessoas ao destino desejado. É importante ressaltar que a profissão de ascensorista resiste até os dias atuais em alguns prédios residenciais do Brasil<sup>12</sup>.

Em 1950, a presença do ascensorista começou a ser substituída por portas automáticas e sinais sonoros. Essas portas possuíam um sistema de controle que verificava os pedidos das pessoas e as levava a seus destinos. Atualmente, além da automatização do sistema de pedidos internos e externos dos elevadores, há ainda outros pontos que também foram feitos pela máquina, os quais permitem uma experiência segura e confortável ao usuário, sendo eles<sup>13</sup>:

- a) Controle de velocidade de forma a evitar solavancos durante a subida e a descida dos elevadores, além de fazer com que o elevador pare no nível alinhado com o andar;
- b) Sistema antiesmagamento das portas, que servem para evitar que elas fechem quando algum objeto ou pessoa esteja entrando ou saindo da cabina;
- c) Sistemas inteligentes de verificação de pedidos internos e externos dos elevadores, os quais visam diminuir o tempo de espera do usuário.

## 2.4 Elevadores modernos

Os elevadores atuais são capazes de fornecer aos usuários uma experiência de conforto e segurança aliada à uma otimização do tempo em que as pessoas esperam os elevadores e o tempo que elas ficam no interior das cabinas. À medida que ocorreu a verticalização das cidades e a construção de prédios mais altos, os elevadores ficaram mais rápidos. Atualmente, o elevador mais rápido do mundo fica no edifício Shanghai Tower na China (Figura 5) e atinge a velocidade máxima de 20,5 metros por segundo o que corresponde a 70 km/h<sup>14</sup>.

Os avanços na eletrônica possibilitaram a substituição aos poucos dos painéis de relés por sistemas microprocessados que, dentre outras vantagens, otimizaram o consumo de energia das máquinas, diminuíram o espaço necessário para acomodação dos sistemas de comandos dos elevadores e possibilitaram a aplicação de técnicas mais eficientes de controle e gerência dos elevadores. Atualmente, os elevadores possibilitam a interação com o usuário de forma que, ao utilizar o equipamento, a pessoa obtém informações como o tempo de espera, qual elevador ela deverá esperar e o tempo de chegada ao destino, além da apresentação atualizada do andar em que o elevador se encontra.

---

<sup>12</sup>Site: [https://www.correiobrasiliense.com.br/app/noticia/cidades/2015/09/21/interna\\_cidadesdf,499486/a-profissao-de-ascensoristas-e-antiga-e-resiste-ao-tempo-em-alguns-pre.shtml](https://www.correiobrasiliense.com.br/app/noticia/cidades/2015/09/21/interna_cidadesdf,499486/a-profissao-de-ascensoristas-e-antiga-e-resiste-ao-tempo-em-alguns-pre.shtml)

<sup>13</sup>Site: <http://elevare.pt/PDF/ele7/dossier.pdf>

<sup>14</sup>Site: <https://veja.abril.com.br/mundo/edificio-na-china-tem-o-elevador-mais-rapido-do-mundo>

Figura 5 - Shanghai Tower, edifício com o elevador mais rápido do mundo.



Fonte: <https://www.archdaily.com/798815/genslers-shanghai-tower-named-ctbuhs-best-tall-building-worldwide-for-2016>

Outro ponto a se destacar nos elevadores modernos é seu sistema de monitoramento que possibilita à empresa que o construiu verificar como está o desgaste e a utilização das principais peças que o compõe, auxiliando na detecção de problemas e facilitando a manutenção do equipamento, além de facilitar a detecção de possíveis problemas antes que ocorra (manutenção preventiva).

## 2.5 Tipos de acionamento de elevadores

Os elevadores podem ser classificados de diversas formas, como por exemplo de acordo com sua forma de acionamento de seu deslocamento ou com o modelo de projeto adotado. No que se refere à forma de funcionamento dos elevadores, eles podem ser hidráulicos, a vácuo ou elétrico. No que diz respeito ao modelo de projeto eles podem ser classificados como industriais, residenciais ou comerciais.

### 2.5.1 Elevadores hidráulicos

Os elevadores hidráulicos utilizam-se do princípio físico de Pascal, que consiste na propagação igualitária da pressão exercida em um ponto do líquido para as outras partes do mesmo, com o objetivo de realizar a elevação de cargas e pessoas. É atualmente muito utilizado em oficinas mecânicas e postos de combustível para proporcionar a elevação de carros. Contudo essa tecnologia já foi largamente utilizada dentro de edifícios para realizar o transporte vertical de pessoas e cargas.

A grande utilização desse tipo de elevador no século passado deveu-se principalmente ao fato de esse tipo de elevador não necessitar de casa de máquinas que, do ponto de vista arquitetônico e estético, são pouco atrativas. Além disso, há a imunidade desses elevadores quando há falta de energia, uma vez que eles podiam fazer usos simplesmente da força da gravidade para a realização do resgate dos usuários presentes na cabina durante a ocorrência de sua parada inadequada. Ainda há de se pontuar que inicialmente os elevadores hidráulicos proporcionavam viagens bem mais confortáveis que os elevadores elétricos<sup>15</sup>.

O funcionamento desses elevadores se dá através da movimentação de um pistão que viaja dentro de um cilindro hidráulico. Uma bomba acionada por um motor elétrico pressiona o óleo hidráulico e move o pistão. O pistão ergue o carro do elevador suavemente. Válvulas elétricas controlam a liberação do óleo para uma descida suave (SANTOS, 2007).

A evolução tecnológica dos elevadores elétricos, aliados às limitações das cabinas hidráulicas, fez com que estes últimos ficassem cada vez mais obsoletos. Dentre as desvantagens, destaca-se o consumo de energia maior que um equivalente elétrico, além de serem mais lentos e apresentarem vazamento de óleo com facilidade, o que encarece sua manutenção e torna esse tipo de elevador um risco potencial ao meio ambiente. Dessa forma, os elevadores hidráulicos tornaram-se, pouco a pouco, uma solução não muito utilizada em projetos arquitetônicos.

### 2.5.2 Elevadores elétricos

O elevador elétrico consiste de um tipo de cabina que se utiliza de motores elétricos para realizar a tração de subida e descida. Projetado por Siemens e Hustie em 1880, o elevador movido a motor elétrico representou um grande avanço na indústria desses equipamentos. Atualmente, a grande maioria dos elevadores que operam no mundo utilizam desse tipo de força de movimentação.

---

<sup>15</sup>Site: <http://www.upcenter.com.br/noticias/tipos-de-elevadores-residenciais/>

Inicialmente, os elevadores elétricos apresentavam muitos problemas, o que dificultou sua popularização e fez com que por muito tempo este tipo de sistema de transporte perdesse a disputa para os hidráulicos. Dentre os principais problemas apresentados por este tipo tem-se o fato de ele operar aos solavancos, o que tornava a viagem na cabina um tanto quanto desconfortável. Além disso, era comum que a cabina parasse desalinhada do andar, o que representava um risco à segurança dos usuários e, em caso de pane elétrica, o resgate dos usuários que se encontram dentro do elevador era bem mais complicado em relação à ocorrência da mesma situação com os do tipo hidráulico.

Com o passar dos anos, os elevadores elétricos passaram por um processo de evolução que possibilitou com que suas desvantagens fossem sanadas em relação aos hidráulicos. A invenção de elementos como inversores de frequência e a substituição dos motores de corrente contínua por motores de indução deram uma maior possibilidade de controle às máquinas e retirou muitos dos problemas apresentados, como o desnível da parada em relação ao andar e os solavancos dados pelo elevador durante a sua operação. Além disso, com o tempo os elevadores elétricos deixaram de exigir a presença de casa de máquinas o que tornou sua instalação prática e adaptável a qualquer tipo de projeto<sup>16</sup>.

### **2.5.3 Elevadores a vácuo**

Os elevadores à vácuo representam uma invenção mais recente, mais especificamente da década de 90. Seu funcionamento é bastante simples consistindo de um tubo hermeticamente fechado em que é colocada uma cápsula com plataforma vedada e, ao diminuir a pressão na parte superior, a cápsula automaticamente sobe. A descida da cabina consiste apenas na retirada do ar da parte inferior do tubo. Dentre as vantagens desse sistema, tem-se a facilidade de instalação e o baixo consumo de energia se comparados com um equivalente elétrico ou hidráulico. Quanto às limitações, tem-se que os elevadores à vácuo apresentam tamanho e capacidade extremamente reduzidos, onde a maioria dos modelos tem capacidade para apenas uma pessoa. Outro problema é quantidade de ruídos gerados pelo compressor de ar o que torna o funcionamento deste tipo de elevador extremamente barulhento<sup>17</sup>.

---

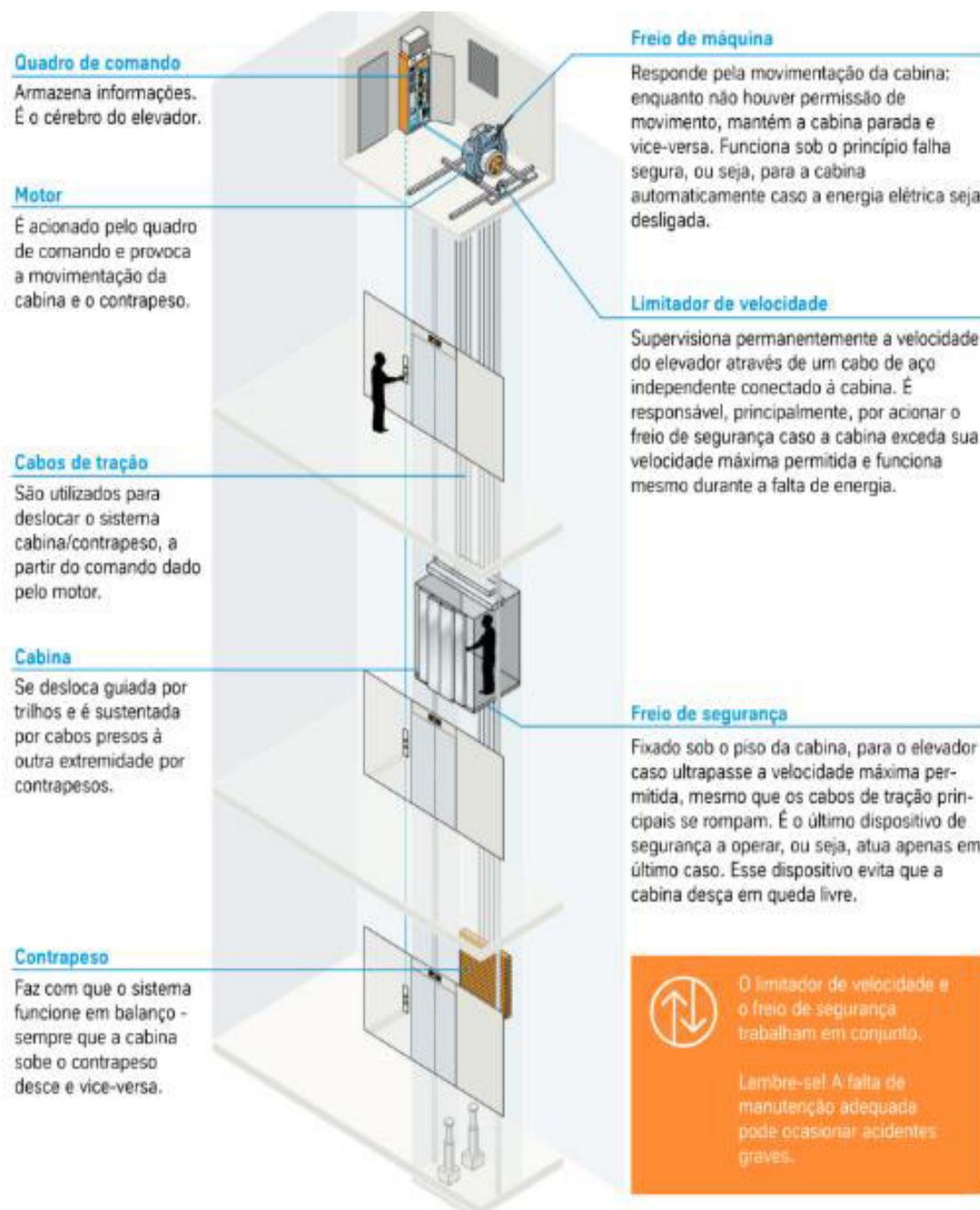
<sup>16</sup>Site: <http://www.upcenter.com.br/noticias/tipos-de-elevadores-residenciais>

<sup>17</sup>Site: <http://www.escal.ind.br/elevador-eletrico>

## 2.6 Principais componentes de um elevador

O elevador tradicional é composto por quatro componentes principais, conforme ilustra a Figura 6:

Figura 6 - Principais partes de um elevador.



Fonte: <http://www.thyssenkruppelevadores.com.br/blog/voce-sabe-como-funciona-o-elevador>

Cabina – É o elemento que carrega as pessoas ou objetos de cima para baixo ou vice-versa. É comum as pessoas se referirem a essa parte como o elevador como um todo o que é

um engano. Entretanto, quando o termo cabina é usado para designar a caixa de carga, o emprego do termo como sinônimo pode ser utilizado, na medida em que não se deseja associar aos demais elementos;

Cabos de tração – Utilizados para fixar a cabina ao contrapeso, permitindo deslocar o sistema cabina-contrapeso de acordo com o comando dado a partir do motor;

Máquina – Em elevadores elétricos, trata-se do motor que é responsável pela realização do movimento de subida e descida de todo o conjunto;

Contrapeso – Faz com que o sistema funcione em balanço de massa, na medida em que sempre que a cabina sobe o contrapeso desce e vice-versa. O contrapeso auxilia na subida e descida da cabina, sendo um grande aliado do motor uma vez que ele possibilita a diminuição dos esforços realizados por este, o que influi diretamente no consumo de energia da máquina, além de ser um grande aliado na retirada de vibrações mecânicas da cabina;

Freio de segurança – Atua quando o elevador ultrapassa a velocidade preestabelecida para seu funcionamento. Só opera em último caso, de forma a evitar a queda livre da cabina;

Freio de máquina – Responde pela movimentação da cabina e, enquanto não houver permissão para funcionamento, mantém a cabina parada. Também responsável por parar a cabina imediatamente e em casos de falhas;

Limitador de Velocidade – Dispositivo de segurança que monitora a velocidade do eixo do motor realizando, também, seu controle. Caso a velocidade do elevador ultrapasse a velocidade nominal o limitador de velocidade aciona o freio de segurança<sup>18</sup>.

Além dos componentes supracitados, alguns elevadores elétricos fazem uso de uma estrutura arquitetônica chamada de casa de máquinas que consiste no local onde ficam os motores e a central de controle do elevador (inversores de frequência, sistema de acionamento e outros). As casas de máquinas têm o inconveniente de ocuparem bastante espaço dentro do edifício. Desta forma, tem crescido a instalação de elevadores que não fazem uso de casa de máquinas, deixando que os edifícios tenham mais espaço útil em seu interior.

## **2.7 Sistemas de elevadores Multi e sistemas inteligentes de elevadores empregados em prédios**

Após a consolidação dos elevadores como meio de transporte vertical dentro de edifícios e prédios, ocorreu uma corrida para tornar esses equipamentos cada vez mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia. Como já citado, as primeiras inovações nesse sentido se deram

---

<sup>18</sup> Site: <http://www.thyssenkruppelevadores.com.br/blog/voce-sabe-como-funciona-o-elevador>

através da substituição dos motores de corrente contínua por motores de corrente alternada aliados à utilização de inversores de frequência que otimizaram o funcionamento do elevador e reduziram, desta forma, drasticamente o consumo de energia desses equipamentos.

Outra inovação recente que revoluciona a forma como os elevadores atuam nos dias de hoje são o sistema de elevadores Multi, ilustrado na Figura 7. A grande inovação desse sistema é o funcionamento sem cabos, permitindo que se desloquem tanto na horizontal quanto na vertical, o que proporciona o aumento de 50% na capacidade de transporte e redução da demanda máxima de energia em até 60% em relação aos elevadores convencionais. Outras vantagens proporcionadas por esse sistema é que ele necessita de uma área menor de instalação, o que aumenta a área útil do edifício, não sendo limitado pela altura de atuação do elevador<sup>19</sup>.

Outro ponto que otimizou o funcionamento dos elevadores é a utilização de sistemas inteligentes. Dentre esses sistemas destaca-se o de antecipação de chamada que consiste na aquisição antecipada do destino do usuário, no caso, na parte externa do elevador. A aquisição externa possibilita ao sistema indicar o elevador mais apropriado para atender o pedido do

Figura 7 – Esquema de funcionamento de um elevador Multi.



Fonte: <http://www.thyssenkruppelevadores.com.br/blog/multi-primeiro-sistema-de-elevadores-sem-cabos-do-mundo-e-inaugurado-hoje/>

<sup>19</sup> Site: <http://www.thyssenkruppelevadores.com.br/blog/multi-primeiro-sistema-de-elevadores-sem-cabos-do-mundo-e-inaugurado-hoje/>

usuário, o que além de tornar o funcionamento do elevador mais otimizado reduz consideravelmente o consumo de energia.

## 2.8 Simuladores

Segundo Shannon (1998), “simulação tem como definição o desenvolvimento de um modelo de um sistema real e a realização de experimentos para entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação”. Por permitir a realização de experimentos em modelos de sistemas reais, a simulação tem sido amplamente utilizada em ambientes de ensino de Engenharia entre outras áreas como a medicina, onde os modelos representam sistemas e processos físicos.

Ainda conforme Shannon (1998), simuladores apresentam diversas vantagens em relação a modelos matemáticos analíticos:

“O conceito básico de simulação é fácil para compreender e portanto, muito fácil de justificar para gerentes e clientes que algum dos modelos analíticos. Além disso, o modelo simulado pode ser mais verossímil ou porque seu comportamento foi comparado ao sistema real ou porque requer menos hipótese simplificadoras e, portanto, captura mais das verdadeiras características do sistema sobre estudo.”

Além das vantagens apresentadas acima, tem-se que as simulações possibilitam a verificação de diversos cenários em que pode se encontrar o modelo físico que, experimentalmente ou realizando-se cálculos analíticos, seria inviável, seja devido à complexidade do sistema ou devido ao fato de o próprio sistema não possibilitar a verificação de todos os cenários possíveis.

Simuladores podem ser confundidos com emuladores, contudo tratam-se de conceitos distintos, os quais residem no fato de os emuladores, conforme Mura (2017) ser um *software* capaz de “transcrever instruções de um determinado processador ao processador no qual está sendo executado. Também é capaz de reproduzir funções de circuitos integrados”. Ainda tratando do conceito de emuladores, Laureano (2006) explicita que “um emulador é um *software* criado essencialmente para transcrever instruções de um processador alvo para o processador o qual ele está rodando”.

### 2.8.1 Simuladores Eletrônicos em Outras Áreas

Simuladores podem ser empregados em uma ampla gama de áreas no conhecimento, o que os tornam uma ferramenta flexível e versátil que pode atender aos critérios de diversas áreas. Simuladores eletrônicos podem, por exemplo, ser empregados na área da saúde para o ensino de enfermagem, conforme Overstreet (2008 apud TEIXEIRA, 2009):

“Dentre as tecnologias existentes, a simulação clínica com o emprego dos simuladores é destacada na literatura como uma estratégia que possibilita o desenvolvimento do pensamento crítico, bem como o aumento da habilidade para a avaliação e decisão clínica que será requerida na prática assistencial.”.

