



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E**  
**AUTOMAÇÃO - CECAU**



**MÁRIO CÉSAR DELUNARDO TORRES**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DA ELETRÔNICA  
EMBARCADA EM UM DISPOSITIVO ROBÓTICO MÓVEL PARA  
INSPEÇÃO: ESPELEOROBÔ**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2022**

**MÁRIO CÉSAR DELUNARDO TORRES**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DA ELETRÔNICA  
EMBARCADA EM UM DISPOSITIVO ROBÓTICO MÓVEL PARA  
INSPEÇÃO: ESPELEOROBÔ**

**Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.**

Orientador: Prof. Bruno Nazário Coelho, Ph.D.

Coorientador: Jacó Dias Domingues, Eng.

**Ouro Preto  
Escola de Minas – UFOP  
2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T693d Torres, Mário César Delunardo.  
Desenvolvimento e implementação da eletrônica embarcada em um dispositivo robótico móvel para inspeção [manuscrito]: espeleorobô. / Mário César Delunardo Torres. - 2022.  
66 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Bruno Nazário Coelho.

Coorientador: Jacó Dias Domingues.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Robótica - Robótica Móvel. 2. Espeleologia - Espeleorobô. 3. Eletrônica. 4. Sistemas embarcados (Computadores). 5. System Management Bus (SMBus). I. Coelho, Bruno Nazário. II. Domingues, Jacó Dias. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E  
AUTOMACAO



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Mário César Delunardo Torres**

### **Desenvolvimento e implementação da eletrônica embarcada em um dispositivo robótico móvel para inspeção: Espeleorobô**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 21 de junho de 2022

#### Membros da banca

[Doutor] - Bruno Nazário Coelho - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Graduado] - Jacó Dias Domingues - (ITV - Vale)

[Doutor] - Agnaldo José da Rocha Reis - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Mestre] - André Almeida Santos - (ITV - Vale)

Bruno Nazário Coelho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/07/2022, às 22:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0348198** e o código CRC **C64DE35B**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008086/2022-20

SEI nº 0348198

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: 3135591533 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, meu pai José, minha mãe Luzia e minha irmã Ricella por me permitirem chegar até aqui e concluir mais esta etapa na minha vida. À UFOP e todos os professores e colegas que de alguma forma compartilharam uma parte de seu conhecimento. Aos meus orientadores Bruno e Jacó pela paciência e auxílio na elaboração deste trabalho. Por fim agradeço ao ITV pela oportunidade na área de pesquisa e a todos os amigos do laboratório de robótica pelo companheirismo ao longo desses anos. Um forte abraço a vocês e obrigado por transformarem nosso laboratório em uma segunda casa.

## RESUMO

O avanço tecnológico acelerado é responsável pela crescente utilização e desenvolvimento de novas aplicações para dispositivos robóticos. Com o objetivo de auxiliar o trabalho de espeleologia e realizar inspeções em ambientes confinados, a Equipe de Espeleologia da Vale deu início ao projeto Espeleorobô, uma plataforma robótica móvel teleoperada capaz de inspecionar este tipo de ambiente e gerar registros fotográficos para posterior análise, eliminando a exposição humana a situações de risco durante essas atividades. O dispositivo recebeu diversos aprimoramentos e atualizações no Laboratório de Robótica e Controle do Instituto Tecnológico Vale - Ouro Preto/MG (ITV-RoC). O presente trabalho aborda o desenvolvimento e implementação da eletrônica embarcada em versões mais recentes do robô, revisando componentes eletrônicos embarcados, desenvolvimento dos sistemas de telemetria e carregamento das baterias, ligações elétricas e montagem dos componentes no robô, comparando seu desempenho e usabilidade com versões anteriores do dispositivo.

**Palavras-chaves:** Robótica Móvel. Espeleorobô. Eletrônica. Sistemas Embarcados. SMBus.

## ABSTRACT

Accelerated technological advancement is responsible for the growing use and development of new applications for robotic devices. Aiming to assist speleology work and carry out inspections in confined environments, Vale's Speleology Team started the Espeleorobô project, a teleoperated mobile robotic platform capable of inspecting this type of environment and generating photographic records for later analysis, eliminating human exposure to risky situations during these activities. The device has received several improvements and updates in the Robotics and Control Laboratory of the Technological Institute Vale - Ouro Preto/MG (ITV-RoC). The present work addresses the development and implementation of the embedded electronics in more recent versions of the robot, reviewing embedded electronic components, development of the telemetry and battery charging systems, electrical connections, and assembly of components on the robot, comparing its performance and usability with previous versions of the device.

**Key-words:** Mobile Robotics. Espeleorobô. Electronics. Embedded Systems. SMBus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Robôs quadrúpedes. Fonte: ANYBOTICS (2021); ROBOTS (2022c). . . . .	15
Figura 2 – Curiosity. Fonte: NASA (2022). . . . .	15
Figura 3 – Comparação entre as morfologias do RHex (esquerda) e Espeleorobô (direita). Fonte: ROCHA (2018). . . . .	16
Figura 4 – Possíveis modos de locomoção do Espeleorobô. Fonte: AZPÚRUA et al. (2021). . . . .	16
Figura 5 – Espeleorobô em inspeções de campo. Fonte: Acervo ITV. . . . .	17
Figura 6 – Moose UGV (esquerda), Warthog UGV (centro) e Jackal UGV (direita). Fonte: ROBOTICS (2022c). . . . .	19
Figura 7 – Husky UGV em suas versões <i>starter</i> , <i>explorer</i> , <i>explorer pro</i> , <i>mapping</i> e <i>manipulator</i> , respectivamente. Fonte: ROBOTICS (2022d) - Adaptado. . . . .	19
Figura 8 – Taurob Inspector. Fonte: INSPECTION (2022b). . . . .	20
Figura 9 – Plataformas robóticas da SuperDroid Robots. Fonte: ROBOTS (2022d). . . . .	20
Figura 10 – Leo Rover. Fonte: ROVER (2022b). . . . .	20
Figura 11 – Estrutura de <i>hardware</i> do Leo Rover. Fonte: ROVER (2022a). . . . .	21
Figura 12 – Visão geral da construção, componentes embarcados e torre de instrumenta- ção do Espeleorobô. Fonte: BARROS (2021). . . . .	22
Figura 13 – Interface gráfica do Espeleorobô. Fonte: Acervo ITV. . . . .	22
Figura 14 – Diagrama de ligação dos componentes. Fonte: O autor. . . . .	23
Figura 15 – MCD EPOS 60W. Fonte: MAXON (2022). . . . .	24
Figura 16 – Informações sobre o motor. Fonte: MAXON (2016) - Adaptado. . . . .	24
Figura 17 – Adaptador PCAN-USB. Fonte: PEAK-SYSTEM (2022). . . . .	25
Figura 18 – Bateria Bren Tronics BT-70791CG. Fonte: BREN-TRONICS (2022a). . . . .	25
Figura 19 – Conversores Maxi, Mini e Micro. Fonte: CORPORATION (2018) - Adaptado. . . . .	26
Figura 20 – Intel NUC. Fonte: INTEL (2022b). . . . .	27
Figura 21 – <i>Switch</i> NETGEAR GS105Ev2. Fonte: NETGEAR (2022). . . . .	27
Figura 22 – Câmera AXIS P1224-E. Fonte: AXIS (2015). . . . .	28
Figura 23 – Arduino Mega 2560 R3. Fonte: ARDUINO (2022). . . . .	29
Figura 24 – Conjunto de iluminação. Fonte: LEDDYNAMICS (2011); LEDDYNAMICS (2017). . . . .	29
Figura 25 – Ubiquiti Rocket M900. Fonte: UBIQUITI (2018b). . . . .	30
Figura 26 – Antenas. Fonte: ELETRÔNICA (2022a); UBIQUITI (2018a). . . . .	30
Figura 27 – Fathom-X Tether Board (esquerda) e Fathom Spool (direita). Fonte: ROBO- TICS (2022b); ROBOTICS (2022a). . . . .	31
Figura 28 – Relé Crydom D1D40 (esquerda) e Metaltex MAD1NAC2 (direita). Fonte: TECHNOLOGIES (2022); METALTEX (2022). . . . .	32