Além da área médica, verifica-se a utilização de simuladores também no ambiente militar, de forma a representar os campos de batalha e criar diversas situações similares aos combates e ambientes reais de uma guerra, conforme Schitcoski (2009 apud Baladez, 2009), tem-se:

“A princípio apresentavam variações do xadrez, e sob sua inspiração o jogo foi se modificando para que se adequasse às necessidades de uma época, adicionando elementos de paisagem, transformando o tabuleiro em campo de batalha e atualizando as peças conforme as novas formações e unidade dos exércitos. Se o detalhamento em campo evoluiu, é óbvio que as condições de jogo deveriam seguir novos padrões, por tabelas e estatísticas para ampliar as possibilidades.”

Ainda na área militar, durante a primeira guerra mundial, houve a intensificação na utilização de simuladores de voo mecânicos, cujo objetivo era permitir que pilotos de aeronaves de guerra tivessem experiência similar àquelas com aviões reais, de forma a evitar acidentes e, conseqüentemente, a perda do piloto e do avião. Com o advento da segunda guerra mundial e a invenção dos primeiros computadores eletrônicos, os simuladores passaram a ser implementados computacionalmente, onde, atualmente já apresentam cenários de guerra bastante similares aos reais.

Os simuladores de direção, atualmente obrigatórios no processo de obtenção da CNH (Carteira Nacional de Habilitação) conforme Resolução Normativa 493 de 6 de junho de 2014, é um outro exemplo da utilização de simuladores em uma atividade rotineira. Estudos foram realizados sobre esses tipos de simuladores afirmam, conforme Wang *et al.* (2010, apud Vieira *et al.*, 2015) tem-se:

“O resultado mostrou que o grupo treinado em simulador apresentou um desempenho significativamente mais alto ao lidar com situações perigosas, antecipando estes cenários muito antes do que o grupo não treinado.”

## 2.8.2 Simuladores em Engenharia

É muito comum a utilização de simuladores na área de Engenharia, sendo estes aplicados na verificação e experimentação de sistemas físicos reais. Na área de Engenharia Elétrica existem alguns simuladores que já estão consagrados na análise de circuitos elétricos, tais como Multisim, Proteus, Simulink, LabVIEW entre outros.

- **Multisim**

O Multisim (*Multiple Simulator Networking Program*) é um ambiente de simulação SPICE (*Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis*), desenvolvido na década de 70 pela National Instruments, sendo um *software* para projetos de circuitos para o ensino e pesquisa de eletrônica digital, analógica e de potência<sup>20</sup>. O Multisim possui integrado ao sistema de bibliotecas que contém os mais diversos componentes elétricos (resistores, capacitores, indutores e outros) que possibilitam, por sua vez, a montagem dos mais variados tipos de circuitos elétricos<sup>21</sup>.

O Multisim, diferentemente de outros simuladores de circuitos eletrônicos, utiliza-se de uma interface gráfica para a edição dos esquemas e a traduz para uma *netlist*. A utilização da interface gráfica facilita o processo de ensino e aprendizagem dos estudantes de Engenharia, uma vez que a representação dos componentes elétricos e eletrônicos utilizados na simulação são muito semelhantes aos utilizados em um laboratório, ou seja, o Multisim pode ser compreendido como um laboratório virtual<sup>22</sup>.

- **Simulink**

O Simulink é uma ferramenta de simulação integrada no *software* MATLAB (MATrix LABoratory), que possibilita a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos<sup>23</sup>, aplicando-se a sistemas lineares e não lineares, discretos e contínuos no tempo. Ao contrário do

---

<sup>20</sup>Site: <http://www.ni.com/pt-br/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>

<sup>21</sup>Site: [http://pld.lesc.ufc.br/laboratorio/files/Pratica\\_05\\_-\\_Simulacao\\_Usando\\_Multisim.pdf](http://pld.lesc.ufc.br/laboratorio/files/Pratica_05_-_Simulacao_Usando_Multisim.pdf)

<sup>22</sup>Site: <https://web.fe.up.pt/~candidoduarte/downloads/elec1-simulacao-v.1.0.pdf>

<sup>23</sup>Site: <http://www.ipb.pt/~jpcoelho/CCD/documento.pdf>

*software* ao qual integra, o MATLAB, o Simulink utiliza-se de uma interface gráfica com representação das funções em diagramas de blocos que equivalem às funções de transferência dos sistemas<sup>24</sup>.

O Simulink pode ser aplicado a inúmeras áreas de engenharia, abrangendo desde modelagem e simulações de circuitos elétricos até a modelagem e simulação de sistemas aeroespaciais<sup>25</sup>. Além da ampla quantidade de áreas que este *software* pode vir a ser utilizado, tem-se ainda uma outra vantagem que é a flexibilidade, haja vista o Simulink é possibilita a geração de códigos em linguagem de programação C e, por estar integrando ao MATLAB, possibilita a incorporação de códigos deste *software* junto às simulações<sup>26</sup>.

- **PSPICE**

O PSPICE é um programa computacional, desenvolvido como uma versão do SPICE, que possibilita a simulação e análise de circuitos elétricos. O PSPICE possibilita a análise de circuitos no regime de corrente contínua e corrente alternada, além de transientes de sinais. Também se utiliza de interface gráfica para realizar a implementação dos circuitos elétricos. Segundo Sadiku (2013):

“O PSpice pode analisar até 130 elementos e 100 nós. Ele é capaz de executar os três principais tipos de análise de circuitos: (1) análise CC, (2) análise transitória e (3) análise CA. Além disso, ele também pode executar a análise de funções de transferência, análise de Fourier e análise de pontos de operação. O circuito pode conter resistores, indutores, capacitores, fontes de tensão e de corrente independentes e dependentes, amplificadores operacionais (op amps), transformadores, linhas de transmissão e dispositivos semicondutores.”

- **ANAREDE**

O ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é um *software* utilizado no Brasil para projetos na fase de simulação de Sistemas Elétricos de Potência em regime permanente. Com ele é possível analisar e simular o fluxo de potência entre barras de energias, produzir equivalentes de redes de potência, realizar análises de tensão e fluxo de potência e análise de segurança da rede elétrica. Também apresenta uma interface gráfica que auxilia na montagem

---

<sup>24</sup>Site: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4306246/mod\\_resource/content/1/Curso%20Simulink.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4306246/mod_resource/content/1/Curso%20Simulink.pdf)

<sup>25</sup>Site: <http://teachers.teicm.gr/anastasiou/wp-content/uploads/2012/01/091114-Simulink-Basics1.pdf>

<sup>26</sup>Site: <https://la.mathworks.com/help/simulink/gs/product-description.html>

das simulações, além de ter um amplo conjunto de modelos aplicados à sistemas de potência, como geradores, banco capacitores entre outros<sup>27</sup>.

Importante ressaltar que o ANAREDE pode ser utilizado tanto para Análise de sistemas de Potência para o ensino e aprendizagem, como a utilização para análise das entidades dos setores de geração, transmissão e distribuição de energia, tais como as concessionárias de energia elétrica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e grandes consumidores industriais.

## 2.9 Sistemas Embarcados de Baixo Custo

Pode-se definir sistemas embarcados como um sistema microprocessado no qual um computador é encapsulado e dedicado a controlar um sistema ou processo. Os computadores utilizados em sistemas embarcados diferem-se dos computadores de uso geral, uma vez que são aplicados e dedicados a uma tarefa específica e já predefinida<sup>28</sup>. Os sistemas embarcados podem ser aplicados em diversas áreas como, por exemplo, em automóveis, aeronaves, *smarthphones*, impressoras e equipamentos médicos revelando a sua importância para as atividades desenvolvidas no dia-a-dia do ser humano.

O primeiro sistema embarcado reconhecido foi o Apollo Guidance Computer, desenvolvido no MIT por Charles Drapper<sup>29</sup>. Trata-se de um computador que operava a 1,024 MHz e tinha a responsabilidade de guiar as naves do projeto Apollo, as quais levaram o homem à Lua nas décadas de 60 e 70<sup>30</sup>.

É importante que se faça a diferenciação entre sistemas microprocessados e sistemas microcontrolados. O microcontrolador é um computador integrado dentro de um chip, contendo já todos os itens necessários para seu funcionamento, como memória, periféricos de entrada e saída, conversores de sinais analógico-digitais e o processador. O microcontrolador pode ser programado para executar diversas funções, contudo realiza apenas aquilo que foi programado para fazer, sendo necessária uma reprogramação para que ele execute outra tarefa. Já os microprocessadores é um circuito integrado que realiza cálculos e operações lógicas. O microprocessador não trabalha sozinho, ou seja, ele executa funções oriundas de componentes externos<sup>31</sup>. A próxima seção apresenta as principais características da placa utilizada no projeto do simulador da maquete de elevadores, no caso o sistema embarcado Raspberry Pi 3 modelo

---

<sup>27</sup>Site: <http://www.cepel.br/produtos/anarede-analise-de-redes-eletricas.html>

<sup>28</sup>Site: <http://www.embarc.com.br/p1600.aspx>

<sup>29</sup>Site: <https://www.gruponetcampos.com.br/2011/05/19/voce-sabe-o-que-sao-sistemas-embarcados/>

<sup>30</sup>Site: <https://www.embarcados.com.br/sistema-embarcado/>

<sup>31</sup>Site: <http://blog.novaeletronica.com.br/qual-diferenca-entre-microprocessador-e-microcontrolador/>

B, doravante referenciada por RPi3B. Também foi usado nos testes da planta física, no que diz respeito aos testes de sua funcionalidade e robustez.

- **Raspberry Pi 3 B**

Segundo Simon Monk (2013):

“O Raspberry Pi é um computador que executa o sistema operacional Linux. Ele tem portas USB nas quais você pode conectar um teclado e um mouse e uma saída de vídeo HDMI (High-Definition Multimedia Interface) na qual você pode conectar uma TV ou um monitor. [...] Ele é pequeno (do tamanho de um cartão de crédito) e comercializado a um preço extremamente acessível (iniciando a partir dos U\$\$ 25). Parte da razão desse preço é que alguns componentes não estão incluídos com a placa, ou são extra opcionais.[...]”

O propósito inicial do RPi3B é a utilização deste como instrumento de ensino aprendizagem de programação e conceitos de computação, contudo segundo Richardson e Wallace (2013):

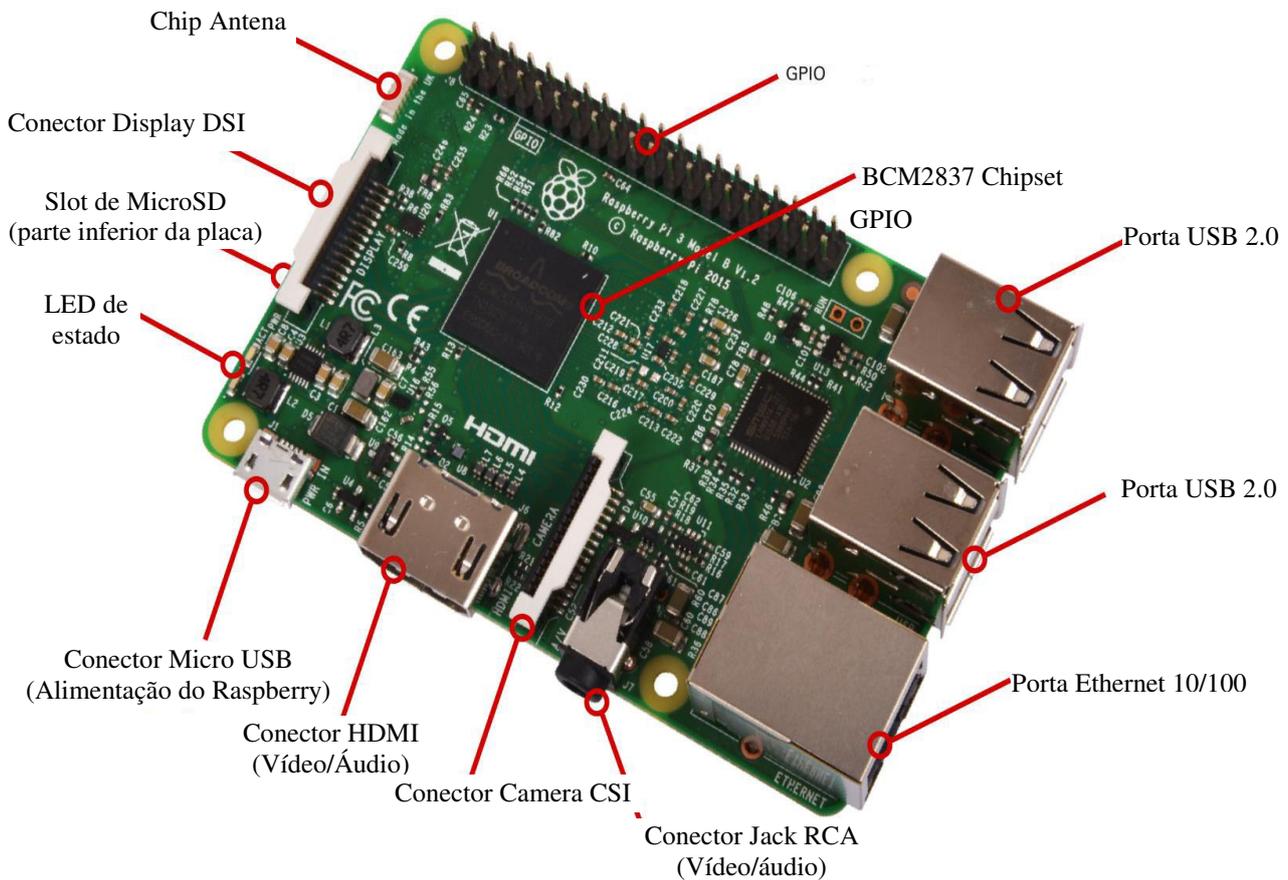
“O Raspberry Pi possibilita ao usuário a realização de diversas atividades que vão desde a utilização como um computador de uso geral até como uma plataforma de ensino de programação ou plataforma de projeto. Uma das melhores coisas a respeito do Raspberry Pi é que não há uma única maneira de usá-lo. Seja para você assistir aos vídeos ou navegar na web, ou para programar (hackear), aprender a trabalhar com a placa, o Raspberry Pi é uma plataforma flexível para diversão, uso e experimentação.”

A placa RPi3B foi lançada no aniversário de quatro anos da Raspberry Foundation<sup>32</sup> e trouxe algumas melhorias e novidades em relação à sua antecessora. Os novos recursos incluíam a atualização do processador para um Quad Core de 1,2 GHz, baseado em uma versão atualizada do Cortex A7, o Cortex A53. A atualização do processador permitiu um considerável incremento em desempenho, eficiência por clock e suporte a instruções de 64 bits, utilizando o conjunto de instruções ARMv8 3. A RAM permaneceu com 1 GB, bem como não houveram alterações na quantidade de portas USB e nos demais recursos presentes nas placas anteriores

---

<sup>32</sup>Site: <https://www.raspberrypi.org/>

Figura 8 – Principais partes do Raspberry Pi 3 modelo B.



Fonte: [https://www.cnx-software.com/wp-content/uploads/2016/02/Raspberry\\_Pi\\_3\\_Large.jpg](https://www.cnx-software.com/wp-content/uploads/2016/02/Raspberry_Pi_3_Large.jpg) (traduzido)

(HDMI, saídas de áudio e outros)<sup>33</sup>. A Figura 8 apresenta a foto da placa RPi3B com a designação dos principais recursos.

Contudo, as características físicas do RPi3B em relação à sua versão antecessora não mudaram muito. Foram mantidas as dimensões físicas, os conectores nas mesmas posições e a quantidade de GPIO (*General Purpose Input/Output*) que permaneceu em 40 pinos<sup>34</sup>.

Como citado, o RPi3B é composto de 40 pinos de entrada e saída, onde esses pinos podem apresentar as seguintes funções<sup>35</sup>:

- Pino de entrada digital, configuração que permite que ele realize uma leitura de um sinal digital, onde o nível alto é de 3,3 V e o nível baixo é de 0V;
- Pino de saída digital, configuração que permite que o pino aplique um sinal digital, onde 3,3 V é considerado o nível alto e 0 V é o nível lógico baixo;

<sup>33</sup>Site: <https://gizmodo.uol.com.br/raspberry-pi-3-oficial/>

<sup>34</sup>Site: <https://www.embarcados.com.br/hardware-da-raspberry-pi-3/>

<sup>35</sup>Site: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>

- c) Os pinos podem gerar sinais PWM (*Pulse Width Modulation*), podendo ser via *hardware* (através de um pino em específico, GPIO18), ou via *software* que permite a habilitação em quaisquer pinos GPIO;
- d) Existem dois pinos, GPIO02 para *data* e GPIO03 para *clock*, que possibilitam que possibilitam a implementação do barramento serial I2C (*Inter Integrated Circuit*);
- e) Possibilidade de comunicação Serial em 3,3V (*Rx-Tx*), através dos pinos GPIO14 (*Tx*) e GPIO15 (*Rx*);
- f) Possibilidade de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*).
- g) Pinos de alimentação nas tensões de 3,3 V e 5 V; e
- h) Pinos de referências ou GND (*ground*).

Através das possibilidades de utilização descritas acima, verifica-se que os pinos do RPi3B podem ser utilizados para uma grande quantidade de aplicações, variando desde acionamento de cargas como LEDs até o controle de drivers através dos protocolos de comunicação presentes na placa.

A grande gama de aplicações do RPi3B vem acompanhada de uma série de cuidados que o operador deve ter quando estiver utilizando os pinos do computador, uma vez que estes não vêm com um sistema de proteção, como, por exemplo, na placa Arduino. Outro ponto importante é que o RPi3B não usa o sistema de lógica digital padrão chamado de TTL (*Transistor-Transistor Logic*), onde o nível lógico é de 5 V e não 3,3 V do RPi3B. Essa diferença de tensão de nível alto pode causar dano aos pinos e ao próprio sistema RPi3B quando interfaceando com circuitos em 5 V<sup>36</sup>. Outra característica importante de se levar em consideração na elaboração de projetos com o RPi3B é a capacidade de corrente que cada pino pode fornecer e suportar, onde tal corrente máxima é de 16 mA por pino<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup>Site: <http://blog.fazedores.com/raspberry-pi-b-introducao-porta-gpio/>

<sup>37</sup>Site: <https://paginas.fe.up.pt/~hsm/docencia/edm/edm-201516/gpio/>

### 3 ALTERAÇÕES NA PLACA ELETRÔNICA E NA MAQUETE DE ELEVADORES

O presente capítulo trata das alterações que foram realizadas na planta física da maquete contendo seis andares e três elevadores que operam de forma independente. Além disso, é apresentado o novo projeto da placa eletrônica de interface entre os elementos sensores e atuadores presentes na maquete e o sistema de controle, apresentando seu *layout* e componentes.

#### 3.1 Alterações na placa eletrônica de interface

A necessidade da confecção de uma nova placa eletrônica de interface surgiu do fato de a placa antiga apresentar problemas nos circuitos e também a necessidade de incorporação de novos outros circuitos não previstos. Como exemplo, pode-se citar os circuitos de detecção de níveis nos sensores ópticos, utilizados em conjunto com uma fita pintada em branco e preto posicionada na maquete para a definição do andar do respectivo elevador. O uso desse esquema de detecção de andar deveu-se ao planejamento inicial de usar sensores ultrassônicos no cálculo indireto da altura do elevador e, portanto, do andar em que se encontra (SOUSA, 2015).

Nesta seção serão descritos o projeto e o *layout* produzido em função das necessidades dessas alterações, descrevendo em detalhe os novos circuitos contidos na nova placa.