Figura 29 – Botão de emergência (esquerda) e <i>push button</i> (direita). Fonte: EAO (2021); CONNECTIVITY (2022).	33
Figura 30 – Placa dos motores - frente. Fonte: O autor.	33
Figura 31 – Placa dos motores - verso. Fonte: O autor.	34
Figura 32 – Placa dos conversores - frente. Fonte: O autor.	34
Figura 33 – Placa dos conversores - verso. Fonte: O autor.	35
Figura 34 – Visualização 3D da placa do Arduino Mega. Fonte: O autor.	35
Figura 35 – Visualização 3D placa do Arduino Nano. Fonte: O autor.	36
Figura 36 – Cabo alimentação/SMBus (esquerda) e carregador (direita). Fonte: BREN-TRONICS (2022c); BREN-TRONICS (2022b).	36
Figura 37 – Conectores RJ-45 (esquerda) e conectores de 8 vias (direita). Fonte: O autor.	37
Figura 38 – Conector de emenda (esquerda) e cabos elétricos (direita). Fonte: (WAGO, 2022) e (FIOCAMP, 2022).	37
Figura 39 – <i>Pinout</i> das baterias do robô. Fonte: BREN-TRONICS (2005).	38
Figura 40 – Comunicação entre dispositivos via SMBus. Fonte: FORUM (1998).	38
Figura 41 – Diagrama do circuito de leitura das baterias. Fonte: O autor.	39
Figura 42 – Esquema elétrico do circuito de leitura das baterias. Fonte: O autor.	40
Figura 43 – Diagrama do circuito de acionamento. Fonte: O autor.	40
Figura 44 – Diagrama do circuito de alimentação. Fonte: O autor.	41
Figura 45 – Esquema elétrico do circuito de alimentação. Fonte: O autor.	41
Figura 46 – Circuito sem diodo de roda livre. Fonte: O autor.	42
Figura 47 – Circuito com diodo de roda livre. Fonte: O autor.	42
Figura 48 – Diagrama do circuito de recarga. Fonte: O autor	43
Figura 49 – Esquema elétrico do circuito de recarga. Fonte: O autor	43
Figura 50 – Componentes das placas dos motores. Fonte: O autor.	44
Figura 51 – Cabos da rede CAN. Fonte: O autor.	44
Figura 52 – Placa dos motores finalizada: vista frontal (acima) e vista lateral (abaixo). Fonte: O autor.	45
Figura 53 – Placa dos conversores. Fonte: O autor.	45
Figura 54 – Placa dos conversores finalizada. Fonte: O autor.	46
Figura 55 – Placa do Arduino Nano finalizada. Fonte: O autor.	46
Figura 56 – Placa do Arduino Mega finalizada. Fonte: O autor.	47
Figura 57 – Montagem dos LEDs: Fixação no dissipador térmico. Fonte: O autor.	47
Figura 58 – Resultado final da montagem. Fonte: O autor.	47
Figura 59 – Soldagem do transistor e fixação no <i>driver</i> . Fonte: O autor.	48
Figura 60 – Resultado final do <i>driver</i> dos LEDs. Fonte: O autor.	48
Figura 61 – Montagem dos relés mecânicos. Fonte: O autor.	49
Figura 62 – Resultado final. Fonte: O autor.	49
Figura 63 – Montagem dos circuito de acionamento. Fonte: O autor.	49

Figura 64 – Botão de emergência. Fonte: O autor. . . . .	50
Figura 65 – <i>Push button</i> iluminado. Fonte: O autor. . . . .	50
Figura 66 – Conectores de recarga interno (esquerda) e externo (direita). Fonte: O autor. . . . .	50
Figura 67 – Parte interna da tampa superior do robô. Componentes: (1) conector RJ-45, (2) <i>push button</i> , (3) botão de emergência, (4) e (5) conectores para recarga. Fonte: O autor. . . . .	51
Figura 68 – Vista superior do robô aberto. Componentes: (1) câmera frontal, (2) LEDs frontais, (3) <i>switch ethernet</i> , (4) <i>tether</i> , (5) motores MCD EPOS, (6) Arduino Mega, (7) Intel NUC, (8) LEDs traseiros e (9) câmera traseira. Fonte: O autor. . . . .	52
Figura 69 – Vista inferior do robô aberto. Componentes: (1) e (2) baterias, (3) conversores CC-CC, (4) placas de aquisição de imagens das câmeras, (5) e (6) conjunto de relés. Fonte: O autor. . . . .	53
Figura 70 – Espeleorobô. Fonte: O autor. . . . .	54
Figura 71 – Inspeções em Salobo: 2018 (esquerda) e 2019 (direita). Fonte: TORRE (2019); THIAGO FILHO (2019). . . . .	56
Figura 72 – Experimento de campo na Mina Du Veloso. Fonte: Acerto ITV. . . . .	57
Figura 73 – Inspeção na Mina da Conceição. Fonte: Acerto ITV. . . . .	58
Figura 74 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor. . . . .	65
Figura 75 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor. . . . .	66
Figura 76 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor. . . . .	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do motor MCD EPOS. Fonte: MAXON (2016) - Adaptado. . .	24
Tabela 2 – Características da bateria Bren Tronics BT-70791CG. Fonte: BREN-TRONICS (2022a) - Adaptado. . . . .	26
Tabela 3 – Características dos conversores CC-CC da Vicor. Fonte: CORPORATION (2018) - Adaptado. . . . .	26
Tabela 4 – Características da Intel NUC10i5FNKPA. Fonte: INTEL (2022a) - Adaptado.	27
Tabela 5 – Características do <i>switch</i> NETGEAR GS105Ev2. Fonte: NETGEAR (2021) - Adaptado. . . . .	27
Tabela 6 – Características da câmera AXIS P1224-E. Fonte: AXIS (2015) - Adaptado. . .	28
Tabela 7 – Características do Arduino Mega. Fonte: ARDUINO (2022) - Adaptado. . . .	29
Tabela 8 – Características do LED e do <i>driver</i> . Fonte: LEDDYNAMICS (2011); LEDDYNAMICS (2017) - Adaptado. . . . .	30
Tabela 9 – Características do radio e antenas. Fonte: ELETRÔNICA (2022b); UBIQUITI (2018a) - Adaptado. . . . .	31
Tabela 10 – Características do <i>tether</i> e cabo. Fonte: ROBOTICS (2022b); ROBOTICS (2022a) - Adaptado. . . . .	31
Tabela 11 – Estados do robô. Fonte: O autor. . . . .	32
Tabela 12 – Padrão de cores. Fonte: O autor. . . . .	37
Tabela 13 – Parâmetros que podem ser lidos via SMBus. Fonte: FORUM (1998) - Adaptado.	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ITV-RoC	Laboratório de Robótica e Controle do Instituto Tecnológico Vale
MG	Minas Gerais
ITV	Instituto Tecnológico Vale
ROS	Robot Operating System
IP	Índice de proteção
LIDAR	Light Detection and Ranging
IMU	Inertial Measurement Unit
GPS	Global Positioning System
PTZ	Pan-tilt-zoom
CC-CC	Corrente contínua para corrente contínua
LED	Light-Emitting Diode
CAN	Controller Area Network
USB	Universal Serial Bus
SMBus	System Management Bus
VLAN	Virtual Local Area Network
QoS	Quality of Service
PoE	Power over Ethernet
PWM	Pulse Width Modulation
CCT	Temperatura de Cor Correlata
IRC	Índice de Reprodução de Cor
PCB	Printed Circuit Board
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
RC	Resistor-capacitor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

## LISTA DE SÍMBOLOS

V	volt
W	watt
mNm	milinewton-metro
A	Ampere
g	grama
Ah	Ampere-hora
Wh	watt-hora
°C	Celsius
Kg	quilograma
mm	milímetro
°	grau
lx	lux
MHz	megahertz
K	Kelvin
lm	lumen
mA	miliampere
dBi	decibel
Mbps	megabit por segundo
m	metro

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivos gerais e específicos	17
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	17
1.2	Estrutura do trabalho	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA</b>	<b>19</b>
2.1	Plataformas robóticas móveis de inspeção	19
2.2	O Espeleorobô	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1	Descrição do <i>hardware</i> embarcado	24
3.1.1	<i>Motores</i>	24
3.1.2	<i>Baterias</i>	25
3.1.3	<i>Conversores CC-CC</i>	26
3.1.4	<i>Intel NUC</i>	27
3.1.5	<i>Switch Ethernet</i>	27
3.1.6	<i>Câmeras frontal e traseira</i>	28
3.1.7	<i>Arduino Mega</i>	28
3.1.8	<i>Sistema de iluminação</i>	29
3.1.9	<i>Comunicação sem fio</i>	30
3.1.10	<i>Comunicação via cabo</i>	31
3.1.11	<i>Acionamentos elétricos</i>	31
3.1.11.1	Relés	32
3.1.11.2	Botões	32
3.1.12	<i>Placas de circuito impresso</i>	33
3.1.12.1	Placa dos motores	33
3.1.12.2	Placa dos conversores	34
3.1.12.3	Placas do Arduino Mega e Arduino Nano	35
3.1.13	<i>Cabos, conectores e componentes especiais</i>	36
3.2	Desenvolvimento da telemetria e recarga das baterias	37
3.2.1	<i>Telemetria das baterias</i>	38
3.2.2	<i>Circuito de acionamento - alimentação (on/off) e recarga</i>	40
3.2.2.1	Circuito de alimentação	40
3.2.2.2	Circuito de recarga	41
<b>4</b>	<b>MONTAGEM</b>	<b>44</b>