##### 3.1.1 Planejamento da placa eletrônica

A primeira etapa da confecção da nova placa consistiu em fazer a descrição das funcionalidades da maquete, bem como das escolhas dos componentes, conectores e outros elementos que comporiam os circuitos presentes nela. As funcionalidades desejadas para a placa podem ser divididas em grupos, tal como segue mostrado na Tabela 1.

A antiga placa orientou fortemente a escolha dos componentes que passou a compor a nova, haja vista as funcionalidades de ambas as placas (antiga e nova) serem as mesmas, apesar de algumas modificações importantes comentadas mais adiante. A Tabela 2 apresenta os componentes escolhidos de acordo com a função que apresentam na placa.

A escolha dos reguladores de tensão da família 78xx (7805 e 7812) baseou-se na capacidade de fornecimento de corrente desses componentes, que é de no máximo 1,5 A<sup>38</sup>. Essa capacidade limite de corrente satisfaz as necessidades para fornecer alimentação tanto aos

---

<sup>38</sup> Site: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82833/FAIRCHILD/LM7805.html>

Tabela 1 – Funcionalidades esperadas da nova placa eletrônica.

<b>Funcionalidade 1</b>	Alimentação de CIs TTL (5V) e motores (12V)
<b>Funcionalidade 2</b>	Protocolo de Comunicação I2C
<b>Funcionalidade 3</b>	Acionamento e Inversão de motores DC
<b>Funcionalidade 4</b>	Conectores de entrada de sinais
<b>Funcionalidade 5</b>	Conectores de saída de sinais
<b>Funcionalidade 6</b>	Proteção da placa eletrônica contra surtos de corrente

Fonte: Autor.

circuitos integrados quanto aos motores DC que deslocam os elevadores na maquete. Por precaução, junto aos reguladores, inseriu-se dissipadores de energia feitos de alumínio de forma a transferir a potência dissipada pelo componente por efeito Joule (calor) para o ambiente.

A placa eletrônica faz uso do protocolo de comunicação I2C (*Inter- Integrated Circuit*) tanto para realizar a comunicação com o conjunto LCD-Teclado (localizados na maquete), quanto para comunicação com os circuitos integrados PCF8574A que faz a expansão de sinais

Tabela 2 – Lista dos componentes escolhidos de acordo com as funcionalidades executadas na placa.

<b>Funcionalidade</b>	<b>Componentes Escolhidos</b>
Alimentação Cis (5V) e motores (12V)	Reguladores de tensão da família 78XX (7805 e 7812).
Protocolo de comunicação I2C	PCF8754A (Expansor de I/O)
Acionamento e Inversão dos motores DC	Ponte H (L293D)
Conectores de entrada de sinais	Conectores KK 2,54 mm, Barrel Jack para alimentação.
Conectores de saída de sinais	Conectores KK 2,54 mm
Proteção da placa Eletrônica	Fusível

Fonte: Autor

de entrada ou saída do sistema de controle. Cada PCF é capaz de acionar ou ler oito dispositivos diferentes, usando o protocolo I2C como meio de comunicação. Na nova placa eletrônica utilizou-se oito desses circuitos integrados, o que disponibilizou 64 pinos de entrada e saída acionados via I2C.

Para realizar o acionamento dos eixos dos motores, bem como a inversão de sentido dos mesmos (horário e anti-horário), utilizou-se o CI (Circuito Integrado) L293D, conhecido como ponte H. O giro do eixo do motor se traduz na maquete em movimento linear para fazer subir ou descer o elevador, respectivamente. O CI L293D recebe os sinais provenientes do sistema de controle e apresenta na saída uma tensão analógica que será a responsável pela velocidade de acionamento dos motores, fazendo o intermédio entre o controle e o motor que requer potência em seu funcionamento. Detalhes sobre a conversão do comando digital em tensão analógica será apresentada mais adiante.

Boa parte desses circuitos mencionados faziam parte da placa anterior, tendo sido apresentados apenas como informação geral das funcionalidades da placa, sendo comentados em detalhes juntamente com os novos acrescentados a nova placa.

### 3.1.2 Inserção do *buffer* 74LS244

Para além desses componentes, já presentes na placa antiga, fez-se necessário ressaltar a necessidade de inserção de um *buffer* 74LS244 entre os pinos de cada PCF8754 e o conector de saída para os LEDs. Essa inclusão foi requerida pelo fato de que, na placa antiga, a luminosidade dos LEDs era muito baixa, quase imperceptível de se observar.

Para explicar a razão dos LEDs apresentarem pouca luminosidade, é necessário apresentar algumas das características elétricas definidas pelo fabricante para o funcionamento do CI PCF8574A, conforme elencadas na Tabela 3<sup>39</sup>.

O parâmetro  $I_{OH}$  (*High-Level Output Current*), que representa a máxima corrente fornecida pelo pino do CI em nível lógico alto (+5V) está entre +1 a -1 mA (o sinal negativo representa o sentido da corrente que é do pino para a carga). Esse nível de corrente é insuficiente para fazer com que o LED consiga obter uma luminosidade que possibilite diferenciar se o mesmo está aceso ou não. Já na Tabela 4, verifica-se parte do *datasheet* do 74LS244, sendo possível notar que a corrente fornecida é de no máximo 15 mA, o que é suficiente para que o

---

<sup>39</sup> Site: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82833/FAIRCHILD/LM7805.html>

Tabela 3 – Características Elétricas PCF8574A.

		MIN	MAX	UNIT
$V_{CC}$	Supply voltage	2.5	6	V
$V_{IH}$	High-level input voltage	$0.7 \times V_{CC}$	$V_{CC} + 0.5$	V
$V_{IL}$	Low-level input voltage	-0.5	$0.3 \times V_{CC}$	V
$I_{OH}$	High-level output current		-1	mA
$I_{OL}$	Low-level output current		25	mA
$T_A$	Operating free-air temperature	-40	85	°C

Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574a.pdf>

Tabela 4 – Características Elétricas 74LS244.

Symbol	Parameter	Min	Nom	Max	Units
$V_{CC}$	Supply Voltage	4.75	5	5.25	V
$V_{IH}$	HIGH Level Input Voltage	2			V
$V_{IL}$	LOW Level Input Voltage			0.8	V
$I_{OH}$	HIGH Level Output Current			-15	mA
$I_{OL}$	LOW Level Output Current			24	mA
$T_A$	Free Air Operating Temperature	0		70	°C

Fonte: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ls241.pdf>

LED apresente boa luminosidade. Dessa forma, inseriu-se no projeto da placa o 74LS244 para cada saída fornecida pelo PCF8574A.

### 3.1.3 Testes em *protoboard*

Definidos os componentes eletrônicos que fariam parte da placa, fez-se a montagem da placa em *protoboard*, afim de se realizar testes tanto para comprovar a validade e funcionamento dos elementos eletrônicos escolhidos e da placa, bem como para se confirmar os valores de elementos passivos que também comporiam a placa, tais como resistores e capacitores.

### 3.1.4 Criação do *layout* e confecção da placa

Com a definição dos componentes, partiu-se para a criação do *layout* da nova placa eletrônica de elevadores. Esse processo consistiu na definição da disposição que os componentes têm na placa, além da definição dos caminhos e largura das trilhas, entre outros.

Para a criação do *layout* da nova placa eletrônica de elevadores utilizou-se o software KICAD<sup>40</sup>, que foi escolhido por apresentar recursos como visualização *3D* da placa, ser um *software* de fácil manipulação e de licença livre.

Concluído o processo de criação do *layout*, o próximo passo consistiu na confecção física da placa, cujo método escolhido foi a utilização de tinta fotossensível. Tal escolha pautou-se no fato de o método já ser utilizado a mais de dois anos no LRC (**Laboratório de Robótica Móvel e Comunicação sem Fio**). Além disso essa técnica, apesar de exigir bastante cuidado e atenção no momento em que é realizado o processo, é pouco complexa e os resultados obtidos são considerados bastante satisfatórios, ou seja, a técnica proporciona a obtenção de placas com um nível alto de confiabilidade de funcionamento.

Após a confecção da placa realizaram-se testes de condutividade, visando a determinação de possíveis curtos-circuitos (interceptação de trilhas) ou circuitos abertos (trilhas cortadas) que pudessem prejudicar o funcionamento da placa, procedendo com os devidos ajustes quando necessário. Em seguida foi realizada a perfuração das ilhas da placa e a soldagem dos componentes eletrônicos, bem como a realização de novos testes de condutividade para garantir a total funcionalidade da placa.

## 3.2 Mapeamento da nova placa de elevadores

Nesta seção serão feitas as descrições dos diversos circuitos que compõem a placa eletrônica construída. A Figura 9 apresenta o conjunto das principais interfaces presentes na nova placa de elevadores, destacadas por números e que serão comentadas em separado. O sistema de controle que interage com a maquete através desta placa é o Raspberry Pi 3 (modelo B), doravante citado apenas como RPi3B, conforme foi apresentado em detalhes no Capítulo 2.

### 3.2.1 Interface 1 - Entrada dos sinais do Raspberry Pi 3 para a placa

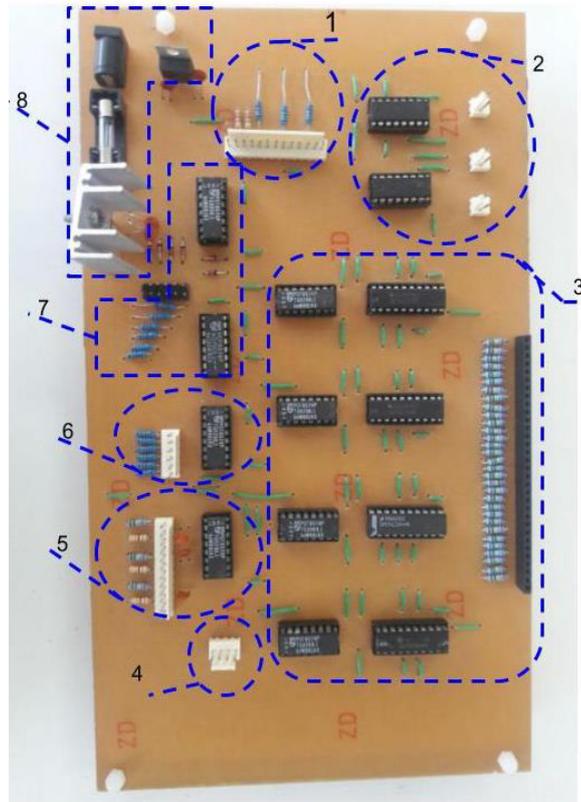
A interface 1 é a responsável por receber os sinais provenientes do sistema de controle, no caso o RPi3B, e distribuindo-os por toda a placa. A Figura 10 mostra a visão superior dos pinos da interface, identificando a que sinal corresponde o devido pino.

O sinal denominado GND é a referência que permite à placa de interface processar os sinais do RPi3B, na medida em que as referências de ambos são interconectadas. Dessa forma,

---

<sup>40</sup> Site: <http://kicad-pcb.org/post/release-4.0.7/>

Figura 9 – Interfaces da nova placa dos elevadores.



Fonte: Autor.

o nível alto de uma GPIO (*General Purpose Input Output*) do RPi3B, correspondente a 3,3 V, deve apresentar o mesmo valor na placa eletrônica.

Figura 10 – Esquema dos pinos da interface de entrada na placa Rpi3B.



Fonte: Autor.

Os pinos de SCL (*serial clock*) e SDA (*serial data*) referem-se a sinais correspondentes ao protocolo I2C, onde SCL corresponde ao clock e SDA corresponde ao pino que trafegam os dados do protocolo. Tais pinos estão conectados, através de resistores de *pull-up* de 4,7 k $\Omega$  conectados à linha de alimentação de 5 V.

Os pinos representados na cor azul são os *enables* da ponte H (CI L293D). Através desses pinos são realizados os acionamentos e os controles de velocidades dos elevadores, uma vez que neles são aplicados sinais PWM (*Pulse Width Modulation*), cujo funcionamento é detalhado no Capítulo 5. Os *enables* possuem resistores de *pull-down* de 10 k $\Omega$  que visa estabilizar o nível lógico deles, caso nenhum sinal esteja sendo aplicado.

Os pinos na cor vermelha são usados para informar o sentido de giro do eixo do motor DC que deslocam os elevadores, sendo cada par de pinos direcionais consecutivos responsáveis pelo controle (dois pinos por motor). Em tais pinos são aplicados sinais digitais que seguem a lógica de acionamento descrita na Tabela 5.

### 3.2.2 Interface 2 - Motores

A interface dos motores é composta por dois circuitos integrados L293D e conectores KK de 2 pinos. Os circuitos integrados recebem os sinais correspondentes a cada elevador e, dependendo da lógica aplicada nos pinos direcionais e do sinal recebidos nos *enables*, ele fornece nos conectores um nível de tensão que possibilitará o acionamento dos motores dos elevadores.

Tabela 5 – Descrição da lógica de funcionamento da ponte H

Estado direcional 1	Estado direcional 2	Sentido do Motor
HIGH	LOW	Sentido Horário
LOW	HIGH	Sentido Anti-horário
HIGH	HIGH	Motor Parado
LOW	LOW	Motor Parado

Fonte: Autor.

### 3.2.3 Interface 3 - LEDs

A interface dos LEDs é composta por quatro PCF8574A, quatro *buffers* 74LS244, resistores limitadores de corrente de 270 k $\Omega$  e conector fêmea 1x32 pinos. Os *PCFs* recebem, via protocolo I2C, um byte que corresponderá ao controle de oito LEDs da maquete. Os *buffers*, como mencionado anteriormente, possuem a função de amplificar o sinal de corrente proveniente dos pinos de dados dos PCFs de forma que os LEDs apresentem uma luminosidade que permita diferenciar com clareza se estão acesos ou não. Os resistores visam limitar a corrente fornecida para os LEDs evitando danificá-los. Por fim, o conector fêmea 1x32 pinos é o responsável por disponibilizar os sinais de acionamento dos LEDs da placa para a maquete de elevadores. Além disso, um dos pinos nessa interface é de referência (GND).

### 3.2.4 Interface 4 - LCD–teclado

A interface LCD–teclado é a responsável por estabelecer a comunicação da placa com o conjunto LCD–teclado, através do protocolo I2C. A interface é composta tão somente por um conector molex KK macho de quatro pinos que apresenta os pinos de sinais de 5V, SCL, SDA e GND.

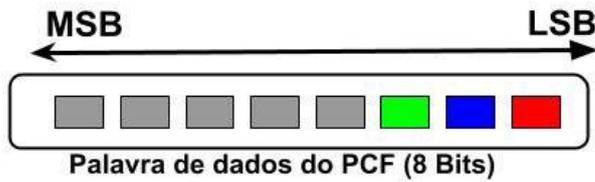
### 3.2.5 Interface 5 - Sensor óptico

A interface Sensor óptico é composta por um PCF8574, resistores e um conector molex KK macho de 1x12 pinos. A Figura 11 apresenta a relação entre o pino do PCF com o correspondente sensor presente no elevador. Essa informação facilita o processo do controle, principalmente quando da criação das rotinas de testes e controle dos elevadores, em que é indispensável saber qual bit do PCF8574 corresponde à leitura do respectivo elevador.

### 3.2.6 Interface 6 - *Bumpers*

A interface dos *bumpers* é a responsável por receber e processar os sinais provenientes desses dispositivos localizados fisicamente na maquete nos pontos extremos do fosso de cada elevador, com a finalidade de delimitar o espaço possível de circular o elevador. A interface é composta por resistores de *pull-up* de 10 k $\Omega$ , conector molex macho KK de 1x6 pinos e um PCF8574A. Da mesma forma que o sensor óptico, é importante que se faça a relação entre o pino do PCF com o correspondente *bumper* na maquete. A Figura 12 apresentada a associação dos pinos do PCF8574A com o respectivo componente na maquete de elevadores.

Figura 11 – Organização da palavra do PCF8574A do sensor óptico.



-  Bit do PCF referente ao sensor óptico do elevador 1
-  Bit do PCF referente ao sensor óptico do elevador 2
-  Bit do PCF referente ao sensor óptico do elevador 3
-  Bits do PCF que não estão conectados a nenhum dos bumpers, portanto seus valores serão sempre 1.

Fonte: Autor.

Figura 12 – Organização da palavra referente aos *bumpers*.

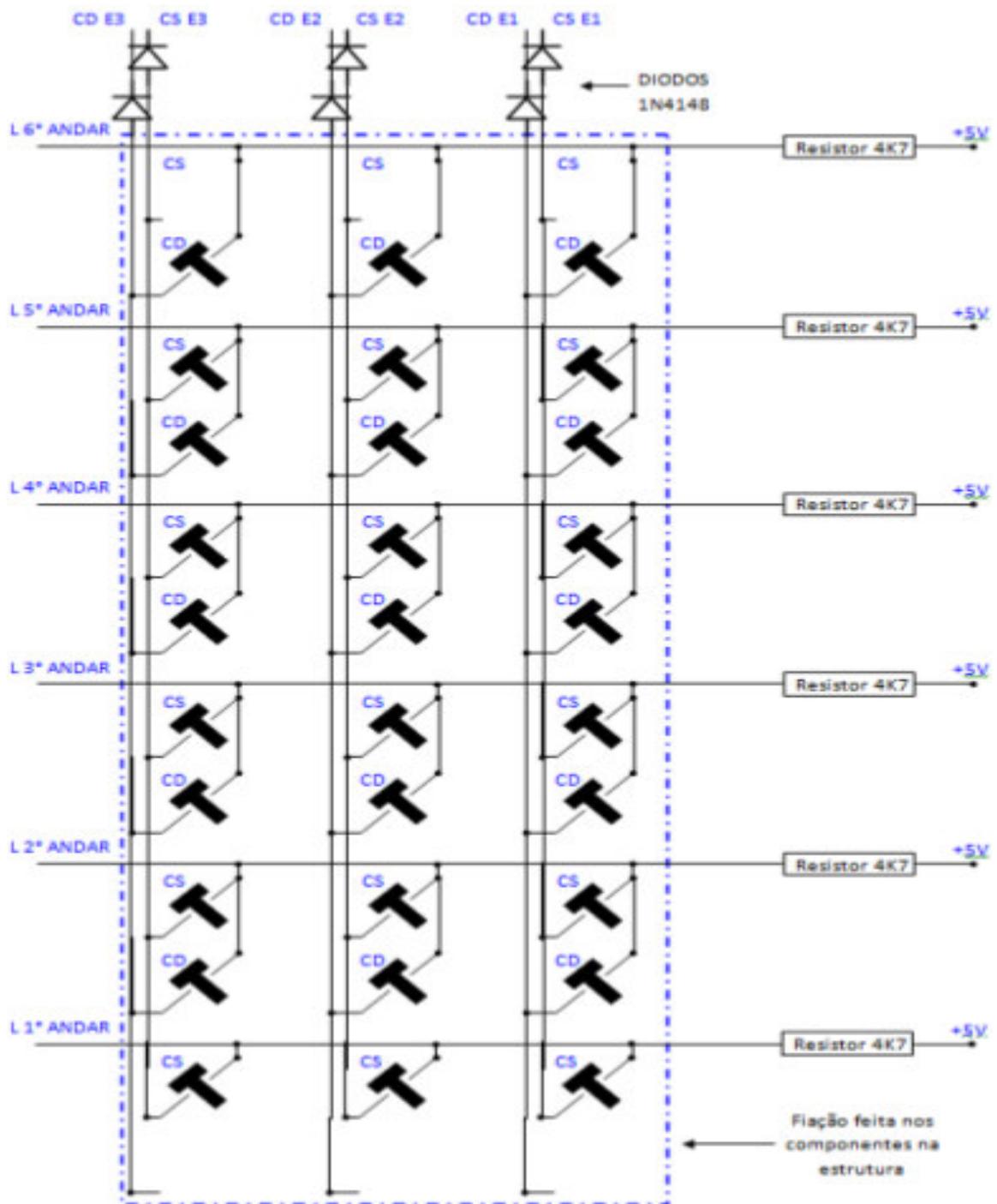
-  Bit do PCF referente ao bumper superior do elevador 1
-  Bit do PCF referente ao bumper superior do elevador 2
-  Bit do PCF referente ao bumper superior do elevador 3
-  Bit do PCF referente ao bumper inferior do elevador 1
-  Bit do PCF referente ao bumper inferior do elevador 2
-  Bit do PCF referente ao bumper inferior do elevador 3
-  Bits do PCF que não estão conectados a nenhum dos bumpers, portanto seus valores serão sempre 1.

Fonte: Autor.

### 3.2.7 Interface 7 - Push buttons

A interface dos *push-buttons* é composta por dois PCFs 8574A, resistores de *pull-up* de 10 k $\Omega$ , diodos de sinal e conector 2x6 pinos. Para melhor compreensão, a Figura 13 ilustra para

Figura 13 – Disposição dos *push-buttons* na maquete de elevadores.



os elementos que compõem essa interface, onde é feito o arranjo matricial dos *push buttons* na maquete de elevadores.

A presença de dois PCFs é justificada pela lógica utilizada para a identificação dos *push buttons* acionados. Essa lógica é baseada no método de varredura, o qual consiste no envio de sinais através do pino de colunas dos elevadores (dois por elevador) seguida da leitura dos sinais nos pinos das linhas (andares). No método de varredura o controle envia apenas uma das colunas em nível alto e faz a leitura das linhas para verificar se alguma delas está baixa, indicando o pressionamento do respectivo *push button*. Esse processo é repetido continuamente da primeira até a última coluna.

### **3.2.8 Interface 8 - Alimentação**

A interface de alimentação é composta por um conector *barrel jack* DC, um fusível, um regulador de tensão 7805 e um 7812. A tensão de entrada da placa é feita pelo *barrel jack*, no valor próximo a 18 V DC, usando uma fonte universal chaveada de 120 W. O fusível é utilizado para proteger a placa de surtos de corrente, que sendo superior a 2 A rompe o elo fusível, protegendo os circuitos integrados e demais componentes da placa. Por fim, tem-se o regulador de tensão 7805, responsável pela alimentação dos circuitos integrados (fornece +5V) e o CI 7812 (+12V) que é o responsável pela alimentação dos motores.

### **3.3 Alterações na planta física da maquete de elevadores**

Além da construção da nova placa de interface, também se realizaram alterações na planta física da maquete. Tais alterações visaram melhorar o desempenho do controle sobre a maquete, uma vez que se verificou empiricamente que determinados componentes da maquete de elevadores tornavam o controle não confiável sob determinados aspectos. A seguir seguem os problemas identificados, onde são apresentadas as soluções encontradas para contorná-los ou mesmo minimizá-los.

#### **3.3.1 Descrição da maquete física de elevadores**

A maquete física de elevadores é composta por três elevadores com seis andares por elevador. Cada conjunto é composto por uma cabine e um contrapeso ligados entre si por uma correia de borracha especial (*oring*) que não sofre deformação nesse tipo de aplicação de pequeno valor de peso. O sistema elevador-contrapeso é deslocado por transferência de carga, uma vez que eles estão sendo acionados por um motor DC, cujo eixo possui uma polia onde a

correia está acoplada. Dessa forma, o sentido que se aciona o eixo do motor (horário ou anti-horário), refere-se ao sentido de deslocamento linear do elevador (subindo ou descendo).

Cada andar é dotado de um conjunto de chaves *push buttons* que indicam o pedido de subida ou descida do usuário. Associado a esses *push buttons* tem-se LEDs que objetivam apresentar visualmente a realização de tais pedidos do usuário externo ao elevador. Cada fosso de elevador apresenta também duas chaves fim de curso (*bumpers*), cujo objetivo é limitar a área permitida de movimentação da cabine entre os andares, dispositivos em destaque na Figura 14.

Figura 14 – Detalhamento dos elementos da maquete : a) cabine, *push buttons* e sensor óptico e b) *bumper* e parte inferior do elevador.



Fonte: Autor.

Para verificação e contagem dos andares, utilizou-se sensores ópticos QRB 1134 e um sistema de *tags* brancas e pretas, localizadas na lateral dos fossos dos elevadores. Entre andares, as *tags* são todas pretas, já próximo as divisas dos andares têm-se um esquema de duas *tags* brancas intercaladas por uma fina listra preta. Esse esquema permite a definição dos andares para cada elevador. A definição de faixas brancas intercalando as pretas entre os andares tem a finalidade de acelerar ou desacelerar o elevador, caso ele esteja partindo do andar ou chegando ao pedido pelo usuário (interno e externo), respectivamente. A foto mostrada na Figura 15 corresponde ao esquema de detecção de andares.

Esse método de detecção de andar substituiu o original que era localizar o andar através de sensor ultrassônico, um por fosso da maquete. A ideia original era ler a distância do sensor fixado na parte superior do fosso para o tampo do elevador e, de forma indireta, calcular a sua

Figura 15 – Sensor óptico QRB1134 e sistema de identificação de andares.



Fonte: Autor.

localização no fosso. Nos testes empíricos a leitura dos sensores mostrou-se satisfatória a pequenas distâncias (máximo de 40 cm), porém não conseguindo medir distâncias maiores. No método óptico, ainda que o elevador pare um pouco desalinhado com andar se subindo ou descendo (a faixa fina preta que informa a parada é única), ele mostrou-se satisfatório para o propósito do trabalho (SOUSA, 2015).

### 3.3.2 Instabilidade dos elevadores

O primeiro e grande problema enfrentado na fase de testes da placa eletrônica dos elevadores foi a instabilidade do conjunto elevador e contrapeso. Verificava-se que o elevador oscilava no fosso de forma demasiada quando o motor era acionado mesmo em velocidade baixa. A consequência comprometedora dessa vibração era a perda das leituras dos sensores

ópticos em alguns pontos da maquete de elevadores. A situação era crítica quando apenas um dos motores estava funcionando e tornava-se ainda pior quando os três eram acionados simultaneamente.

Como citado, tal instabilidade ocasionava a perda da leitura dos sensores ópticos o que, por sua vez, invalidava o método escolhido para a determinação do andar do elevador e impossibilitava que o controle atuasse de maneira efetiva. A Figura 16 apresenta as vistas da estrutura da maquete de elevadores antes da realização das devidas alterações.

Figura 16 – Vistas da maquete de elevadores antes das alterações: a) frontal, b) traseira, c) lateral esquerda e d) lateral direita.



(a)



(b)



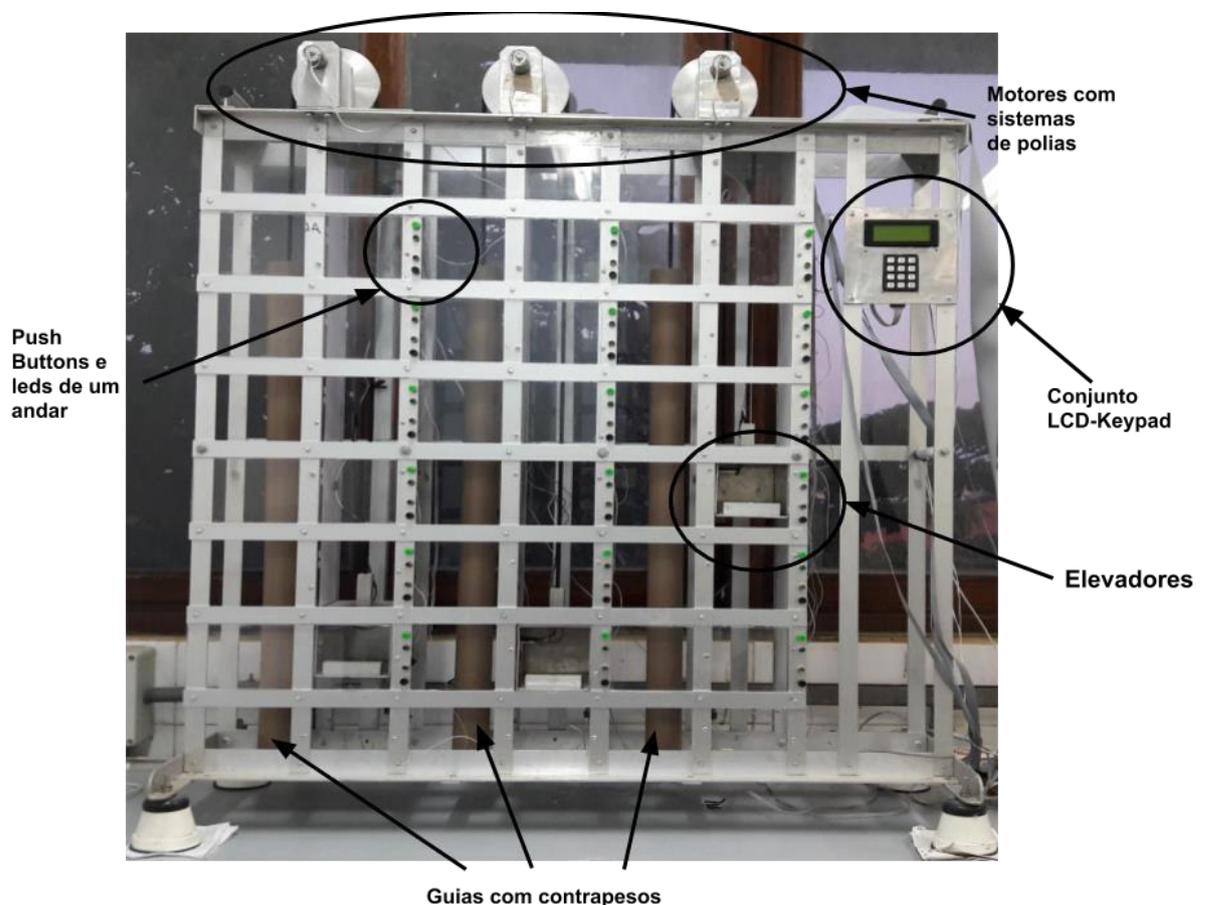
(c)



(d)

A solução encontrada para o referido problema foi a inserção de guias para os contrapesos. A função dos guias é de estabelecer um caminho para os contrapesos de forma que estes pouco oscilassem, uma vez que, por estarem soltos e desalinhados em relação ao centro do elevador, os contrapesos estavam mais propensos às vibrações quando os motores eram acionados e tais vibrações eram propagadas à maquete, fazendo com que as cabines também oscilassem. A Figura 17 apresenta a imagem frontal da estrutura com os guias de contrapesos instaladas.

Figura 17 – Maquete de elevadores após alterações realizadas.



Fonte: Autor.

### 3.3.3 Despadronização dos conectores da maquete

Outro problema enfrentado no período de testes da placa eletrônica de elevadores foi a despadronização dos conectores da placa de elevadores. Os conectores utilizados na maquete não levavam em consideração a forma como eram colocados na placa de elevadores, de forma

que, os circuitos que exigem polarização como, por exemplo, o circuito dos sensores ópticos, deveriam ser conectados à placa com o máximo de cuidado, sob o risco de danificar os sensores. Outro problema é quanto à conexão dos motores que, caso fosse invertida, acarretaria na mudança da lógica de funcionamento dos mesmos, uma vez que a inversão dos bornes de um motor DC ocasiona a mudança no sentido de rotação do motor.

A solução encontrada para tal problema foi a substituição dos antigos conectores por conectores do tipo KK, uma vez que esse conector possibilita apenas uma forma de conexão ao usuário, impedindo tanto a inversão de circuitos cruciais, como o circuito dos sensores ópticos e o do conjunto LCD–teclado, quanto a inversão de elementos que acarretassem mudança de lógica de operação.

## 4 SIMULADOR DA MAQUETE DE ELEVADORES E DA PLACA ELETRÔNICA

Simuladores, como explicitado no Capítulo 2, são amplamente utilizados e difundidos em diversas áreas, incluindo a engenharia, pois possibilitam testes e análises em ambientes que são similares aos processos físicos reais, onde, na maioria das vezes, são ferramentas indispensáveis às primeiras fases dos projetos. Neste trabalho, desenvolveu-se um simulador da maquete de elevadores e da placa eletrônica com o objetivo de se ter um instrumento de análise e testes do controle que será aplicado à maquete física de elevadores. Dessa forma, durante o desenvolvimento de um determinado programa de controle da planta física, o simulador cumpre um papel fundamental de validar, ainda que parcialmente, as implementações desse controle.

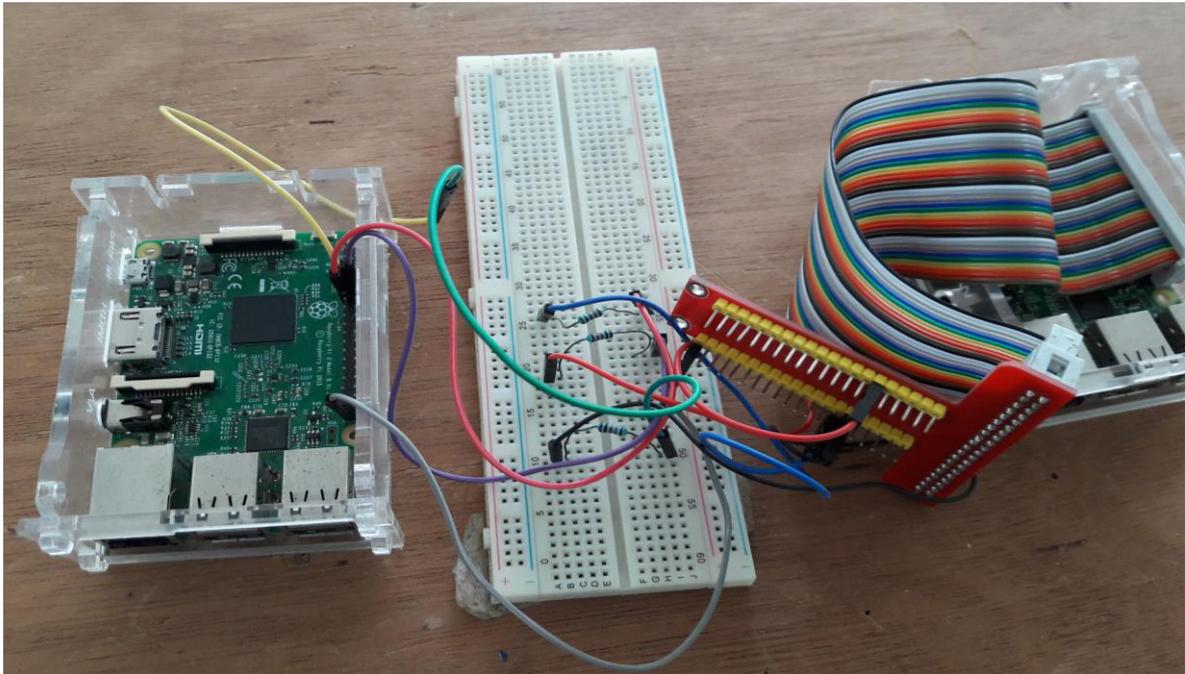
### 4.1 Concepção física do simulador

O simulador foi desenvolvido para ser executado em uma placa RPi3B, junto a um teclado que simula a recepção dos pedidos internos e externos. Da mesma forma que na placa eletrônica, foram disponibilizados 12 pinos do RPi3B para receber os dados do controle (interface entre os sistemas), sendo:

- a) Um pino para os dados (SDA) do protocolo I2C;
- b) Um pino para o *clock* (SCL) do protocolo I2C;
- c) Três pinos (um para cada motor) para recepção dos sinais PWM para acionamentos dos eixos três motores (determinação das respectivas velocidades);
- d) Seis pinos (dois por motor) para receber os dados que informam a direção de giro dos seus eixos, o qual determina o sentido de deslocamento dos elevadores (subindo ou descendo);
- e) Um pino de referência (GND).

Para validação dos módulos desenvolvidos no simulador, necessitou-se utilizar outro RPi3B como controle de forma que o simulador responda de maneira otimizada o que se espera da planta física, quando submetida aos sinais provenientes do controle. Os pinos do RPi3B do simulador foram conectados aos pinos do RPi3B de controle através de resistores de 10 k $\Omega$ . Essa medida foi tomada com o objetivo de limitar a corrente nesses pinos GPIO das placas e, conseqüentemente, protege-los em ambos os RPi3B. Para a melhor compreensão da concepção física do simulador, a Figura 18 apresenta a interface de conexão dos RPi3B do simulador (à esquerda) com o do controle (à direita).

Figura 18 – Interface de conexão dos RPi3B do simulador (esquerda) com o de controle (direita).



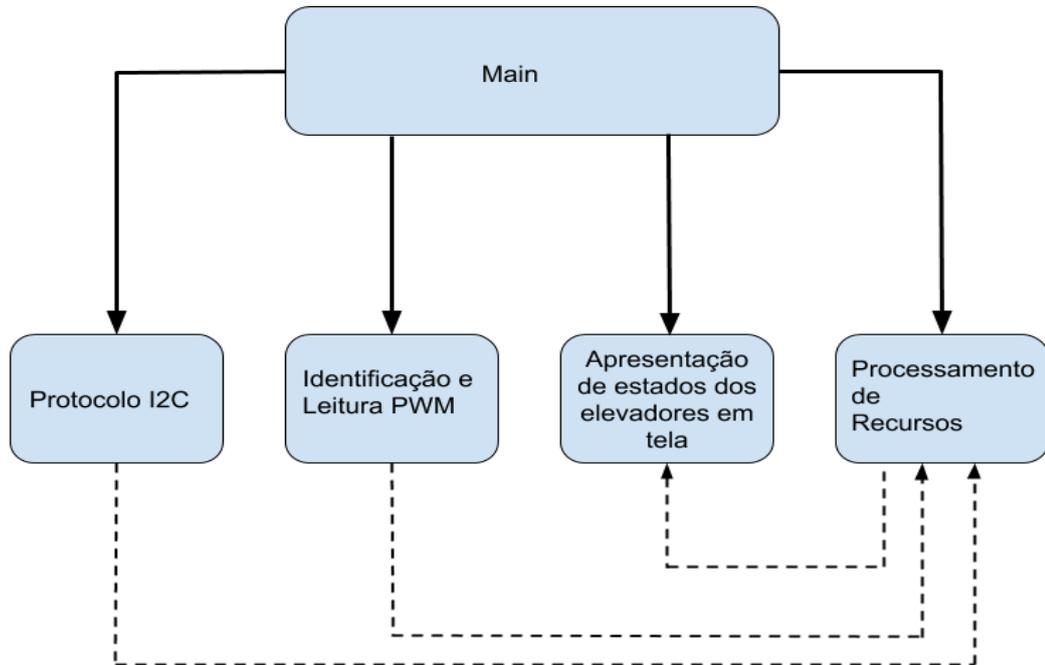
Fonte: Autor

## 4.2 Organização em módulos

O simulador do elevador foi dividido em módulos, cada um representando um processo essencial presente no conjunto da placa de interface com a maquete física dos elevadores. Na etapa de planejamento e definição do escopo do simulador, decidiu-se pela divisão em quatro módulos essenciais: módulo PWM, módulo I2C, módulo de processamento de recursos e módulo de apresentação dos dados do simulador em tela.