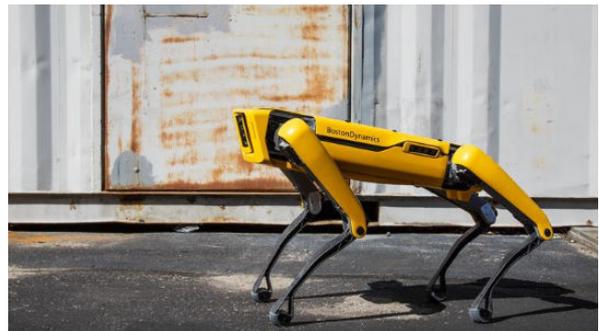
4.1	Preparo dos componentes . . . . .	44
4.1.1	<i>Soldagem das PCBs</i> . . . . .	44
4.1.1.1	Placa dos motores . . . . .	44
4.1.1.2	Placa dos conversores . . . . .	45
4.1.1.3	Placas dos Arduinos . . . . .	46
4.1.2	<i>Sistema de iluminação</i> . . . . .	47
4.1.3	<i>Sistema de acionamento</i> . . . . .	48
4.1.4	<i>Cabos e conectores diversos</i> . . . . .	50
4.2	Inserção da eletrônica no robô . . . . .	51
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>55</b>
5.1	Inspeções da tubulação de rejeitos da usina de Salobo . . . . .	55
5.2	Experimento de campo na Mina Du Veloso . . . . .	56
5.3	Inspeção de galeria na Mina da Conceição . . . . .	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>59</b>
6.1	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	59
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DO ESPELEOROBÔ</b> . . . . .	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS SMBUS</b> . . . . .	<b>68</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, é notável a popularização e crescente utilização de dispositivos robóticos. Com o avanço tecnológico acelerado e um custo de implementação cada vez menor, é possível encontrar aplicações nas mais diversas áreas, desde a automação em indústrias até sua utilização na medicina. Especificamente quanto aos robôs móveis, seja de maneira completamente autônoma ou mesmo tele-operada, há uma vasta utilização com o objetivo de realizar inspeções de ambientes industriais para detecção de gases e vazamentos, vigilância pública ou mesmo criação de mapas tridimensionais como os robôs quadrúpedes ANYmal (Figura 1a) e Spot (Figura 1b) (GEHRING et al., 2021; WETZEL et al., 2022). Robôs móveis com outros meios de locomoção também estão sendo empregados para explorar ambientes desconhecidos, perigosos ou de difícil acesso, como é o caso das explorações oceânicas, geológicas ou mesmo em Marte (ROBOTS, 2022a)(Figura 2).



(a) ANYmal.



(b) Spot.

Figura 1 – Robôs quadrúpedes. Fonte: ANYBOTICS (2021); ROBOTS (2022c).



Figura 2 – Curiosity. Fonte: NASA (2022).

Com o objetivo de auxiliar o trabalho de espeleologia, a Equipe de Espeleologia da Vale deu início ao projeto Espeleorobô, adquirindo uma plataforma robótica móvel tele-operada capaz de se locomover em terrenos acidentados e realizar a inspeção de cavidades e ambientes confinados. Sua morfologia é baseada no robô RHex da Boston Dynamics (Figura 3), desen-

volvido para locomoção em terrenos acidentados ou com presença de areia, lama, pedras e até mesmo neve (ROBOTS, 2022b). Entretanto, este primeiro protótipo adquirido pela equipe apresentava problemas na sua operação além de defasagem tecnológica. Por conta disso, o dispositivo foi enviado ao Laboratório de Robótica e Controle do Instituto Tecnológico Vale - Ouro Preto/MG (ITV-RoC) para aprimoramentos. No Instituto Tecnológico Vale (ITV) foram realizadas melhorias mecânicas, eletrônicas e de *software*.



Figura 3 – Comparação entre as morfologías do RHex (esquerda) e Espeleorobô (direita). Fonte: ROCHA (2018).

Para melhor adequação do robô a terrenos de difícil transposição foi desenvolvido um sistema intercambiável de engate rápido para alteração entre modos de locomoção, sem a necessidade de ferramental adicional. Isso possibilita a fácil utilização de rodas comuns (com ou sem pneus), pernas, rodas do tipo estrala e esteiras, sendo possível até mesmo combinações mistas para apropriada adequação do robô a diferentes cenários de inspeção (Figura 4). Como discutido por COTA (2017) e THIAGO FILHO (2019), boa parte da eletrônica embarcada foi substituída ou revisada e a estrutura de *software* foi retrabalhada para integração com *Robot Operating System* (ROS).

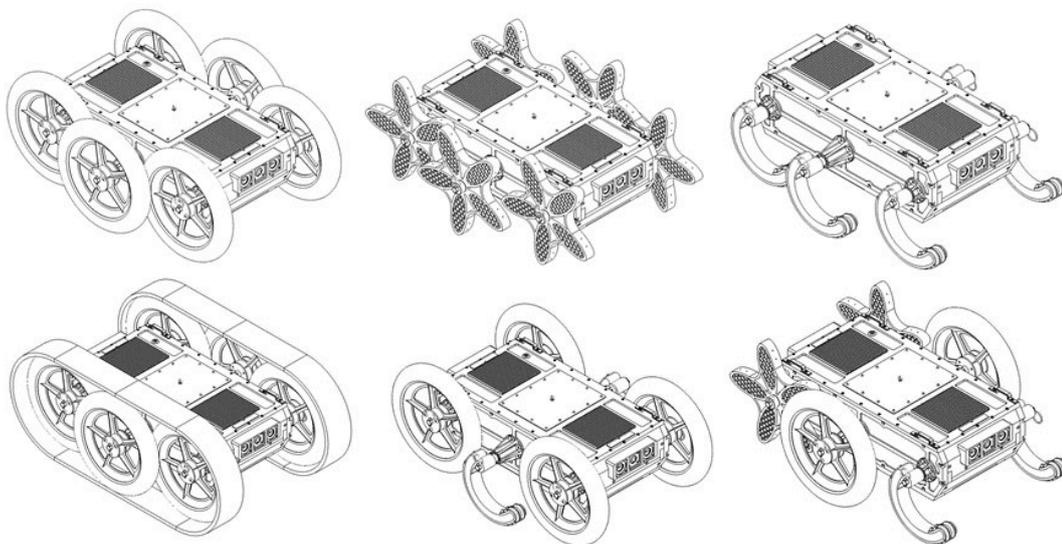


Figura 4 – Possíveis modos de locomoção do Espeleorobô. Fonte: AZPÚRUA et al. (2021).

Após as transformações realizadas e com o uso do robô em inspeções de cavernas naturais, foi percebido que a aplicação do mesmo poderia ser estendida a inspeção de outros ambientes que também apresentem riscos aos operadores, como dutos, tubulações e galerias de barragem. Observando essa necessidade o ITV deu início a uma nova revisão do projeto trazendo novos aprimoramentos ao Espeleorobô.

A construção de seu corpo metálico passou a ser composta de peças usinadas em alumínio para maior resistência mecânica e o robô conta agora com índice de proteção IP67, sendo totalmente vedado e à prova de poeira e submersões temporárias em água com profundidade de até 1 metro por 30 minutos. A eletrônica embarcada também sofreu alterações e melhorias como substituição das câmeras e iluminação por componentes de melhor qualidade e teleoperação com comunicação via cabo além de aprimoramentos das ligações elétricas e disposição dos componentes na parte interna do robô. Houve também a implementação de sistemas para telemetria e recarga das baterias visando respectivamente previsibilidade quanto a autonomia e melhorar a usabilidade do robô (Figura 5).



Figura 5 – Espeleorobô em inspeções de campo. Fonte: Acervo ITV.

Feitas estas considerações, o presente trabalho discorre sobre a concepção e montagem de toda a eletrônica embarcada nesta versão mais recente do Espeleorobô, revisando características dos componentes eletrônicos, elaboração dos circuitos elétricos e inserção e ligação elétrica desses itens. Além disso o trabalho busca comparar e analisar suas melhorias e usabilidade em relação a versão anterior do robô.

## 1.1 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e implementação da eletrônica embarcada nas versões mais recentes do Espeleorobô e avaliar o impacto dessas alterações em relação a versão anterior do robô.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica de plataformas robóticas móveis utilizadas para inspeção, seus equipamentos embarcados, características e arquitetura de *hardware*;

- Revisão e descrição do *hardware* embarcado no Espeleorobô;
- Desenvolvimento de circuitos para acionamento elétrico do robô, telemetria e recarga das baterias.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da maneira como se segue. O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema desenvolvido, apresentando aplicações de robôs móveis e breve descrição de versões anteriores do Espeleorobô. O Capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica de plataformas robóticas móveis utilizadas para inspeção e arquitetura geral de *hardware* do Espeleorobô, exemplificando as principais bases teóricas adotadas neste trabalho para a realização das atividades de descrição e desenvolvimento do *hardware* embarcado, no Capítulo 3, e montagem desta eletrônica, no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e comparações com versões anteriores do robô. Por fim, o Capítulo 6 é dedicado às considerações finais e a propostas para futuras melhorias.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Para melhor fundamentação teórica são apresentadas nesta seção plataformas robóticas móveis de inspeção e busca-se revisar suas construções, capacidades e equipamentos embarcados. Além disso é apresentada uma visão geral da arquitetura e componentes eletrônicos do Espeleorobô.

### 2.1 Plataformas robóticas móveis de inspeção

A Clearpath Robotics desenvolve plataformas robóticas customizáveis para inspeção. A linha UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) de robôs para atuação em áreas externas conta com grande variedade de plataformas robóticas que podem ser equipadas com sensores LIDAR (*Light Detection and Ranging*), IMU (*Inertial Measurement Unit*), GPS *Global Positioning System*, câmeras estéreo e manipuladores robóticos de acordo com a necessidade de cada aplicação.

Os dispositivos Moose UGV, Warthog UGV, Jackal UGV (Figura 6) se diferem principalmente por suas dimensões, capacidade de carga e autonomia de bateria para operação. Todos possuem interface para comunicação e controle, odometria das rodas, telemetria das baterias, integração com ROS e proteção que varia entre IP44 a IP67 de acordo com o modelo.



Figura 6 – Moose UGV (esquerda), Warthog UGV (centro) e Jackal UGV (direita). Fonte: [ROBOTICS \(2022c\)](#).

O Husky UGV (Figura 7) pode ser adquirido em versões já equipadas com sensores adicionais e manipulador robótico, mantendo as mesmas características construtivas de seus irmãos maiores.