É importante ressaltar que a definição da quantidade de módulos para o simulador não se tratou de uma escolha arbitrária. Ao contrário, ela foi feita considerando-se o fato de o simulador ser implementado na plataforma RPi3B que, como visto no Capítulo 2, possui quatro núcleos em seu processador. Desta forma, utilizando-se a programação em *multithreading*, definiu-se que cada núcleo ficaria responsável por um dos quatro módulos, de forma que esses códigos executem no sistema em processamento paralelo. As subseções a seguir detalharão cada um desses módulos. A Figura 19 apresenta a organização desses módulos em diagrama de blocos com as relações de envio e recepção de informações estabelecidas entre eles.

Figura 19 – Organização dos módulos do simulador.



Fonte: Autor.

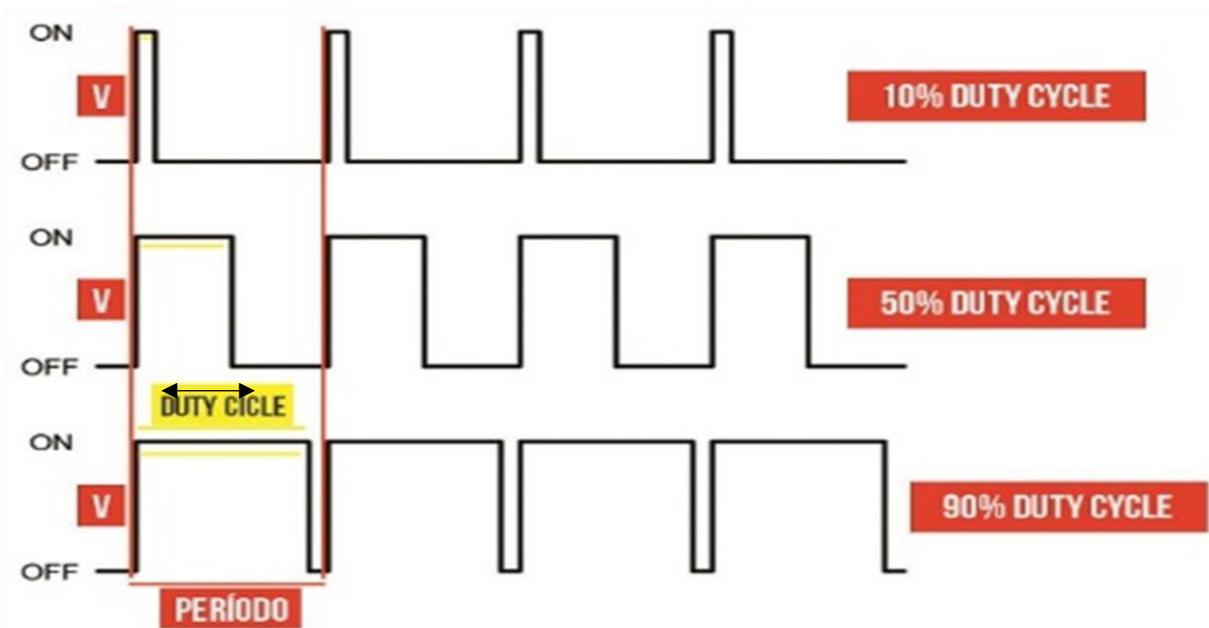
#### 4.2.1 Módulo PWM

Conforme definido no Capítulo 3, o sinal PWM trata-se de uma técnica que possibilita a obtenção de níveis de potência analógicos a partir de uma fonte digital. Os atributos mais importantes dessa técnica de modulação são: a) a frequência; b) o tempo em que o pulso está em nível lógico alto ( $T_{on}$ ); c) o ciclo de trabalho (*duty cycle*), que define a relação entre o tempo em que o pulso está em nível lógico alto e a duração total do pulso; e d) o tempo que o pulso está em nível lógico baixo ( $T_{off}$ )<sup>41</sup>. Esta técnica é utilizada em diversos sistemas em engenharia, sendo neste trabalho empenhada para o acionamento dos motores DC da maquete, bem como para a variação da velocidade dos seus eixos. A Figura 20 apresenta a modulação em PWM e a relação entre os principais atributos calculados e manipulados pelo simulador.

Na placa eletrônica, os sinais PWM são recebidos do controle e processados pelo circuito integrado L293D, sendo transferidos aos respectivos motores da maquete, na forma de tensão DC proporcional, informando a velocidade de acionamento do seu eixo. Então, o módulo PWM do simulador é responsável pela leitura dos sinais PWM, necessitando fazer: a) a identificação

<sup>41</sup>Site: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap2.pdf>

Figura 20 – Modulação em sinal PWM.



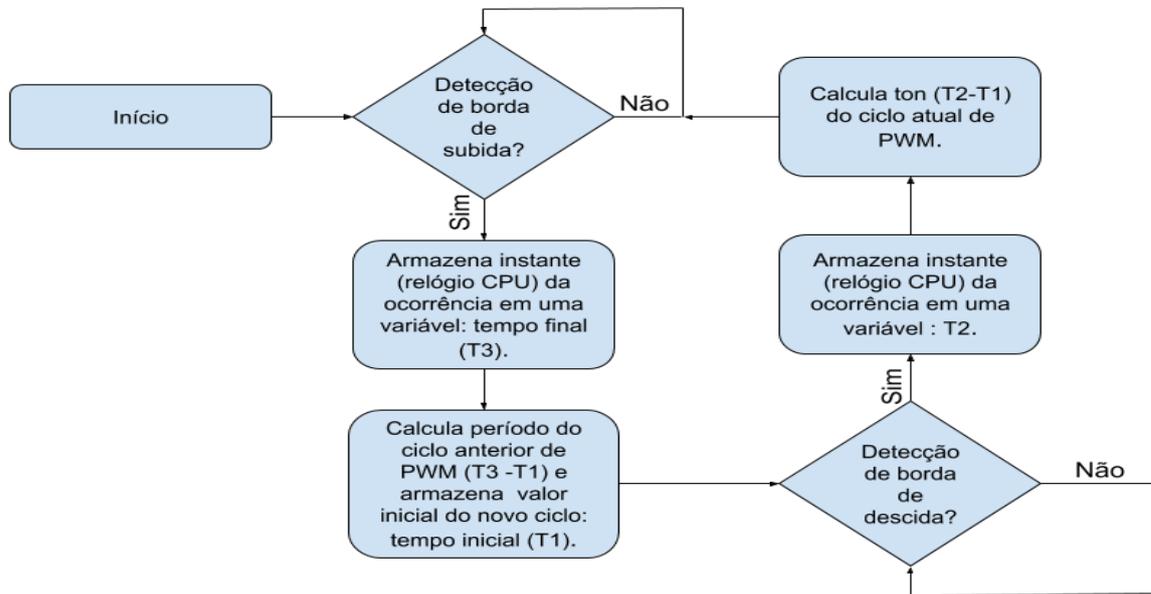
Fonte: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/pwm-pulse-width-modulation-pulso-com-largura-modulada-como-medir-estes-sinais>

da frequência; b) a identificação do tempo em que o simulador ficou em tempo lógico alto; e c) a determinação do *duty cycle* do simulador.

Foram dedicados três pinos do RPi3B para receber os sinais de PWM vindos do controle e realizar a identificação dos atributos desses sinais. Para a verificação das três características dos sinais PWM citadas nos pinos reservados, utilizou-se tanto a técnica de *pulling* (verificação periódica do estado do pino e detecção de variação de nível) quanto a técnica de interrupção, provocada por uma borda de descida ou de subida dos sinais nos respectivos pinos. As duas técnicas apresentaram funcionamento satisfatório quanto à identificação dos valores de frequência e *duty cycle* do PWM aplicado ao simulador, diferindo-se apenas na influência sobre os demais módulos. A técnica de interrupção apresentou como desvantagem a interferência negativa na execução dos demais módulos, sendo o I2C o mais afetado. Em função disso, optou-se, na versão final do simulador, pela utilização da técnica de *pulling*.

A Figura 21 apresenta o fluxograma da rotina aplicada para identificação e definição dos valores de *duty cycle* e frequência do PWM aplicado ao simulador. Inicialmente, tem-se a detecção de uma borda de subida, onde essa mudança de nível é realizada verificando-se periodicamente o valor lógico do pino PWM. Caso haja uma alteração de nível baixo para alto no pino é chamada uma rotina que primeiramente armazena o valor do instante da ocorrência desse evento de acordo com o relógio da CPU. Esse tempo armazenado representa ao mesmo tempo o fim de um ciclo de PWM e início de outro ciclo e, portanto, o primeiro armazenamento

Figura 21 – Fluxograma da rotina de identificação do sinal PWM.



Fonte: Autor.

refere-se ao tempo final do PWM do ciclo anterior para, em seguida, calcular o valor do período do ciclo desse PWM anterior ( $T3 - T1$ ). Após o cálculo do período anterior armazena-se o tempo inicial do novo ciclo de PWM na variável  $T1$ , por definição, o primeiro ciclo de PWM apresentará valor de período errado, haja vista ainda não ser possível a obtenção desse valor, uma vez que o tempo final de um ciclo coincide com o tempo inicial do próximo ciclo.

Após o cálculo do período, o pino que recebe o sinal de PWM volta a ser inspecionado, buscando-se a detecção de uma borda de descida, ou seja, a alteração do nível lógico do pino de alto para baixo. Quando ocorre a verificação dessa alteração é chamada uma rotina que armazena o tempo do relógio da CPU em que ocorreu o evento na variável  $T2$ . Com os valores dos tempos  $T1$  (início do ciclo) e  $T2$  (fim do ciclo ativo do PWM) é possível calcular o valor do período em que o pino ficou em nível lógico alto ( $T2 - T1$ ). A partir dos valores obtidos de período e *ton* (ciclo ativo do PWM) é possível determinar os demais atributos do sinal PWM como o *duty cycle* (razão entre o ciclo ativo e período) e sua frequência (inverso do período).

#### 4.2.2 Módulo I2C

O protocolo de comunicação I2C descreve o funcionamento de um barramento de dados serial que faz uso de apenas dois fios, sendo um para dados (SDA) e outro de *clock* (SCL). Este protocolo foi desenvolvido na década de 90 pela empresa Phillips com o objetivo de facilitar a integração de circuitos como sensores e conversores de níveis. Na placa eletrônica e na maquete

de elevadores, o protocolo I2C tem por objetivo principal ser um expensor de portas, fazendo uso de oito circuitos integrados PCF8574A, o que possibilitou a obtenção de até 64 pinos de entrada/saída para conexão dos periféricos presentes na maquete. Além disso, o protocolo possibilitou a comunicação com os periféricos da estrutura de elevadores como, por exemplo, a utilização para comunicação com o conjunto LCD/teclado.

O *thread* de I2C no simulador é responsável por simular o referido protocolo de comunicação, o que na placa eletrônica representa a troca de dados com temporização específica entre o RPi3B (controle) e os PCFs (expansores de entrada e saída digital). Esse *thread* realiza a extração dos pedidos, onde os *push-buttons* e o teclado matricial da maquete foram, no simulador, substituídos pelo teclado tradicional do PC. O *thread* de I2C pode ser dividido em submódulos que simulam os processos que ocorrem quando o protocolo atua na placa:

a) **Submódulo *start*** – inicia o protocolo I2C, sendo indicado fisicamente quando há alteração no nível do barramento de dados (SDA) de alto para baixo, quando o barramento de *clock* (SCL) encontra-se em nível alto. A ação de ***restart*** no barramento, ocorre na mesma analogia ao ***start***, somente que tem o objetivo de reverter os sinais que trafegam da operação de escrita para a de leitura pelo mestre;

b) **Submódulo de endereçamento** – o mestre envia o endereço para o qual se deseja comunicar. É basicamente composto por oito bits, onde os 7 primeiros indicam o endereço físico do escravo e o oitavo bit informa se o mestre realizará uma tarefa de escrita ou leitura;

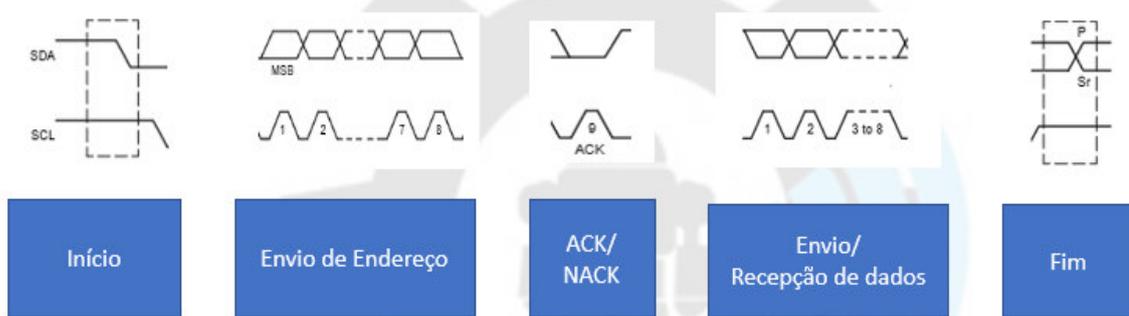
c) **Submódulo *ack/nack*** – é utilizado após o envio do endereço e após a recepção ou envio de dados, sendo um bit enviado pelo escravo para o mestre, indicando se os dados trafegaram com sucesso. É importante ressaltar que nesse submódulo ocorre a inversão de barramento de dados, onde o escravo assume e escreve no barramento (condição ***restart*** citada acima);

d) **Submódulo de envio ou recepção de dados** - é onde é realizada a transmissão ou a recepção dos dados. Após identificar o escravo que se deseja comunicar e posteriormente este enviar o sinal de *Ack* é realizada a transmissão ou recepção dos dados. O mestre, nesse submódulo, realiza a recepção bit a bit pela linha SDA de acordo com alterações de nível em SCL; e

e) **Submódulo *stop*** – finaliza o protocolo I2C, sendo indicado fisicamente quando há alteração no nível da linha SDA de baixo para alto, quando o sinal em SCL encontra-se em nível alto.

É importante ressaltar que a velocidade de transmissão de dados do I2C desenvolvido no simulador é a mesma que a aplicada à placa eletrônica, ou seja, 100 kHz. A Figura 22 apresenta a localização de cada submódulo durante a ocorrência desse protocolo.

Figura 22 – Apresentação dos submódulos do processo de I2C.



Fonte: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf> (adaptado)

### 4.2.3 Módulo de processamento de recursos

O módulo de processamento de recursos é o responsável por realizar os cálculos relativos aos fenômenos físicos dos elementos da maquete de elevadores, tais como: velocidade de acionamento, posição em que se encontra o elevador no fosso, sentido de deslocamento do elevador, etc. Além disso, este módulo deve obter os dados provenientes dos periféricos da maquete, como o pedido de um usuário externo e no interior do elevador, etc. Devido aos muitos atributos desse módulo de processamento de recursos, ele foi dividido nos seguintes em submódulos:

**a) Submódulo de verificação dos pedidos internos e externos dos elevadores** – é o responsável por fazer a leitura periódica do teclado do computador de forma a identificar, de forma simulada, a solicitação de pedidos internos (teclado matricial) e externos (*push buttons*) dos usuários do elevador, além de enviar para o módulo de I2C os dados correspondentes para serem encaminhados ao controle;

**b) Submódulo de verificação dos sinais de acionamento e direção de giro dos eixos dos motores** – faz a verificação constante dos pinos que recebem os sinais do controle para acionamento dos motores (PWM). Além disso, também verifica a lógica de acionamento para posterior definição dos sentidos de acionamento dos motores, informando se o elevador está subindo ou descendo. A Tabela 6 mostra como é feita a codificação dos sentidos dos giros dos

Tabela 6 – Definição do movimento de cada elevador através de sinais em dois pinos.

Pino 1 (Nível Lógico)	Pino 2 (Nível Lógico)	Sentido Movimento Elevador
Baixo	Baixo	Parado
Alto	Baixo	Acionado, Subindo
Baixo	Alto	Acionado, Descendo
Alto	Alto	Parado

Fonte: Autor

eixos dos motores que acionam cada elevador (subindo ou descendo), de acordo com o nível lógico aplicado a dois pinos.

Foram necessárias a utilização de seis pinos GPIO do RPi3B, da mesma forma como foi projetado na placa eletrônica, sendo os pares de pinos responsáveis pela simulação de sentido de cada motor. Este submódulo também se comunica com o de PWM, levando em consideração para a definição do acionamento dos motores os valores de PWM superiores a zero, ou seja, quando o elevador não estiver parado.

**c) Submódulo de cálculo dos andares dos elevadores** – através dos dados provenientes do módulo de PWM, esse código define a posição em que o elevador se encontra no fosso. Por padrão, ao inicializar o simulador, os três elevadores estarão parados no primeiro andar (térreo). A alteração do andar do elevador se dará através de acordo com a relação da cinemática clássica, onde a velocidade com que o elevador se movimentará será determinada pelo valor do *duty cycle* do PWM aplicado aos pinos do RPi3B, ou seja, quanto maior o *duty cycle* (velocidade de acionamento) mais rápido ocorrerá a alteração dos andares do elevador, que é mostrada na tela por outro módulo citado mais adiante.

**d) Submódulo de verificação dos *bumpers*** – é responsável por verificar o andar que cada elevador se encontra, de forma que se eles estiverem nos andares extremos (primeiro ou sexto) é indicado o acionamento do *bumper* correspondente, caso o movimento do respectivo elevador indique extrapolação da área útil no fosso em que se encontra. O mesmo processo é verificado na maquete física dos elevadores. Ao verificar o acionamento de um *bumper*, a variável correspondente é modificada, sendo enviada ao módulo de I2C para transmissão para o controle quando solicitado.

#### 4.2.4 Módulo de apresentação dos dados em tela

Por fim, tem-se o módulo de apresentação dos dados de cada elevador em tela, na forma de um painel textual, de forma que o usuário possa acompanhar a dinâmica do controle efetuado na maquete de elevadores simulada. Para a estruturação das informações nesse painel supervisorio, utilizou-se o próprio *bash* do LINUX<sup>42</sup>. O módulo de processamento de recursos do PWM é responsável pela alteração dos dados do simulador, os quais são armazenados em um arquivo. O *thread* de apresentação dos dados em tela faz a leitura periódica desse arquivo, apresentando-o em tela através dos comandos abaixo, escritos em uma única linha do *prompt* do terminal do Linux:

`“watch -n 1 less one.txt”`

O comando “*watch*” é utilizado para executar e mostrar a saída de um determinado comando no *bash* do Linux<sup>43</sup>. O atributo “1” do comando representa a periodicidade com que a execução e a apresentação do comando ocorrerão, em unidades de segundos. O comando que é executado periodicamente pelo “*watch*” é o “*less*”, o qual é usado para realizar a leitura de arquivos<sup>44</sup>. Para o comando “*less*” é passado o atributo “*one.txt*” que é o nome do arquivo onde o módulo de processamento de recursos do simulador salva os dados para mostra-los ao usuário. Dessa forma, a junção dos referidos comandos, “*watch*” e “*less*”, possibilita a apresentação em tela dos dados do simulador.

Os dados definidos para apresentação do estado de cada elevador em tela foram:

- a) **O estado atual** – informa se o elevador está acionado (deslocando) ou não (parado);
- b) **O sentido de deslocamento** – Apresenta o sentido de deslocamento do elevador, no caso, subindo ou descendo. Caso não esteja se deslocando, é informada a condição de parado;
- c) **O valor do *duty cycle* do PWM** – informa o valor do *duty cycle* aplicado ao elevador. A apresentação desse dado é importante, pois possibilita a mensuração da velocidade com que ocorrerá a alteração dos andares das velocidades (quanto maior o *duty cycle*, mais rápida será a alteração dos andares do elevador):
- d) **Status dos *bumpers superior/inferior*** – informa se os *bumpers* superior ou inferiores localizados nos limites do fosso do elevador está acionado (ON) ou não (OFF);
- e) **Localização do elevador no fosso** – apresenta o andar em que os elevadores estão, quando parados, ou a transição entre andares, quando em movimento.