Figura 7 – Husky UGV em suas versões *starter*, *explorer*, *explorer pro*, *mapping* e *manipulator*, respectivamente. Fonte: [ROBOTICS \(2022d\)](#) - Adaptado.

O Taurob Inspector (Figura 8) é um robô construído para realizar inspeções em ambientes industriais severos ou com condições adversas que podem trazer risco a saúde humana (INSPECTION, 2022a). Este dispositivo é capaz de realizar leitura de indicadores e válvulas, detectar vazamentos de gases, criar mapas tridimensionais e auxiliar em situações de emergência. O robô conta ainda com conectividade 4G e Wi-Fi, proteção IP67, navegação autônoma e é apto a se locomover em terrenos arenosos ou lamacentos e subir escadas.



Figura 8 – Taurob Inspector. Fonte: INSPECTION (2022b).

Há também plataformas robóticas de construção menos robusta mas que também realizam inspeções em ambientes externos ou confinados, como tubulações, dutos ou locais de difícil acesso. A SuperDroid Robots oferece diversos dispositivos já equipados com câmeras PTZ (*pan-tilt-zoom*), opção de comunicação com ou sem fio e índice de proteção IP67 a depender do modelo, podendo ser complementado com adição de IMU, comunicação por fibra óptica e odometria das rodas para navegação autônoma (Figura 9).



Figura 9 – Plataformas robóticas da SuperDroid Robots. Fonte: ROBOTS (2022d).

Outro exemplo é o Leo Rover (Figura 10), plataforma robótica de código aberto que possui integração com ROS, construção à prova d'água, transmissão de imagens e controle da movimentação do robô via *interface web*.



Figura 10 – Leo Rover. Fonte: ROVER (2022b).

Como na maioria das plataformas robóticas, o sistema embarcado é composto de motores para locomoção, controladores para acionamento dos motores, computador de bordo que gerencia demais periféricos e sensores como câmeras, comunicação *wireless* ou demais dispositivos. O sistema conta também com bateria e conversores CC-CC (corrente contínua para corrente contínua) para fornecimento de energia com níveis de tensão elétrica adequados (Figura 11).

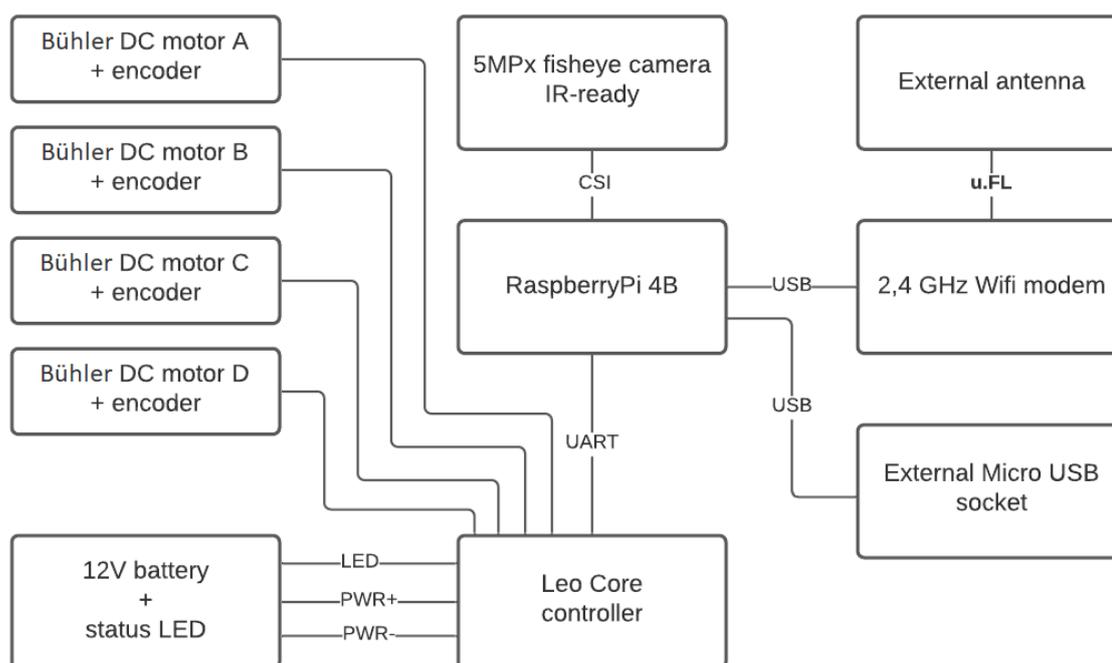


Figura 11 – Estrutura de *hardware* do Leo Rover. Fonte: ROVER (2022a).

## 2.2 O Espeleorobô

Como descrito na seção 1, o Espeleorobô passou por diversas revisões e melhorias em suas partes mecânicas, eletrônica embarcada e *software*. O dispositivo é atualmente equipado em versões com 6 ou 4 conjuntos motores MCD EPOS (motor, redução planetária e controladora), computador de bordo Intel NUC, *switch ethernet*, LEDs (Light-Emitting Diode) de alta intensidade e câmeras grande angular nas partes frontal e traseira. A comunicação com o robô durante tele-operações pode ser realizada de maneira sem fio através do rádio Ubiquiti Rocket M900 em conjunto com antenas ASA-900CI ou de forma cabeada via Fathom-X Tether, permitindo comunicação de até 300 metros. O robô conta ainda com 2 baterias de padrão militar da Bren-Tronics, Arduino Mega para controle de brilho da iluminação e leitura de informações das baterias e conversores CC-CC da Vicor.

É possível também a adição de novos sensores e componentes na sua torre de instrumentação que pode ser instalada na parte superior do robô, adequando o dispositivo às necessidades de cada tipo de inspeção. A Figura 12 apresenta uma visão geral dos componentes embarcados no robô e uma configuração de sensores comumente utilizada para criação de mapas tridimensionais.

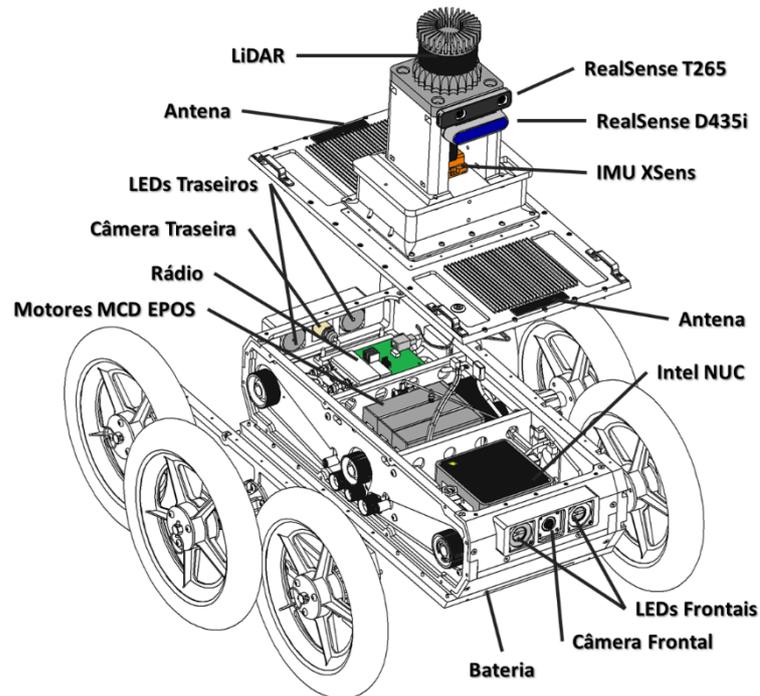


Figura 12 – Visão geral da construção, componentes embarcados e torre de instrumentação do Espeleorobô. Fonte: BARROS (2021).

A tele-operação do robô é realizada através de sua interface gráfica (Figura 13), onde são exibidas informações do estado de cada um dos motores e das baterias, controle de intensidade da iluminação e imagens das câmeras de inspeção frontal e traseira. Os comandos de movimentação são feitos com o uso de um *joystick* e a integração de todo o *hardware* do dispositivo é realizada através do ROS.

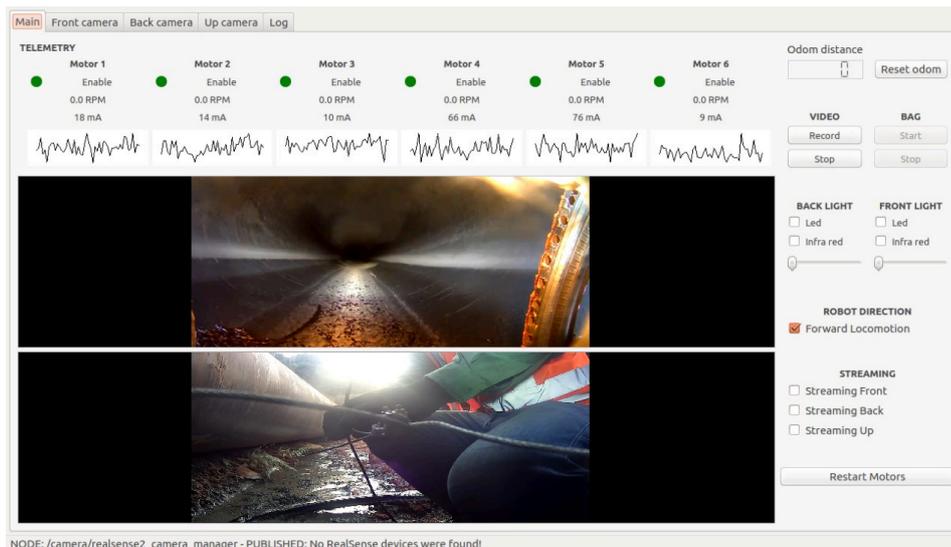


Figura 13 – Interface gráfica do Espeleorobô. Fonte: Acervo ITV.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos inicialmente os componentes eletrônicos presentes no Espeleorobô, revisando suas características e utilidade no dispositivo robótico. Posteriormente é mostrado o desenvolvimento de circuitos específicos referentes a telemetria e recarga das baterias. A Figura 14 representa de forma geral a ligação elétrica entre os componentes eletrônicos embarcados no robô. O esquema elétrico detalhado contendo a ligação desses componentes pode ser observado no Apêndice A.

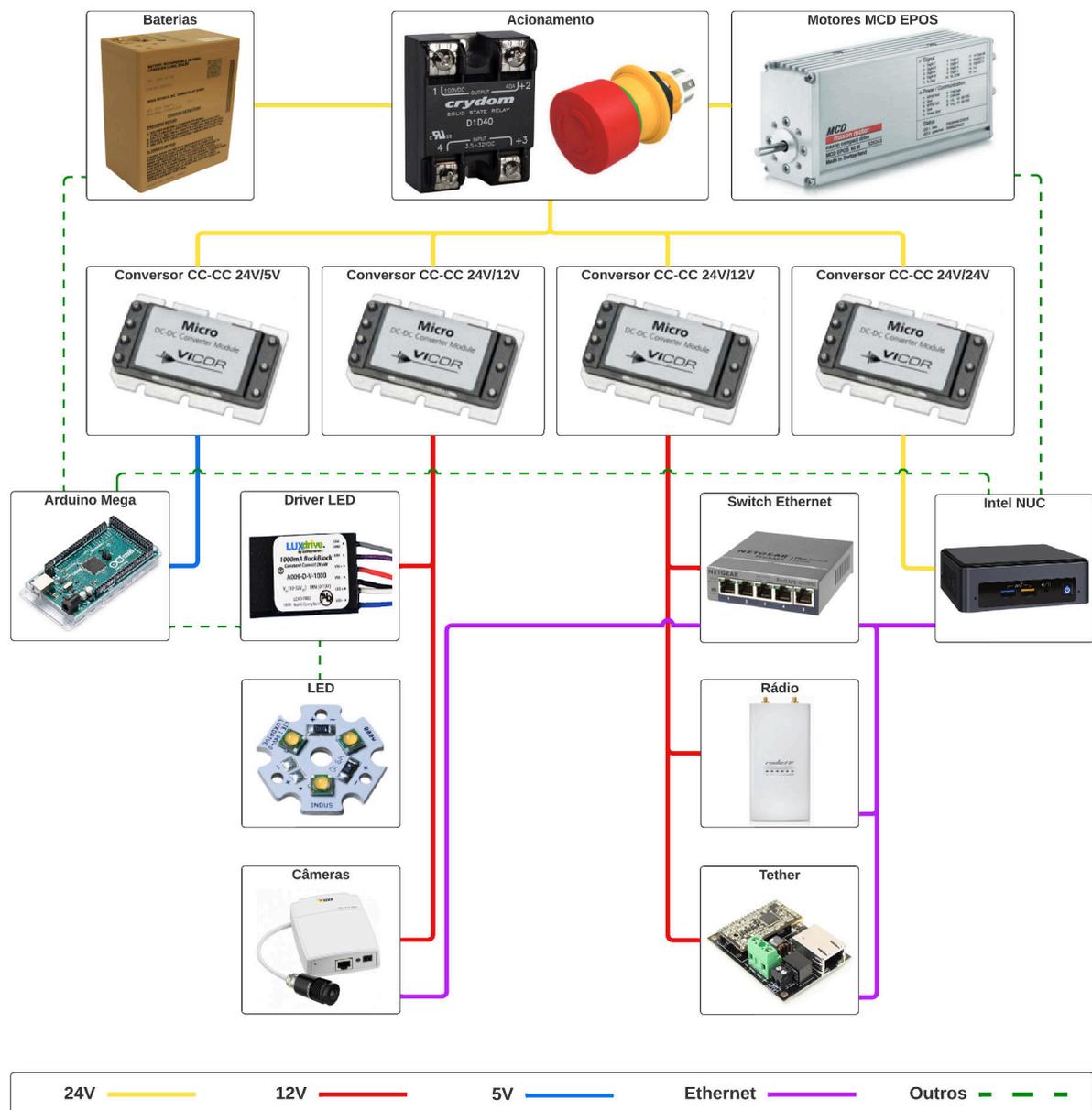


Figura 14 – Diagrama de ligação dos componentes. Fonte: O autor.

### 3.1 Descrição do *hardware* embarcado

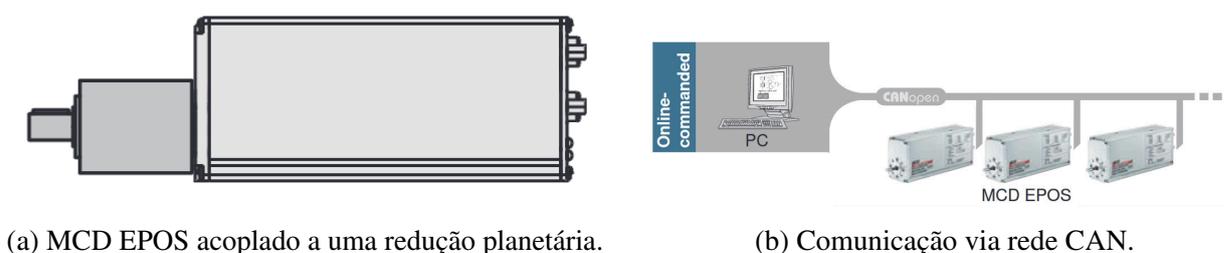
#### 3.1.1 Motores

A linha de produtos *maxom compact drivers* apresenta motores já integrados com sensores e controladores embarcados em um único dispositivo. A construção dos MCD EPOS (Figura 15) se dá pela combinação de motor sem escova eletronicamente comutado, *encoder* digital para leitura precisa de rotações e controlador de posição (MAXON, 2016).



Figura 15 – MCD EPOS 60W. Fonte: MAXON (2022).

Algumas características importantes desses motores são os já embarcados controles de corrente, velocidade e posição de alta precisão, elevado torque com o uso de reduções planetárias (Figura 16a) e integração com o protocolo de comunicação *Controller Area Network* (CAN), possibilitando fácil integração entre múltiplos dispositivos em uma rede (Figura 16b).



(a) MCD EPOS acoplado a uma redução planetária.

(b) Comunicação via rede CAN.

Figura 16 – Informações sobre o motor. Fonte: MAXON (2016) - Adaptado.

Para a comunicação entre os motores e o computador de bordo é utilizado um adaptador PCAN-USB (Figura 17) que realiza a conversão do protocolo CAN para o USB (*Universal Serial Bus*). Demais informações adicionais sobre os motores são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do motor MCD EPOS. Fonte: MAXON (2016) - Adaptado.

<b>Alimentação</b>	12 - 50V
<b>Potência</b>	60W
<b>Torque Nominal</b>	54 mNm
<b>Corrente Contínua</b>	9A
<b>Peso</b>	528g



Figura 17 – Adaptador PCAN-USB. Fonte: [PEAK-SYSTEM \(2022\)](#).

### 3.1.2 Baterias

Por se tratar de um robô móvel é importante que as baterias utilizadas tenham como características peso e volume reduzidos aliados a boa capacidade de carga. Uma vez que o robô realiza muitas inspeções em ambientes acidentados, além da temperatura de operação interna por vezes elevada em virtude da proteção IP67, é preciso também que as baterias apresentem boa robustez e proteção.

A bateria Bren-Tronics BT-70791CG (Figura 18) atende a essas necessidades de projeto, possuindo até mesmo certificação para uso militar. Outros pontos positivos são o fato de ser recarregável, características elétricas compatíveis com os dispositivos embarcados no robô (Tabela 2) e compatibilidade com SMBus (*System Management Bus*).



Figura 18 – Bateria Bren Tronics BT-70791CG. Fonte: [BREN-TRONICS \(2022a\)](#).

Para a montagem do Espeleorobô são utilizadas 2 baterias em paralelo em modo 24V cada uma, fornecendo aproximadamente 20Ah e 588Wh disponíveis para que o robô tenha autonomia suficiente nas inspeções. Em conjunto, a telemetria e leitura de informações do estado das baterias é realizado através de um Arduino Mega via SMBus.

Tabela 2 – Características da bateria Bren Tronics BT-70791CG. Fonte: [BREN-TRONICS \(2022a\)](#) - Adaptado.

<b>Tensão</b>	28,8V, duas células de 14,4V
<b>Tensão Máxima</b>	33,0V, duas células de 16,5V
<b>Capacidade</b>	Modo 24V: 9,9Ah; Modo 12V: 19,8Ah; 294Wh
<b>Temperatura de Operação</b>	-20°C a +60°C
<b>Peso</b>	1,4Kg

### 3.1.3 Conversores CC-CC

Para o fornecimento de energia adequado é preciso que a tensão de alimentação vinda das baterias seja regulada e filtrada para níveis de tensão adequados a cada um dos dispositivos presente no robô, evitando danos causados por sobretensão ou subtensão e mau funcionamento devido a ruídos elétricos.