<sup>42</sup> Site: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Bash>

<sup>43</sup> Site: <https://www.vivaolinux.com.br/dica/Monitorando-tarefas-com-o-comando-watch>

<sup>44</sup> Site:

[https://pt.wikibooks.org/wiki/Guia\\_do\\_Linux/Iniciante%2BIntermedi%C3%A1rio/Comandos\\_diversos/less](https://pt.wikibooks.org/wiki/Guia_do_Linux/Iniciante%2BIntermedi%C3%A1rio/Comandos_diversos/less)

A Figura 23 apresenta um exemplo dos dados referentes aos elevadores em tela.

Figura 23 – Apresentação dos dados em tela.

```
Every 1.0s: less teste_interface.txt
Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cicle 1=10.057971    Duty Cicle 2 = 20.034113    Duty Cicle 3=30.050539
Status:LIGADO            Status:LIGADO              Status:LIGADO
Sentido:Subindo          Sentido:Subindo            Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:1       Andar Elevador 2:2         Andar Elevador 3:3
Bumper Superior 1: 0     Bumper Superior 2:0        Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 0     Bumper Inferior 2:0        Bumper Inferior 3 :0
Pedido de Descida = 0    Pedido de Subida = 0       Pedido Interno = 0
```

Fonte: Autor.

### 4.3 Simulação da placa eletrônica de interface

A simulação da placa eletrônica é sintetizada basicamente em dois módulos: o módulo I2C e o PWM. Esses módulos possibilitam a recepção e a transmissão dos dados que ocorrem na placa eletrônica de interface, onde tem-se no simulador todos os itens que estão presentes na placa eletrônica. Por exemplo, os sinais de interface de entrada, como visto anteriormente na Seção 4.1.

Da mesma forma, os oito circuitos integrados PCF8574A e o LCD/teclado que estão presentes na placa eletrônica de interface e são acessados através do protocolo de comunicação I2C, apresentam-se no simulador através dos mesmos endereços que se tem na placa de interface. Ainda na simulação da placa eletrônica, tem-se a identificação da frequência e do *duty cycle* dos sinais PWM e a leitura dos sinais dos pinos direcionais dos motores dos elevadores, os quais definirão a velocidade e o sentido de deslocamento dos elevadores. Como mencionado no Capítulo 3, na placa eletrônica de interface, esses sinais são processados pelo circuito integrado L293D (ponte H).

### 4.4 Simulação dos estados dos elementos da maquete

Os elementos da maquete, bem como sua conexão à placa eletrônica de interface foram descritos no Capítulo 3. A simulação desses elementos foi realizada através da modificação do valor da variável correspondente ao elemento, de acordo com o processo realizado no simulador. Por exemplo, a simulação da alteração do estado do *bumper* é realizada através da

verificação do andar onde o elevador se encontra no fosso que, caso seja o primeiro e o elevador é comandado para descer, o *bumper* inferior é ativado, fazendo-o parar. De forma análoga, ocorre quando o elevador estiver no sexto andar e é comandado para subir, ativando o *bumper* superior. Essa alteração é passada então para a variável que representa o conjunto de *bumpers* para ser enviada ao controle quando solicitada através do protocolo de comunicação I2C.

Da mesma forma, os *push buttons* e os pedidos internos realizados através do teclado matricial da maquete são simulados pelo teclado do computador, onde os pedidos do usuário realizados por eles provocam alterações em suas respectivas variáveis que, posteriormente, são enviadas ao RPi3B de controle por meio do protocolo I2C. Foi desenvolvida uma rotina que verifica constantemente se há ou não alguma interrupção no teclado, ou seja, se há alguma tecla pressionada para realizar a alteração dessas variáveis. Tendo em vista que na maquete original tem-se 12 *push buttons* por elevador que devem ser simulados como pedidos de descida ou subida nos seis andares, além de seis teclas do teclado matricial (uma por andar) para simulação dos pedidos internos, utilizou-se uma codificação apresentada na Tabela 7, para representar todas as possibilidades de pedidos que podem ser realizados no simulador.

Tabela 7 – Codificação dos tipos de pedidos realizados através do teclado matricial.

<b>Tipo de pedido</b>	<b>Codificação do tipo de pedido</b>	<b>Andar solicitado</b>
Descida	"d"	"1" a "6"
Subida	"s"	"1" a "6"
Interno	"i"	"1" a "6"

Fonte: Autor

Na Tabela 7 são representados os tipos de pedidos e a codificação utilizada para diferencia-los. Se o usuário quiser realizar um pedido de descida para o andar 2, ele deve primeiramente pressionar no teclado do computador o caractere “d” e, em seguida, deve informar o andar o qual deseja ir sendo que as possibilidades variam de “1” a “6”. Se for um pedido de subida, deve-se primeiramente pressionar a tecla “s” para informar o sentido do pedido (subida) e depois o andar o qual se deseja ir. Por fim, o mesmo procedimento pode ser aplicado aos pedidos internos. A Figura 24 apresenta o exemplo de uma solicitação de pedido

de descida para o andar 2, onde em dois terminais verifica-se a codificação e a apresentação do pedido em tela.

Figura 24 – Apresentação dos pedidos de descida em tela e da solicitação de acordo com a codificação.

```

Every 1.0s: less teste_interface.txt
Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cicle 1=0.000000    Duty Cicle 2 = 0.000000    Duty Cicle 3=0.000000
Status:DESLIGADO        Status:DESLIGADO          Status:DESLIGADO
Sentido:Parado           Sentido:Parado            Sentido:Parado
Andar Elevador 1:0       Andar Elevador 2:0        Andar Elevador 3:0
Bumper Superior 1: 0     Bumper Superior 2:0       Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 1     Bumper Inferior 2:1       Bumper Inferior 3 :1
Pedido de Descida = 2    Pedido de Subida = 0      Pedido Interno = 0

Apresentação dos pedidos
solicitado em tela

pi@raspberrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
pi@raspberrypi:~/Documents/Elevadores/Simulador $ ./t2c_slave_v23
2
Solicitacao de descida para 2
d2
Solicitacao de descida para 2

Codificação do Pedido de
Descida para o andar 2

```

Fonte: Autor. (telas de dois terminais do Linux sobrepostas)

#### 4.5 Exemplo de funcionamento do simulador

Para exemplificação do funcionamento do simulador, suponha-se o início da aplicação dos sinais ao RPI3B. Como já citado, considera-se inicialmente que os três elevadores ao serem acionados encontram-se na posição do andar zero ou térreo. Após o início da aplicação dos sinais, o *thread* de apresentação de recursos aguarda alguma modificação de nível para que se inicie o cálculo dos atributos do PWM. Ocorrendo a referida alteração de nível, processa-se a rotina apresentada no fluxograma da Figura 25, onde ao final da rotina, as variáveis de *duty cycle* e frequência de cada um dos elevadores é passada para o *thread* de Processamento de Recursos, conforme Figura 21. No *thread* de processamento de recursos é definida a velocidade com que os elevadores “andarão” pelos módulos (velocidade de iteração das variáveis de andar), além de se definir o sentido com que o elevador se deslocará e o status deles (ligado ou desligado) de acordo com os sinais aplicados. Posteriormente, os dados de *duty cycle*, status dos elevadores, sentido de acionamento e o andar em que o elevador se encontra são repassados ao *thread* de apresentação em tela, de forma que, o usuário possa acompanhar o desenvolvimento da simulação através do monitor do computador.

O *thread* de I2C aguarda a condição de *start* do protocolo. Quando o mestre manda o sinal de início do protocolo, este aciona o submódulo de *start* conforme diagrama de blocos da Figura 22. É dever do mestre informar com qual escravo deseja se comunicar e o modo de comunicação, se escrita ou leitura. Após o envio do endereço, o simulador verifica em um *buffer* se o endereço existe, caso exista, verifica-se então o modo. Caso o endereço não exista é apresentada uma mensagem em tela, informando sua não localização. A Tabela 8 apresenta os endereços disponibilizados para comunicação no simulador e seus modos (escrita ou leitura), conforme a placa eletrônica de interface. É importante ressaltar que os únicos elementos presentes na maquete e que o elevador não leva em consideração são os LEDs devido à grande quantidade desses elementos na maquete e a apresentação em tela dos pedidos através de variáveis.

Tabela 8 – Endereços disponíveis para comunicação no Simulador.

Lista de Endereços		
Endereços	Função	Modo
0x20	Colunas dos <i>Push Buttons</i>	Escrita
0x21	LEDs (não apresentado no Simulador)	Não Utilizado
0x22	<i>Bumpers</i>	Leitura
0x23	LEDs (não apresentado no Simulador)	Não Utilizado
0x24	Linhas <i>Push Buttons</i>	Leitura
0x25	LEDs (não apresentado no Simulador)	Não Utilizado
0x26	Sensor Óptico	Leitura
0x27	LEDs (não apresentado no Simulador)	Não Utilizado
0x63	<i>Keypad</i>	Leitura

Fonte: Autor.

De acordo com o modo tem-se que se o controle estiver em modo de escrita, ele automaticamente modificará a variável correspondente ao endereço com o qual deseja se comunicar. Por exemplo, se for realizada uma escrita para o escravo de endereço 0x20 (colunas dos *push buttons*) a variável de colunas, referente a esse endereço, receberá imediatamente os dados provenientes do RPI3B de controle. Já se a operação for de leitura o *thread* buscará as variáveis de acordo com o endereço e enviará para o mestre. A alteração das variáveis dos *bumpers*, *keypad* (pedidos internos), sensores ópticos e *push buttons* (pedidos externos) é realizada no módulo de processamento de recursos, conforme já comentado na Seção 4.4, e passada para o módulo de I2C para envio.

Os pedidos internos e os pedidos externos além de terem suas variáveis enviadas para o módulo I2C, também enviam para o módulo de apresentação em tela onde, de acordo com o pedido (vide codificação da Tabela 7), são interpretadas e enviadas.

## 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as rotinas utilizadas como objetivo de verificação e validação das alterações realizadas na maquete de elevadores, na placa eletrônica e no simulador desenvolvido.

### 5.1 Descrição das rotinas de testes da nova placa eletrônica dos elevadores

Conhecidas as principais partes da placa e suas funcionalidades, realizaram-se testes que objetivaram verificar se a placa estava funcionando da maneira esperada.

É importante que se diferencie os testes realizados nessa etapa com os testes realizados na etapa de confecção da placa, em que nestes últimos eles tiveram a intenção de identificação de curtos e circuitos abertos, em outras palavras eram testes físicos na placa sem os componentes colocados. Os testes da etapa descrita nesta seção visaram a validação da aplicação da placa como instrumento de interface dos componentes na maquete e o controle dos mesmos.

Antes de iniciar a programação é necessário a identificação dos endereços dos CIs PCF8574A, haja vista que o conhecimento de tais endereços é de fundamental importância para o estabelecimento da comunicação I2C entre eles e o RPi3B. A Figura 25 apresenta a disposição desses CIs na placa e a Tabela 9 identifica os endereços do PCFs e suas respectivas funcionalidades.

#### 5.1.1 Rotina de testes dos LEDs da maquete

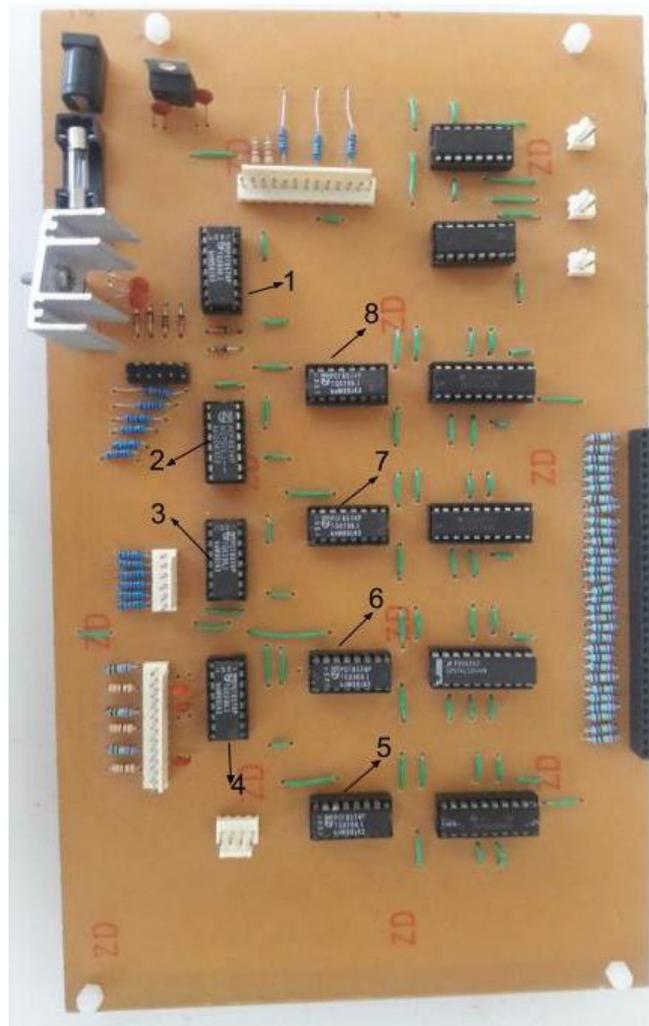
Essa rotina buscou verificar se todos os LEDs da maquete de elevadores estavam funcionando adequadamente, além de observar se houve melhoria na luminosidade dos LEDs após a inserção do *buffer* 74LS244 na placa de interface. Primeiramente, acionou-se um conjunto de oito LEDs de uma vez, de forma a comprovar a comunicação com os PCFs destinados aos LEDs. Em seguida, acionou-se um LED de cada vez, mantendo-o aceso por um

segundo e depois apagando-o.

### 5.1.2 Rotina de testes dos *bumpers* e dos motores dos elevadores

Neste código foram feitas leituras dos *bumpers* para validar suas ações efetivas na maquete, além de verificar as operações dos motores. A Figura 26 é apresentado o fluxograma dessa rotina, a qual consiste em realizar movimentos de descida e subida, tendo os *bumpers* como indicativos para mudança de sentido. Inicialmente, o elevador é acionado no sentido de descida e após encontrar o *bumper* inferior ele permanece um período de dois segundos parado, revertendo o seu sentido e, ao encontrar o *bumper* superior, permanece parado por dois segundos, repetindo o ciclo até que o operador faça a interrupção do teste.

Figura 25 – Mapeamento dos PCFs na placa.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Correspondência entre os PCFs e os endereços.

Endereço referente ao Raspberry	Correspondência na placa eletrônica	Numeração na imagem
0x20	Interface dos <i>push buttons</i> referente às linhas	1
0x21	Interface de LEDs	7
0x22	Interface dos <i>bumpers</i>	3
0x23	Interface de LEDs	5
0x24	Interface dos <i>push buttons</i> referente às colunas	2
0x25	Interface de LEDs	6
0x26	Interface sensor óptico	4
0x27	Interface de LEDs	8

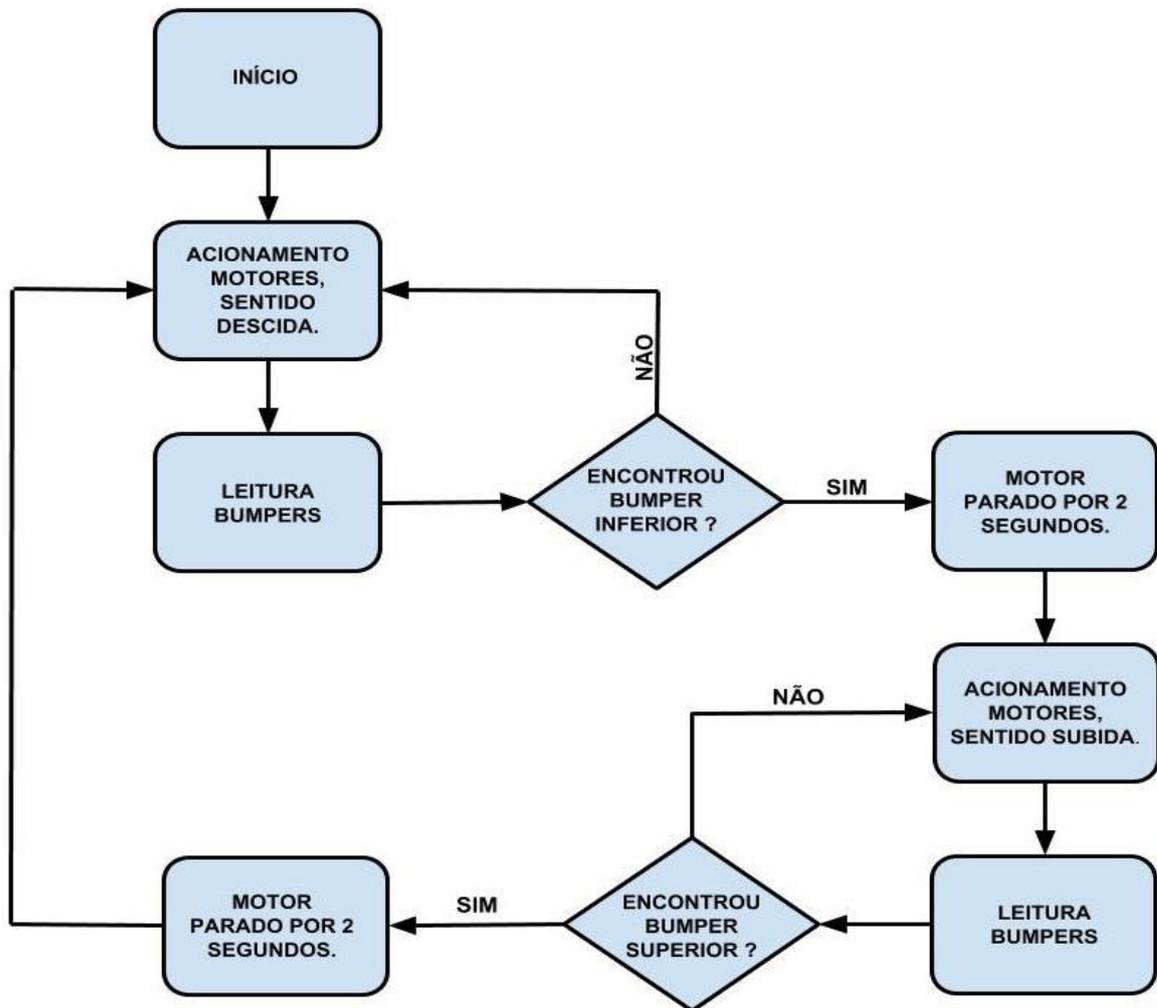
Fonte: Autor.

O teste foi realizado primeiramente em cada elevador individualmente, de forma a verificar se cada conjunto *bumpers*-elevador estava funcionando de maneira adequada. Em seguida, a rotina foi aplicada a dois elevadores simultaneamente e, por fim, ao conjunto das três cabines ao mesmo tempo. Além de comprovar o funcionamento dos *bumpers* e dos motores, verificou-se também o efeito da movimentação dos elevadores na planta física. Percebeu-se uma diminuição considerável na vibração da estrutura da maquete quando os elevadores estavam em funcionamento, onde essa situação é considerada imprescindível para a definição correta dos andares dos elevadores através dos sensores ópticos.

### 5.1.3 Rotina de testes dos sensores ópticos

Foi desenvolvida uma rotina de leitura dos sensores ópticos para a identificação dos andares através de *tags*, estas formadas por faixas intercaladas pretas e brancas, conforme

Figura 26 – Fluxograma da rotina utilizada para testar os *bumpers*.

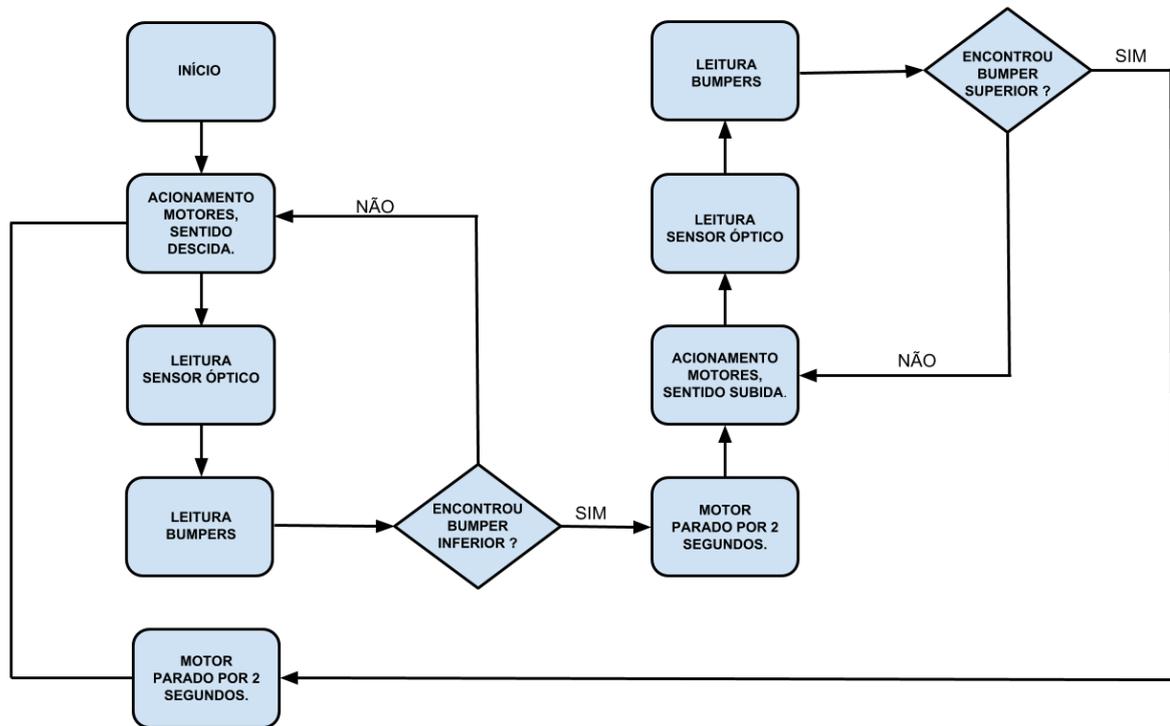


Fonte: Autor.

detalhado na Seção 5.2.3. A rotina consistia basicamente na leitura dos sensores ópticos através do I2C com os movimentos dos elevadores. Através desses valores adquiridos pelos sensores ópticos, foram desenvolvidas funções para identificação da passagem do elevador por um andar. Da mesma forma que na rotina dos *bumpers*, ao encontrar um dos sensores de fim de curso (*bumpers* inferior ou superior), o elevador passava um período parado e, em seguida, mudava seu sentido de acionamento.

A Figura 27 apresenta o fluxograma resumido da rotina desenvolvida. A rotina foi aplicada inicialmente a apenas um elevador, em seguida foram acionados aos pares e aos três simultaneamente. Essa rotina foi fundamental para verificar se as alterações físicas realizadas surtiriam efeito, uma vez que o processo de leitura dos sensores ópticos era o que mais era afetado com a vibração da maquete por conta da movimentação dos elevadores, dificultando a definição dos andares.

Figura 27 – Rotina de testes dos sensores ópticos



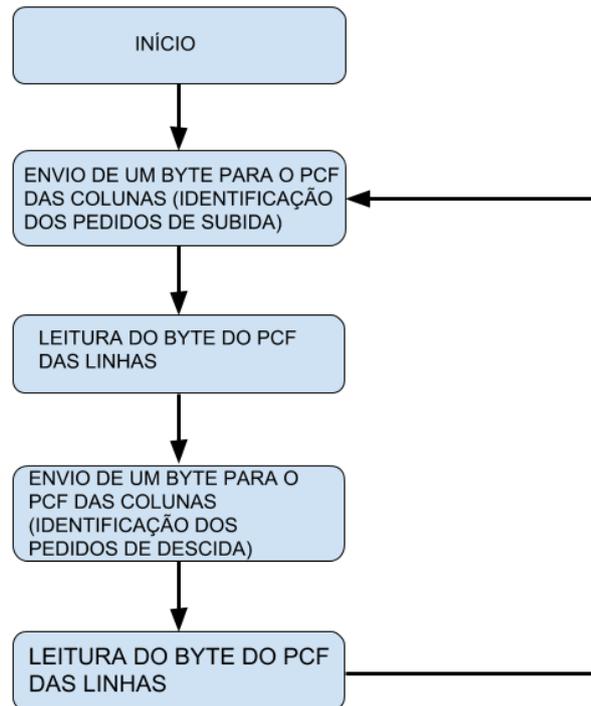
Fonte: Autor.

### 5.1.4 Rotina de testes dos *push buttons*

Essa rotina foi desenvolvida com o intuito de verificar o funcionamento dos botões e consiste no atendimento de um pedido do usuário, devendo a cabine parar exatamente no andar em que foi solicitado o pedido. Em outras palavras, tem-se nessa rotina um controle primitivo do elevador, onde, sem nenhuma regra predefinida, o elevador deverá atender o pedido solicitado. O fluxograma da Figura 28 apresenta de que forma é realizada a interpretação dos pedidos realizados através dos *push buttons*, onde primeiramente envia-se um byte (0xD5) para o PCF8574A das colunas em que se verifica se há pedidos de subida e, por conseguinte, para qual andar se refere. Em seguida, outro byte (0xEA) é enviado, desta vez verificando se há pedidos de descida. Esse processo de varredura na matriz de *push buttons* foi comentada na Seção 3.2.7.

Além de validar o funcionamento dos *push buttons*, essa rotina também verifica se a identificação da passagem do elevador por um andar está conforme desejada. Assim como as

Figura 28 – Fluxograma da rotina utilizada para identificar os pedidos feitos através dos *push buttons*.



Fonte: Autor.

demais rotinas, esta foi aplicada primeiramente a apenas um elevador de cada vez, depois a dois e, por fim, aos três.

## 5.2 Resultados obtidos nos experimentos aplicados à nova placa eletrônica dos elevadores

Nesta seção serão apresentados os resultados tanto qualitativos, quanto quantitativos obtidos com os experimentos aplicados à placa eletrônica e à maquete física.

### 5.2.1 Resultados dos testes dos LEDs da maquete

A rotina que desenvolvida para verificar o estado dos LEDs da maquete foi apresentada na Seção 4.7. Primeiramente, acionou-se um conjunto de oito LEDs de uma vez, de forma a comprovar a comunicação com os PCFs destinados a esses dispositivos. Em seguida, foi comandado um LED de cada vez, mantendo-o aceso por um segundo. Através desse experimento foi possível obter os seguintes resultados:

- a) Todos os LEDs acenderam individualmente quando solicitados, não havendo iluminação deles aos pares. Isso indica que o *hardware* projetado está atendendo de

maneira satisfatória ao planejado e possibilitando o controle individualizado dos LEDs. Além disso, verifica-se que não há necessidade de substituição de LEDs na maquete; e

- b) A luminosidade dos LEDs apresentou-se de maneira satisfatória, onde foi possível distinguir se estavam acesos ou não. É interessante a apresentação desse resultado, pois ele é indicativo de que a intervenção realizada na placa eletrônica, através da inserção do *buffer* 74LS244, apresentou os resultados esperados.

### **5.2.2 Resultados dos testes dos *bumpers* e de acionamento dos motores**

A rotina desenvolvida para os testes dos *bumpers* e acionamento dos motores apresentou resultados considerados excelentes. A análise dessa rotina passa pelo quanto de vibração a movimentação dos elevadores gera em toda a estrutura da maquete. Por conta da impossibilidade de se verificar quantitativamente a intensidade de vibração, este teste foi medido realizando uma comparação qualitativa entre a aplicação da rotina antes e depois das alterações. Verificou-se uma diminuição significativa na vibração da estrutura, seja quando operando apenas um elevador, dois ou os três simultaneamente. Contudo, devido a não uniformidade da maquete, é necessário realizar constantemente o ajuste de seu nível em relação ao plano que se apoia, uma vez que o desnivelamento influencia na movimentação dos elevadores, afetando a forma com que estes se deslocam no conjunto.

Além da verificação da vibração, o teste serviu para comprovar os bons estados funcionais dos *bumpers* e dos motores não exigindo, portanto, a substituição desses componentes.

### **5.2.3 Resultados dos testes de verificação dos sensores ópticos**

A rotina que verifica a leitura dos sensores ópticos, é tido como o principal código das alterações realizadas, considerando que esse sistema foi o mais prejudicado pelas vibrações da maquete ocasionadas pela movimentação dos elevadores. Primeiramente, a rotina verificou durante a operação dos elevadores, se ocorria ou não a leitura dos sensores ópticos, depois elaborou-se uma seção de código de identificação dos andares.

Para aplicação da rotina foi necessário realizar alguns ajustes, como por exemplo, na definição de um valor de PWM para subida e para descida, tal que maximizasse a velocidade constante ao menor nível possível de ruído. O teste foi realizado cem vezes em cada situação apresentada e o valor apresentado na Tabela 10 representa o percentual mínimo de vezes em

Tabela 10 – Percentual mínimo de identificação corretas de todos os andares em movimento de subida e descida.

Testes (% de leitura correta dos 6 andares)	Elevador 1		Elevador 2		Elevador 3	
	Subida	Descida	Subida	Descida	Subida	Descida
<b>Testes individuais</b>	94 %	92%	90%	93%	89%	92%
<b>Testes aos pares</b>	93 %	93 %	92%	90 %	91 %	91 %
<b>Testes dos três elevadores operando</b>	94%	91%	90 %	91%	92%	88%

Fonte: Autor.

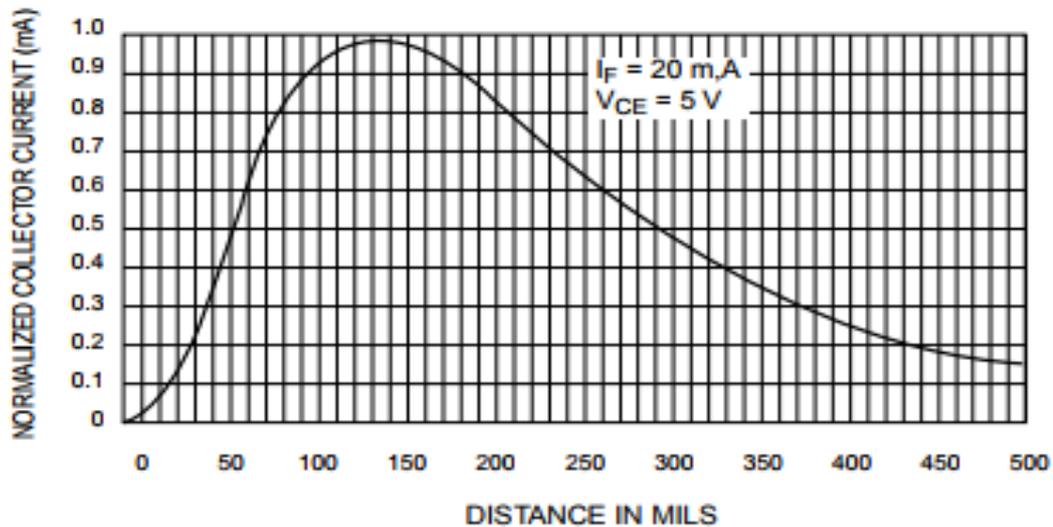
que o elevador no movimento de subida ou descida leu corretamente os seis andares, nas três possibilidades de acionamento.

Com base nos valores mostrados, verificou-se um alto percentual (maior que 90 %) de leitura e identificação dos andares. Esses números obtidos através dos testes com essa rotina justificam os resultados de vibração dos elevadores obtidos no código anterior, ou seja, as alterações na maquete (inserção de guias para movimentação dos contrapesos) apresentaram uma diminuição na vibração da maquete e, como consequência esperada, um maior percentual de leitura e identificação dos andares pelos sensores ópticos. Os erros apresentados nessa etapa podem ser minimizados, ou mesmo evitados, através da aplicação de técnicas de controle que forneça uma estimativa da posição do elevador, ou seja, a definição da localização do elevador passaria a não depender apenas da leitura dos sensores, mas também de um valor estimado de deslocamento da cabine. Além disso, há de se ressaltar a necessidade do constante ajuste dos sensores na maquete já que, devido à baixa distância em relação a faixa branco-preta no fosso do elevador, conforme Figura 29, um deslocamento de milímetros pode significar a não leitura do sensor e, consequentemente, a não identificação do andar.

### 5.3 Descrição das rotinas de testes para validação do simulador

Foram desenvolvidas rotinas de testes que tiveram o objetivo de realizar a validação dos módulos do simulador, comentados no Capítulo 4. É importante ressaltar que todos os módulos

Figura 29 – Relação entre distância e corrente de coletor no sensor óptico.



Fonte: (DATASHEET QRB1134, 2001)

e submódulos foram submetidos a testes, contudo devido à grande quantidade de ensaios desenvolvidos e aplicados, esta seção focará apenas nas rotinas de testes feitos com aos módulos mais críticos do simulador, no caso o I2C e o PWM.

### 5.3.1 Rotinas de testes do módulo I2C

Conforme visto na Seção 4.2.2, o módulo I2C é constituído por cinco submódulos: *Start*, endereçamento, *Ack/Nack*, Envio/Recepção de dados e *Stop*. Cada um deles foi testado individualmente, levantando-se percentualmente o valor da taxa de acerto desses submódulos quando submetidos a sinais provenientes do *Raspberry* de controle. Em todos os testes forma levantados os percentuais de erros individuais de cada submódulo com o RPi3B de controle.

Concluídos os testes individuais, partiu-se para a realização de experimentos com o protocolo I2C completo, ou seja, foi realizada a verificação estatística com a integração de todos os submódulos que compõem o protocolo simulado. A diferença entre os ensaios com parte específica da transação I2C e a completa, foi que no primeiro caso o simulador estava pronto para receber os dados que seriam enviados de forma sincronizada pelo mestre. No caso dos experimentos com o protocolo completo, o simulador sempre detectou a condição *Start* para iniciar a transação com o mestre e a *Stop* para ser informado de sua conclusão.

Foram desenvolvidas rotinas que verificaram a comunicação com o endereço de escravo e o envio de dados para o escravo existentes, além da recepção, por parte do controle, dos dados

provenientes dos endereços de escravos aos quais o mestre queria se comunicar. Não foram inseridos verificação de erros de endereçamento no simulador, ou seja, após o envio do endereço do escravo sempre houve retorno de um sinal *Ack*.

Esses mesmos testes foram realizados tanto com os demais núcleos do simulador desocupados, como totalmente ocupados, visando verificar o rendimento do módulo em questão, quando este estivesse rodando a plena carga computacional.

### **5.3.2 Rotinas de testes do módulo PWM**

Da mesma forma que no módulo I2C, desenvolveram-se testes estatísticos para validação do módulo de PWM. As rotinas de testes buscaram possibilitar o levantamento de dados da leitura do sinal para a determinação dos seus valores de *duty cycle* e frequência.

A rotina fez o envio de sinais PWM pelo controle com valores de *duty cycle* e frequência já determinados. O simulador, por sua vez, leu e interpretou esses sinais, além de definir os respectivos valores de *duty cycle* e frequência. Essa rotina testou diversos valores de ciclo de trabalho, variando desde 5% até próximo de 100%. Investigou-se também o desempenho do simulador para a modulação por largura de pulso em várias frequências do sinal PWM.

Os testes dos sinais PWM foram feitos tanto individualmente quanto ocorrendo os três simultaneamente. Da mesma forma com o que foi feito com o módulo I2C, aplicou-se a rotina de testes com ocupação de apenas um núcleo do simulador, bem como com todos os núcleos ocupados, de maneira a investigar uma condição de pleno processamento.

### **5.3.3 Rotinas de testes do submódulo dos cálculos dos andares do simulador**

Conforme descrito na seção 4.2.3, o módulo de processamento de recursos tem integrado a si um submódulo que é responsável pelo cálculo dos andares dos elevadores do simulador. A determinação da velocidade com que os elevadores se deslocarão será determinado pelo valor de *duty cycle* do PWM aplicado aos pinos do simulador, dessa forma desenvolveu-se uma rotina que consiste basicamente na aplicação de três sinais PWM aos pinos distintos do elevador. Dentre esses sinais, o que apresentar valor de *duty cycle* mais alto fez com que o elevador simulado correspondente a ele se deslocasse mais rápido que os demais. Além de verificar a proporcionalidade do sinal PWM aplicado com a velocidade de deslocamento do elevador, também se fez a interpretação correta dos sinais de descida e subida dos elevadores. A Tabela 11 apresenta os valores de PWM aplicados aos pinos do simulador. Esses valores utilizados

Tabela 11 - Valores de *duty cycle* aplicados ao simulador.

Elevador	Elevador 1	Elevador 2	Elevador 3
<i>Duty Cycle</i>	10 %	20%	30%

Fonte: Autor.

para o sinal PWM se encontram próximos aos valores utilizados no acionamento com a planta física.

#### **5.3.4 Rotinas de identificação dos sensores ópticos e identificação dos andares**

Desenvolveu-se uma rotina para identificação dos sinais provenientes dos sensores ópticos. No simulador, toda transição entre andares é sinalizada pela alteração de uma variável de nível lógico alto para baixo. Dessa forma, a rotina aplica inicialmente sinais nos pinos para que o elevador realize movimento de subida. Concomitantemente à subida do elevador, é consultado periodicamente os sinais provenientes do I2C (escravo responsável pelos sensores ópticos) de forma a averiguar se ocorreu alteração ou não do nível lógico do sensor. Os dados provenientes dos sensores são então processados pelo controle para posterior definição dos andares. O experimento foi aplicado a apenas um dos elevadores do simulador, a dois e aos três elevadores simultaneamente.

#### **5.3.5 Rotina de verificação do funcionamento dos *bumpers***

Foi desenvolvida uma rotina que objetivou verificar o funcionamento dos *bumpers* do simulador. Como regra geral, quando o elevador estivesse no andar zero (térreo) o *bumper* inferior correspondente deveria ser acionado, da mesma forma quando o elevador estivesse no andar 6 o *bumper* superior correspondente deveria ser acionado. O fluxograma da Figura 26 descreve o funcionamento da rotina, a qual foi aplicada tanto à maquete física quanto simulada.

#### **5.3.6 Rotinas de verificação do funcionamento dos *push buttons* e *keypad* do simulador**

Por fim, para validação completa dos recursos disponíveis no simulador, foi implementada um código para verificação dos pedidos internos e externos do simulador, realizados por ação dos usuários. A rotina consiste basicamente na solicitação de um pedido

através do teclado e envio dessa requisição para o controle, por meio do protocolo I2C, onde o mesmo será processado e realizada a sua identificação. Primeiramente, o controle apenas apresentará na tela o andar identificado, de forma a validar tanto o envio/recepção de dados do protocolo I2C, quanto envio do dado correto (andar) entre os RPI3B.