Os conversores CC-CC da Vicor, especificamente da família Maxi, Mini e Micro (Figura 19), apresentam ampla variedade de produtos que atendem a diversos valores de tensões de entrada e saída e potência máxima (Tabela 3). Além disso possuem alta eficiência energética, isolamento elétrico entre os terminais de entrada e saída, dissipador de calor, controle lógico e proteções contra flutuações nas tensões de entrada e saída e temperatura elevada ([CORPORATION, 2022](#)).



Figura 19 – Conversores Maxi, Mini e Micro. Fonte: [CORPORATION \(2018\)](#) - Adaptado.

Tabela 3 – Características dos conversores CC-CC da Vicor. Fonte: [CORPORATION \(2018\)](#) - Adaptado.

<b>Tensão de entrada</b>	9,0 - 425,0V
<b>Tensão de saída</b>	2,0 - 54,0V
<b>Potência</b>	50 - 600W
<b>Temperatura máxima de operação</b>	100°C (carga máxima)

São empregados no Espeleorobô dois conversores 24V/12V (V24C12C150BL), um conversor 24V/24V (V24C24C100BL) e um conversor 24V/5V (V24C5C50BL) para a alimentação do sistema de iluminação, câmeras, *switch ethernet*, rádio, *tether*, computador de bordo e demais periféricos.

### 3.1.4 Intel NUC

A Intel NUC é uma linha de produtos que aliam tamanho reduzido e grande capacidade de processamento juntamente com conectividades e a praticidade de uso de um computador convencional. O Espeleorobô utiliza uma NUC10i5FNKPA (Figura 20) embarcada com o sistema operacional Ubuntu 18.04 e ROS Melodic para controle do *hardware* do robô. Algumas características desse dispositivo podem ser observadas na Tabela 4.



Figura 20 – Intel NUC. Fonte: [INTEL \(2022b\)](#).

Tabela 4 – Características da Intel NUC10i5FNKPA. Fonte: [INTEL \(2022a\)](#) - Adaptado.

<b>Processador</b>	Intel Core i7-8559U
<b>Armazenamento</b>	256GB NVMe SSD
<b>Memória</b>	2x 4GB DDR4-2666
<b>Alimentação</b>	19-24V
<b>Dimensões</b>	117x112x38 mm

### 3.1.5 Switch Ethernet

O *switch* é responsável pela comunicação entre o computador de bordo e as câmeras, rádio e *tether*. O modelo NETGEAR GS105Ev2 (Figura 21) embarcado no robô possibilita a comunicação entre 5 portas Gigabit de alta velocidade e diversas configurações da rede como *Virtual Local Area Network (VLAN)*, *Quality of Service (QoS)*, e *Port Mirroring* ([NETGEAR, 2021](#)). Algumas outras informações sobre são mostradas na Tabela 5.



Figura 21 – Switch NETGEAR GS105Ev2. Fonte: [NETGEAR \(2022\)](#).

Tabela 5 – Características do *switch* NETGEAR GS105Ev2. Fonte: [NETGEAR \(2021\)](#) - Adaptado.

<b>Largura de banda</b>	10 Gbps
<b>Alimentação</b>	12,0V
<b>Dimensões</b>	94x100x27mm

### 3.1.6 Câmeras frontal e traseira

A AXIS P1224-E (Figura 22) é uma câmera grande-angular de tamanho reduzido que possibilita transmissões com imagens de alta definição (AXIS, 2022). Graças a sua placa de captura, a transmissão de dados e imagens pode ser feita via protocolo *ethernet*, facilitando sua utilização e eventuais configurações do dispositivo. Além disso a câmera conta com proteção índice IP66 e compatibilidade com a tecnologia *Power over Ethernet* (PoE). Demais características podem ser observadas na Tabela 6. São utilizadas no robô duas câmeras, frontal e traseira, para a teleoperação.



Figura 22 – Câmera AXIS P1224-E. Fonte: [AXIS \(2015\)](#).

Tabela 6 – Características da câmera AXIS P1224-E. Fonte: [AXIS \(2015\)](#) - Adaptado.

<b>Resolução</b>	HDTV 720p: 1280x720
<b>Campo de visão horizontal</b>	145°
<b>Sensibilidade à luz</b>	1,8 - 10000 lx
<b>Alimentação</b>	8,0 - 28,0V

### 3.1.7 Arduino Mega

O Arduino Mega 2560 (Figura 23) é uma placa para desenvolvimento e prototipagens que possui *hardware* e *software* completamente abertos. Sua implementação é baseada no microcontrolador ATmega2560 e como mostra a Tabela 7, conta com um número considerável de entradas e saídas analógicas e digitais, portas para comunicação serial e boa capacidade de processamento.

No Espeleorobô o Arduino é utilizado para controle da iluminação, alterando-se o brilho dos LEDs por meio de PWMs (*Pulse Width Modulation*) e leitura de informações das baterias através da comunicação SMBus.



Figura 23 – Arduino Mega 2560 R3. Fonte: [ARDUINO \(2022\)](#).

Tabela 7 – Características do Arduino Mega. Fonte: [ARDUINO \(2022\)](#) - Adaptado.

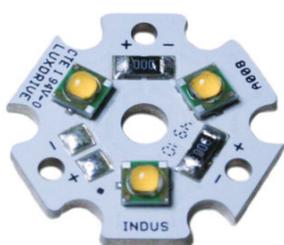
<b>Tensão de entrada</b>	7-12V
<b>Entradas/saídas digitais</b>	54 (sendo 15 saídas PWM)
<b>Entradas analógicas</b>	16
<b>Clock speed</b>	16MHz
<b>Comunicação serial</b>	4 portas

### 3.1.8 Sistema de iluminação

A teleoperação do robô durante as inspeções, muitas das vezes em ambientes completamente escuros ou pouco iluminados, necessita de iluminação auxiliar para melhor captura de imagens pelas câmeras.

O sistema de iluminação é composto por um conjunto de 4 módulos LED INDUS STAR A008 - LIGHT MODULE (Figura 24a) e 2 *drivers* BUCKBLOCK A009 - DC/DC BUCK DRIVER (Figura 24b). Os LEDs possuem bom fluxo luminoso, variadas opções de temperatura de cor (CCT) e elevado índice de reprodução de cor (IRC), o que permite fiel captura de imagens pelas câmeras. Os *drivers* facilitam a dimerização dos LEDs por permitir controle do brilho via PWM através do Arduino Mega embarcado no robô.

Algumas características desses componentes podem ser observadas na Tabela 8. No caso particular do projeto, um *driver* de 2100 mA é responsável por controlar 2 módulos de LED.



(a) LED Indus Star A008.



(b) *Driver* BuckBlock A009.

Figura 24 – Conjunto de iluminação. Fonte: [LEDDYNAMICS \(2011\)](#); [LEDDYNAMICS \(2017\)](#).

Tabela 8 – Características do LED e do *driver*. Fonte: [LEDDYNAMICS \(2011\)](#); [LEDDYNAMICS \(2017\)](#) - Adaptado.

LED Indus Star A008		Driver BuckBlock A009	
Temperatura de cor	3000 - 6500K	Alimentação	10 - 32V
Índice de reprodução de cor	70+ e 80+	Dimerização	0 - 10V
Fluxo luminoso	760lm	Corrente elétrica	1000, 1400 e 2100mA
Temperatura de operação	-40°C a 100°C		

### 3.1.9 Comunicação sem fio

Devido ao tipo de ambiente em que o robô realiza inspeções, em geral espaços confinados e com caminhos tortuosos, é de extrema importância que a comunicação sem fio não seja afetada por obstáculos que por ventura obstruam a visada direta entre a base e o robô. Em virtude da baixa frequência de operação o rádio Ubiquiti Rocket M900 (Figura 25) atende aos requisitos do projeto, além de permitir comunicação em dois canais, comunicação *ethernet* e compatibilidade com a tecnologia PoE ([UBIQUITI, 2018b](#)).

O sistema de comunicação conta com um par de rádios, sendo um deles embarcado no robô operando em conjunto com duas pequenas antenas ASA-900CI (Figura 26a) e um rádio presente na base de controle operando com a antena YAGI AMY-9M16 (Figura 26b).



Figura 25 – Ubiquiti Rocket M900. Fonte: [UBIQUITI \(2018b\)](#).



(a) ASA-900CI.



(b) YAGI AMY-9M16.

Figura 26 – Antenas. Fonte: [ELETRÔNICA \(2022a\)](#); [UBIQUITI \(2018a\)](#).

Tabela 9 – Características do rádio e antenas. Fonte: [ELETRÔNICA \(2022b\)](#); [UBIQUITI \(2018a\)](#) - Adaptado.

Rádio Ubiquiti Rocket M900		Antena ASA-900/9R		Antena YAGI AMY-9M16	
<b>Potência</b>	6,5W	<b>Alcance de frequência</b>	900-960MHz	902-928MHz	
<b>Frequência</b>	900MHz	<b>Ganho</b>	2,15dBi	16dBi	
<b>Alimentação</b>	24V	<b>Dimensões</b>	105x20x7mm	1365x215x218mm	

### 3.1.10 Comunicação via cabo

Apesar de utilizar comunicação sem fio via rádio, priorizando frequências de operação mais baixas para melhor penetração em obstáculos, o alcance por vezes é limitado. O Fathom-X Tether propicia comunicação *ethernet* de alta velocidade em longas distâncias utilizando cabos de par trançado (Figura 27). O sistema é composto por um par de *tethers*, sendo um deles embarcado no robô e outro presente na base de controle.