Posteriormente desenvolveu-se uma segunda rotina que consistia basicamente no reconhecimento do andar e o deslocamento do elevador para o andar solicitado. O mesmo código foi utilizado para esse acionamento tanto na planta física quanto simulada, conforme apresentado no fluxograma da Figura 27.

#### 5.4 Resultados obtidos nos experimentos aplicados ao simulador

Nesta seção são apresentados os resultados quantitativos e qualitativos obtidos através das rotinas aplicadas ao simulador.

##### 5.4.1 Resultados das rotinas de testes do módulo I2C

Esses testes podem ser subdivididos em duas etapas: os resultados obtidos através dos ensaios individuais dos módulos e as rotinas de experimentos aplicadas ao I2C com os módulos integrados. Os resultados com os módulos isolados apresentaram resultados satisfatórios, com 100% de eficiência, conforme Tabela 12.

Os resultados revelaram que o desenvolvimento das rotinas que compõem o protocolo I2C podem ser utilizadas para implementação do protocolo, faltando a integração entre esses submódulos. Nesses experimentos foram analisados basicamente dois aspectos: a taxa de acerto

Tabela 12 - Percentual de testes que operaram com sucesso no módulo de I2C.

Módulos/ Testes	Percentual de acerto
Start	100%
Endereçamento	100%
<i>Ack/Nack</i>	100%
Envio/Recepção de dados	100%
Stop	100%

Fonte: Autor.

no envio do endereço e de dados, uma vez que são as duas partes essenciais desse protocolo (Tabela 13). É importante que se note que os endereços em que foram aplicados os testes são os mesmos com os quais o mestre deve comunicar para realizar a troca de dados.

Tabela 13 - Percentual de reconhecimento de endereço e dados pelo simulador.

Casos	Endereço	Dado Enviado	Taxa de Reconhecimento do endereço correto	Taxa de recepção correta dos dados
1	0x20	0xAA	99,40%	99,40%
2	0x21	0x00	97,80%	97,80%
3	0x22	0x01	99,70%	99,70%
4	0x23	0x11	93,70%	93,30%
5	0x24	0x0F	96,80%	96,10%
6	0x25	0x0F	95,20%	95,10%
7	0x26	0xAF	94,90%	94,30%
8	0x27	0xFF	92,20%	90%
Média dos Acertos			96,21%	95,21%

Fonte: Autor.

A média dos acertos no reconhecimento do endereço pelo simulador chegou à taxa de 96,21%, enquanto que a recepção atingiu 95,21%. Esses valores revelam que o protocolo I2C apresenta um alto nível de confiabilidade no envio de dados, podendo, então, ser utilizado como mecanismo de transferência de dados do simulador tal como é utilizado na placa eletrônica de interface física. Prosseguindo com os testes do módulo I2C, foi feito o procedimento de recepção de dados pelo mestre, ou seja, o ensaio onde o mestre sinaliza no protocolo que deseja realizar uma operação de leitura do escravo. Para este caso foram empregados apenas quatro endereços de escravos, os quais se referem exatamente aos 30 *push buttons*, seis *bumpers* e três sensores ópticos da placa, aos quais é realizada a operação de leitura. A Tabela 14 apresenta os resultados adquiridos através dessa rotina.

Tabela 14 - Taxa de recepção correta de dados pelo mestre em modo leitura.

Casos	Endereço	Dado Enviado	Taxa de Recepção Correta de Dados
1	0x20	0xAA	92,20%
2	0x22	0x0F	94,50%
3	0x24	0xFF	95,60%
4	0x26	0X00	96,70%
Média dos Acertos			94,75%

Fonte: Autor.

A média dos acertos na recepção de dados pelo mestre em modo de leitura atingiu o percentual de 94,75% o que possibilita inferir que há também alta confiabilidade do protocolo I2C simulador quando este atua em modo de leitura. Este resultado tem uma significância maior que os resultados apresentados na Tabela 13, haja vista serem requisitadas mais solicitações de leitura no simulador por conta da quantidade de sensores lidos. No caso de dispositivos de escrita que requerem o uso do protocolo I2C não foram simulados, por ser uma ação de informação insignificante.

#### 5.4.2 Resultados das rotinas de testes do módulo de PWM

Essa rotina, como explicitado na Subseção 5.3.2, verifica a leitura e determinação da frequência e do *duty cycle* de operação do sinal PWM aplicado do controle ao simulador. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos através desse experimento, onde são informados os valores dos *duty cycles* e da frequência do PWM aplicado aos pinos e os valores lidos em cada pino simultaneamente. Para os resultados apresentados, considerou-se a frequência do PWM igual a 100 Hz. Além disso, o teste levou em consideração apenas valores de *duty cycle* abaixo de 50%, considerando que a faixa de operação de PWM na maquete física nunca ultrapassou 20%. Valores acima de 50% são inviáveis de se operar na planta física, uma vez que torna o deslocamento dos elevadores muito rápidos.

Os dados apresentados na Tabela 15 validam a técnica de *pulling* (verificação periódica dos pinos) para determinação do *duty-cycle* e frequência do sinal PWM. Verifica-se que a média dos erros apresentados ultrapassa o patamar de 1% apenas na verificação do *duty cycle* do pino

Tabela 15 – Média dos erros percentuais máximos relativos de leitura do PWM.

Duty Cycle Aplicado	Média Percentual dos erros relativos			
	Frequência	Duty Cycle 1	Duty Cycle 2	Duty Cycle 3
5%	0,15%	0,62%	0,82%	1,11%
10%	0,09%	0,34%	0,17%	0,47%
20%	0,11%	0,12%	0,16%	0,18%
30%	0,15%	0,10%	0,06%	0,08%
50%	0,11%	0,04%	0,02%	0,01%

Fonte: Autor.

3 para um ciclo de trabalho aplicado de 5%. Nota-se também que à medida que o ciclo de trabalho aumenta, o erro diminui consideravelmente. Para a faixa de operação da planta física (*duty-cycle* por volta de 15 a 20 %) os valores dos erros apresentados são todos abaixo de 0,35%, o que revela satisfatória precisão na definição dos atributos dos sinais PWM.

### 5.4.3 Resultados das rotinas de testes do submódulo dos cálculos dos andares do simulador

Para essa rotina aplicou-se valores distintos de *duty cycle* aos pinos responsáveis pela coleta dos dados dos sinais PWM do simulador, conforme apresentados na Tabela 9. As Figuras 30 e 31 apresentam os resultados obtidos nesse experimento.

Figura 30 – Valores de PWM lidos e andares calculados logo após iniciar o funcionamento do Simulador.

```

berrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
Every 1.0s: less teste_interface.txt
raspberrypi: Mon Mar 19 13:39:08 2018

Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cicle 1=10.064802    Duty Cicle 2 = 20.036296    Duty Cicle 3=30.026632
Status:LIGADO            Status:LIGADO              Status:LIGADO
Sentido:Subindo          Sentido:Subindo            Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:1       Andar Elevador 2:2         Andar Elevador 3:3
Bumper Superior 1: 0     Bumper Superior 2:0        Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 0     Bumper Inferior 2:0        Bumper Inferior 3 :0
Pedido de Descida = 0    Pedido de Subida = 0        Pedido Interno = 0

```

Fonte: Autor.

Figura 31 – Valores de PWM lidos e andares calculados após determinado período de atuação do simulador.

```

raspberrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
Every 1.0s: less teste_interface.txt
raspberrypi: Mon Mar 19 13:53:03 2018

Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cicle 1=10.064580    Duty Cicle 2 = 20.052609    Duty Cicle 3=40.015077
Status:LIGADO            Status:LIGADO              Status:LIGADO
Sentido:Subindo          Sentido:Subindo            Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:2        Andar Elevador 2:4         Andar Elevador 3:6
Bumper Superior 1: 0     Bumper Superior 2:0        Bumper Superior 3 :1
Bumper Inferior 1: 0     Bumper Inferior 2:0        Bumper Inferior 3 :0
Pedido de Descida = 0    Pedido de Subida = 0       Pedido Interno = 0
  
```

Fonte: Autor.

A Figura 30 apresenta os valores de *duty cycle* lidos, além de apresentar o andar no qual o elevador se encontra logo após o início de funcionamento do simulador. É possível verificar a coerência no cálculo do andar para um dado tempo de captura da tela do simulador, considerando-se que o elevador 1 encontra-se no andar 1, o elevador 2 cujo *duty cycle* é o dobro do andar 1 encontra-se no andar 2 e o elevador com ciclo de trabalho no triplo do andar 1, encontra-se no andar 3. Além disso, pode-se perceber que há proporcionalidade na simulação dos elevadores de acordo com o *duty cycle* aplicado, conforme citado. Já na Figura 31 verifica-se que a proporcionalidade se manteve, haja vista o elevador 1 encontra-se no 2 andar, o elevador 2 encontra-se no 4 e o elevador 3 no 6. Esses dados permitem validar o mecanismo utilizado para cálculo dos andares no simulador.

#### 5.4.4 Resultados das rotinas de testes do submódulo dos sensores ópticos e identificação dos andares

Através da rotina apresentada na Subseção 5.3.4 foi analisada o submódulo dos sensores ópticos utilizados para a identificação dos andares. Este submódulo apresentou êxito em seus resultados, haja vista em todos os casos analisados houve a identificação da passagem entre andares e a identificação desses andares. A Figura 32 apresenta a leitura por parte do controle do andar em que o elevador se encontra.

#### 5.4.5 Resultados das rotinas de verificação do funcionamento dos *bumpers*.

Aplicando a rotina de verificação dos *bumpers* ao simulador verificou-se que em todos os casos ocorreu a detecção correta dos limites máximos e mínimos de atuação dos elevadores. Da mesma forma, analisou-se a recepção de dados pelo mestre que também ocorreu de maneira

Figura 32 – Identificação dos andares do elevador.

```

Every 1.0s: less teste_interface.txt                                raspberrypi: Tue Mar 20 08:33:56 2018

Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cycle 1=17.009651    Duty Cycle 2 = 17.075182    Duty Cycle 3=17.077007
Status:LIGADO             Status:LIGADO               Status:LIGADO
Sentido:Subindo           Sentido:Subindo             Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:3        Andar Elevador 2:2          Andar Elevador 3:2
Bumper Superior 1: 0      Bumper Superior 2:0         Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 0      Bumper Inferior 2:0         Bumper Inferior 3 :0
Pedido de Descida = 0     Pedido de Subida = 0        Pedido Interno = 0

pi@raspberrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
Elevador1 : 3      Elevador2 : 2      Elevador 3 : 2
Elevador1 : 3      Elevador2 : 2      Elevador 3 : 2
Elevador1 : 3      Elevador2 : 2      Elevador 3 : 2
Elevador1 : 3      Elevador2 : 2      Elevador 3 : 2
Elevador1 : 3      Elevador2 : 2      Elevador 3 : 2

```

Fonte: Autor.

satisfatória. As Figuras 33 e 34 apresentam a detecção do *bumpers* superiores e inferiores do simulador e a recepção pelo controle.

Figura 33 – Detecção dos *bumpers* inferiores.

```

Every 1.0s: less teste_interface.txt                                raspberrypi: Tue Mar 20 08:42:53 2018

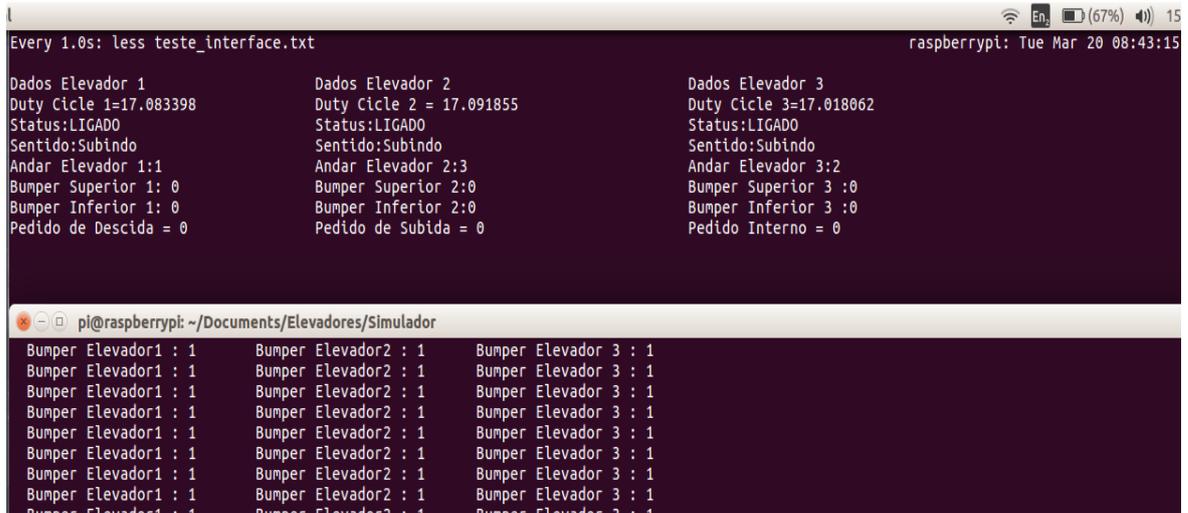
Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cycle 1=8.552297     Duty Cycle 2 = 16.150010    Duty Cycle 3=17.243721
Status:LIGADO             Status:LIGADO               Status:LIGADO
Sentido:Subindo           Sentido:Subindo             Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:0        Andar Elevador 2:0          Andar Elevador 3:0
Bumper Superior 1: 0      Bumper Superior 2:0         Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 1      Bumper Inferior 2:1         Bumper Inferior 3 :1
Pedido de Descida = 0     Pedido de Subida = 0        Pedido Interno = 0

pi@raspberrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0
Bumper Elevador1 : 0      Bumper Elevador2 : 0      Bumper Elevador 3 : 0

```

Fonte: Autor.

A Figura 33 apresenta a detecção dos *bumpers* inferiores do elevador, representados pelo valor 0. Já na figura 34 tem-se que os elevadores mudaram de posições, os *bumpers* não estão mais acionados e o controle recebe o valor, que indica que os *bumpers* não estão acionados.

Figura 34 – Não detecção dos *bumpers* inferiores.

```
Every 1.0s: less teste_interface.txt                                raspberry: Tue Mar 20 08:43:15

Dados Elevador 1          Dados Elevador 2          Dados Elevador 3
Duty Cicle 1=17.083398    Duty Cicle 2 = 17.091855    Duty Cicle 3=17.018062
Status:LIGADO            Status:LIGADO              Status:LIGADO
Sentido:Subindo          Sentido:Subindo            Sentido:Subindo
Andar Elevador 1:1       Andar Elevador 2:3         Andar Elevador 3:2
Bumper Superior 1: 0     Bumper Superior 2:0       Bumper Superior 3 :0
Bumper Inferior 1: 0     Bumper Inferior 2:0       Bumper Inferior 3 :0
Pedido de Descida = 0    Pedido de Subida = 0       Pedido Interno = 0

pi@raspberrypi: ~/Documents/Elevadores/Simulador
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
Bumper Elevador1 : 1     Bumper Elevador2 : 1     Bumper Elevador 3 : 1
```

Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.

As conclusões obtidas devem ser abordadas em duas etapas. A primeira é referente às alterações realizadas na planta física e na placa eletrônica de interface, enquanto a segunda é relativa à implementação do simulador.

No que se diz respeito às alterações realizadas na planta física, que incluem modificações tanto na estrutura mecânica quanto na placa de interface dela com o controle, pode-se afirmar que os resultados se mostraram satisfatórios, onde verificou-se uma atenuação significativa da vibração dos elevadores, fato que era apontado como principal problema de controle dessas cabines na maquete. Além disso, a nova placa de elevadores proporciona uma maior facilidade para inserção dos sinais de controle, por contar com todos os recursos necessários para o desenvolvimento dos mesmos. Há de se ressaltar a necessidade de se realizar manutenção constante na estrutura do elevador e da placa eletrônica e fazer ajustes frequentes nos componentes como sensores ópticos, *bumpers* e instalação da estrutura, uma vez que, por se tratar de um processo mecânico, essa estrutura e os seus componentes estão sujeitos a sofrerem desgastes e folgas com o tempo de operação.

No que se refere à implementação do simulador, o *thread* de leitura de sinais PWM apresentou resultados próximos aos esperados, podendo já ser aplicado ao simulador. Da mesma forma, o *thread* do módulo I2C também mostrou valores ideais quando se analisou os módulos individualmente e valores próximos dos ideais, quando a análise foi aplicada aos módulos integrados. Pode-se inferir que as técnicas utilizadas e desenvolvidas para implementação de ambos os *threads* podem ser utilizadas da mesma forma que é empregada na maquete física. Os demais módulos, processamento de recursos e apresentação em tela, também apresentaram resultados satisfatórios, estatisticamente avaliados, onde foi possível simular os processos que ocorrem na maquete de maneira fidedigna.

Por fim, sugere-se como trabalhos futuros:

- a) O desenvolvimento de técnicas de controle inteligentes para serem aplicados tanto à maquete física, quanto à maquete simulada, de forma a se obter uma plataforma de comparação entre o desempenho da planta física real e a simulado.
- b) Para o simulador propõem-se a implementação de uma interface gráfica para apresentação dos estados do elevador, tornando a visualização mais amigável; e

- c) Ainda com relação ao simulador, fazer a pesquisa de outros sistemas embarcados de baixo custo com desempenho de processamento dos seus módulos igual ou superior ao usado neste trabalho, no caso o RPi3B.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALADEZ, Fabio. **O passado, o presente e o futuro dos simuladores**. Publicação em periódico. FATEC, São Caetano do Sul, SP, Brasil, 2009, 12 p.
- LAUREANO, Marcos. **Máquinas Virtuais e Emuladores**. São Paulo: Novatec Editora, 2006. 184 p.
- MONK, Simon. **Programando o Raspberry Pi: Primeiros Passos com Python**. São Paulo: Novatec, 2013.
- MURA, Alessandro. **What are the differences between simulation and emulation?**. 03 de Outubro de 2017. Disponível em: <https://www.quora.com/What-are-the-differences-between-simulation-and-emulation> Acesso em 2 de junho de 2018.
- N.RUDENKO. **Máquinas de Elevação e Transporte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a, 1976. 426 p.
- Overstreet M. **The use of simulation technology in the education of nursing students**. Nurs Clin North Am. 2008 Dez; 43(4):593-603. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029646508000509> . Acessado em 05 ago.2018.
- RICHARDSON, Matt; WALLACE, Shawn. **Primeiros Passos com o Raspberry Pi**. São Paulo: Novatec, 2013.
- SADIKU, Matthew. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2013. 896 p.
- SANTOS, Agnaldo Bizarria dos. **A interface do elevador na arquitetura. Aspectos projetuais, éticos e sociais**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- SCHITCOSKI, Robertson. **Uma arquitetura modular para sistemas de treinamento militar em operações táticas**. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.
- SHANNON, R. E. **Systems Simulation: The Art and the Science**. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
- SOUSA, B. F. G. S. **Controle de uma maquete com três elevadores usando FPGA**. Monografia do Curso de Engenharia Elétrica, UFMA, 2015, 94p.

TEIXEIRA, Carla Regina. **O Uso De Simulador No Ensino De Avaliação Clínica Em Enfermagem. Scielo.** São Paulo, out. 2011. p. 187-193. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/tce/v20nspe/v20nspea24.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

Yanbin Wang, Wei Zhang & Gavriel Salvendy (2010) **Effects of a Simulation-Based Training Intervention on Novice Drivers' Hazard Handling Performance, Traffic Injury Prevention**, 11:1, 16-24, DOI: [10.1080/15389580903390631](https://doi.org/10.1080/15389580903390631)