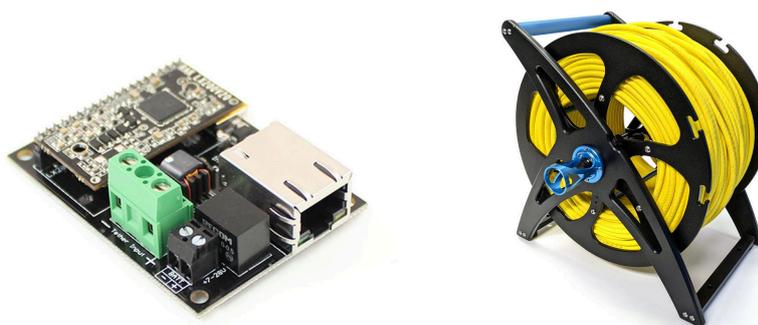


Figura 27 – Fathom-X Tether Board (esquerda) e Fathom Spool (direita). Fonte: [ROBOTICS \(2022b\)](#); [ROBOTICS \(2022a\)](#).

O cabo Fathom Spool utilizado para comunicação conta com proteção IP67 e tem em sua composição o Kevlar, uma fibra leve e resistente que oferece alta resistência à tração, sendo usado também como cabo de resgate em caso de mau funcionamento do robô. A Tabela 10 mostra algumas características desses componentes.

Tabela 10 – Características do *tether* e cabo. Fonte: [ROBOTICS \(2022b\)](#); [ROBOTICS \(2022a\)](#) - Adaptado.

Fathom-X Tether		Fathom Spool	
<b>Tensão de entrada</b>	7 - 28V	<b>Peso</b>	2,89Kg
<b>Largura de banda</b>	80 Mbps	<b>Número de vias</b>	8
<b>Distância máxima de comunicação (testada)</b>	300m	<b>Comprimento</b>	300m

### 3.1.11 Acionamentos elétricos

O acionamento elétrico é responsável por controlar o ligar e desligar o robô. Para isso, são utilizados 4 relés de estado sólido, 6 relés mecânicos, botões com proteção IP67 e componentes

eletrônicos como transistores, resistores, capacitores e diodos para a construção do circuito. Por meio deles, é possível a criação de uma lógica de acionamento que permite ao robô 4 estados distintos, como mostrado na Tabela 11. O desenvolvimento detalhado destes circuitos é descrito na seção 3.2.

Tabela 11 – Estados do robô. Fonte: O autor.

Botão de emergência	Botão Intel NUC	Carregador	Estado do robô
Contato aberto	SF*	Desconectado	Desligado
Contato aberto	SF*	Conectado	Carregando
Contato fechado	Contato aberto	SF*	Robô parcialmente ligado
Contato fechado	Contato fechado	SF*	Robô ligado

\*SF - Sem função

### 3.1.11.1 Relés

Os relés são utilizados para a comutação de circuitos através do abrir e fechar de seus contatos elétricos. Especificamente quanto aos relés de estado sólido, devido ao seu funcionamento completamente eletrônico, não apresentam partes móveis que possam se desgastar ao longo do tempo ou serem danificadas por trepidações durante inspeção de ambientes com terreno irregular.

Todavia, devido ao carregador utilizado, é necessária também a utilização de relés mecânicos no circuito de recarga das baterias. O carregador, que foi originalmente desenvolvido para ser conectado diretamente aos terminais da bateria, apresenta dimensões incompatíveis com o espaço interno disponível no robô. Como o processo de recarga de baterias exige um preciso controle da tensão e corrente elétrica por parte do carregador, os relés mecânicos são mais adequados para esta aplicação por apresentarem queda de tensão desprezível entre seus contatos. Os relés utilizados podem ser observados na Figura 28.



Figura 28 – Relé Crydom D1D40 (esquerda) e Metaltex MAD1NAC2 (direita). Fonte: [TECHNOLOGIES \(2022\)](#); [METALTEX \(2022\)](#).

### 3.1.11.2 Botões

O botão de emergência atua como chave geral do robô, sendo o componente de maior hierarquia na lógica de controle proposta. Para proteger o *hardware* embarcado de situações

de mau uso, potencialmente comuns em um robô de serviço, o carregamento das baterias só é habilitado com o robô desligado. Feito o acionamento do botão de emergência, o robô é parcialmente ligado, onde são acionados os motores, conversores CC-CC, câmeras e módulos de comunicação com e sem fio. Após, é possível ligar ou desligar o computador de bordo embarcado através do *push button*. Os botões utilizados são mostrados na Figura 29.



Figura 29 – Botão de emergência (esquerda) e *push button* (direita). Fonte: [EAO \(2021\)](#); [CONNECTIVITY \(2022\)](#).

### 3.1.12 Placas de circuito impresso

Foram desenvolvidas pela equipe integrante do projeto no laboratório do ITV placas de circuito impresso (PCBs - *Printed Circuit Boards*) com o objetivo de interligar os diversos componentes e circuitos eletrônicos que compõem o robô. Com o uso de PCBs, toda a montagem e futura manutenção é facilitada, além de ganhos na organização dos itens e otimização do espaço interno do robô. Desenvolvidos estes esquemáticos, as PCBs foram fabricadas pela empresa JLCPCB e enviadas para o Brasil.

#### 3.1.12.1 Placa dos motores

A placa dos motores (Figura 30 e Figura 31) foi idealizada para facilitar a ligação entre um conjunto de motores. Cada uma das placas possuem furação para a soldagem de conectores DB9, que se conectam posteriormente aos motores, fornecendo alimentação e comunicação entre eles via rede CAN.

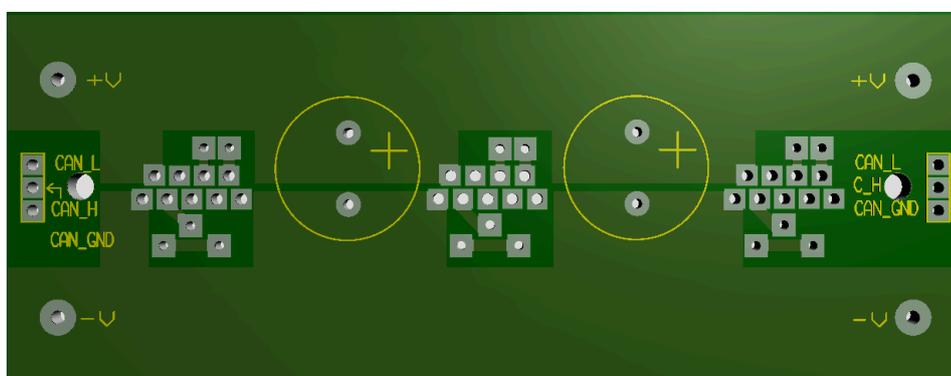


Figura 30 – Placa dos motores - frente. Fonte: O autor.

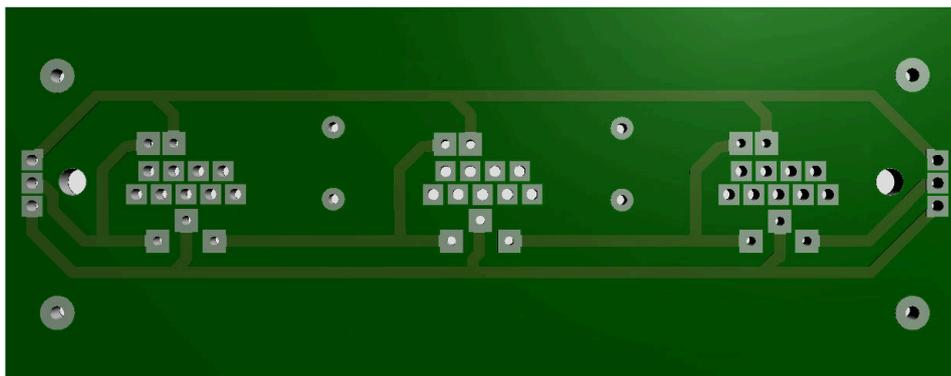


Figura 31 – Placa dos motores - verso. Fonte: O autor.

A placa conta ainda com malha para melhor distribuição da tensão de entrada, tanto para o terminal positivo quanto para o terminal negativo, terminais da rede CAN para conexão de mais placas e motores em rede e terminais para soldagem de capacitores que filtram oscilações da tensão de entrada decorrentes da alta demanda de corrente pelos motores em momentos que exijam elevado torque.

### 3.1.12.2 Placa dos conversores

A placa dos conversores (Figura 32 e Figura 33) foi projetada para abrigar o conjunto com os 4 conversores CC-CC, capacitores para filtragem das tensões de entrada e saída e terminais para conexão de fusíveis de proteção.

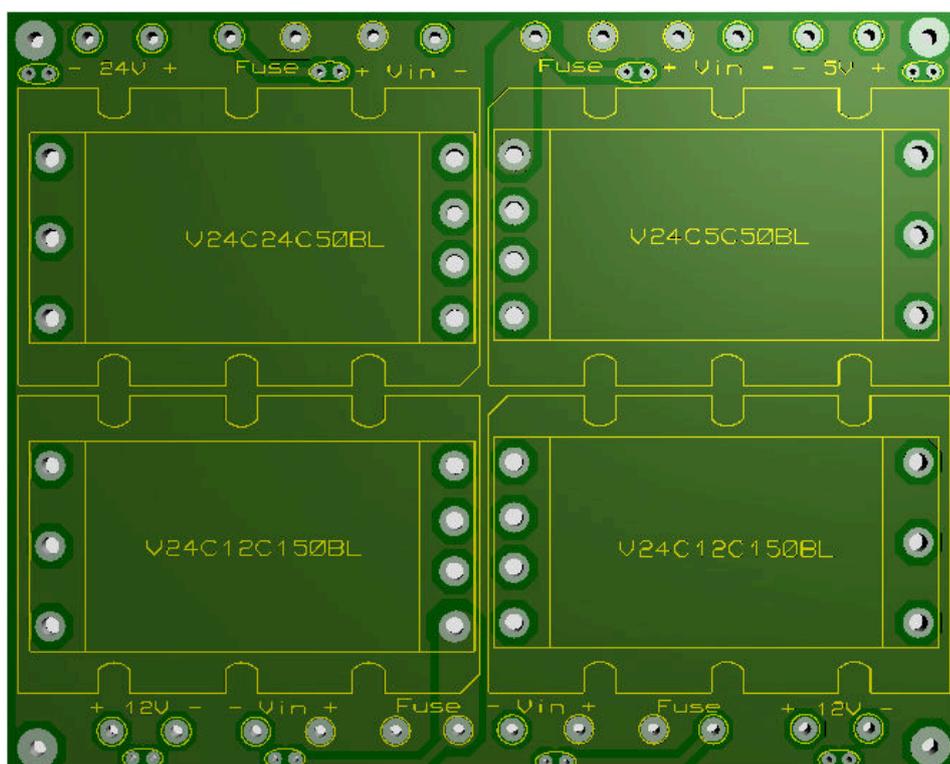


Figura 32 – Placa dos conversores - frente. Fonte: O autor.

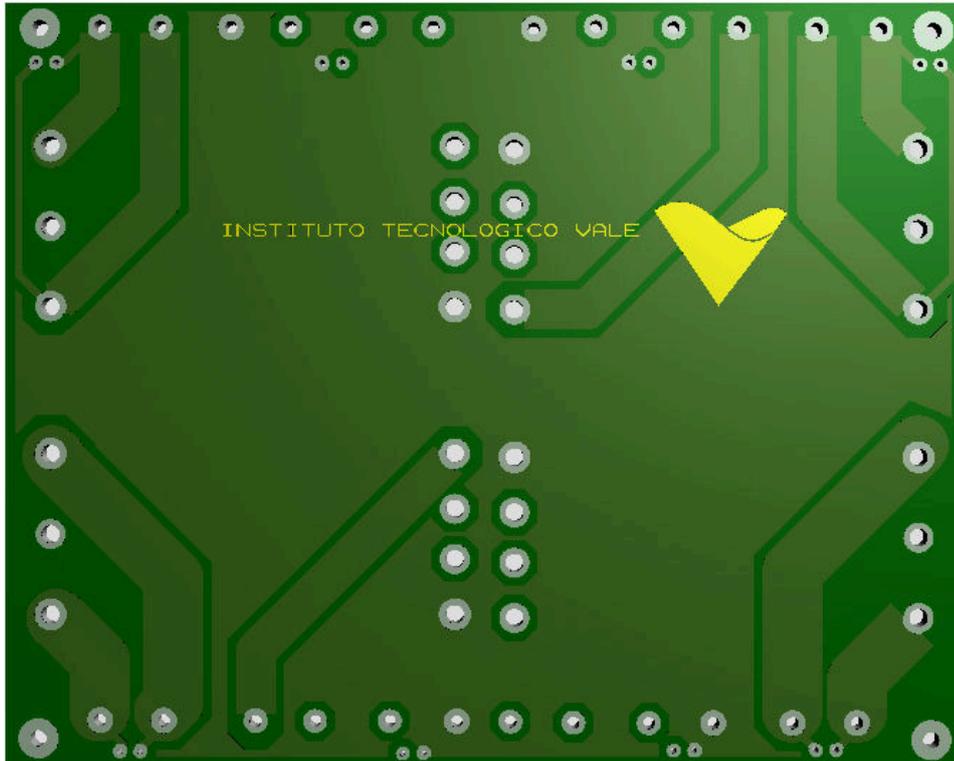
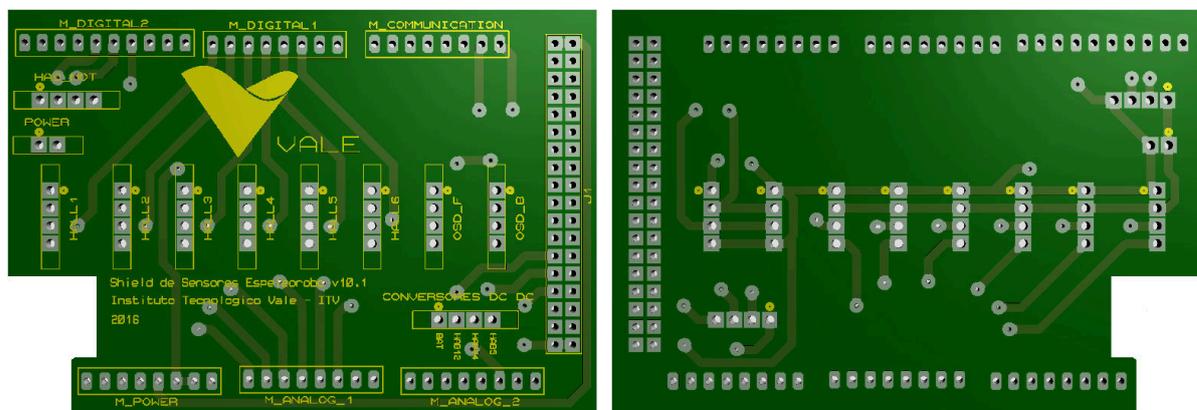


Figura 33 – Placa dos conversores - verso. Fonte: O autor.

Por possuir malha interna para melhor distribuição da tensão de entrada, análoga à placa dos motores, com apenas um par de fios positivo e negativo é possível alimentar todos os conversores de uma só vez.

### 3.1.12.3 Placas do Arduino Mega e Arduino Nano

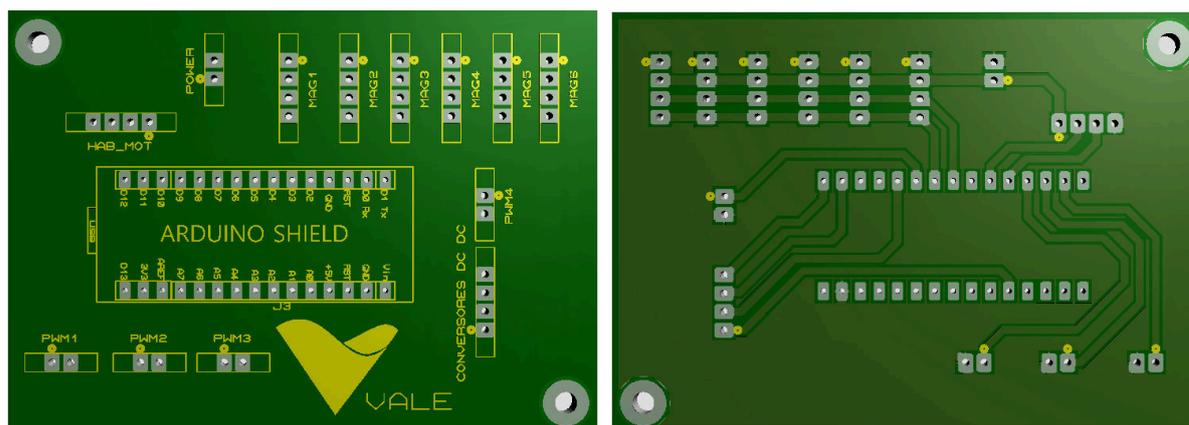
Para uma melhor ligação elétrica foram desenvolvidas também PCBs para o uso de Arduino Mega (Figura 34) e Arduino Nano (Figura 35).



(a) Frente.

(b) Verso.

Figura 34 – Visualização 3D da placa do Arduino Mega. Fonte: O autor.



(a) Frente.

(b) Verso.

Figura 35 – Visualização 3D placa do Arduino Nano. Fonte: O autor.

Além de proporcionar mais organização, por se encaixarem como *shields*, o uso dessas PCBs facilita a substituição de microcontroladores defeituosos, não sendo necessário refazer ligações elétricas ou soldagens.

As placas contam com terminais posteriormente utilizados pra controle de brilho dos LEDs através de PWMs, leitura de informações das baterias via SMBus e conexão para sensores hall.

### 3.1.13 Cabos, conectores e componentes especiais

Na montagem do robô são necessários alguns conectores ou cabos específicos devido a necessidades de projeto. Os cabos das baterias (Figura 36) possuem terminais que permitem alimentação elétrica e comunicação SMBus, necessário para telemetria e recarga. Os cabos, carregador e baterias utilizadas são produzidos pela Bren-Tronics.

Figura 36 – Cabo alimentação/SMBus (esquerda) e carregador (direita). Fonte: [BREN-TRONICS \(2022c\)](#); [BREN-TRONICS \(2022b\)](#).

Em virtude da construção do robô possuir índice de proteção IP67, são utilizados em sua tampa superior conectores RJ-45 para comunicação via cabo e conectores para recarga também com este índice de proteção (Figura 37).



Figura 37 – Conectores RJ-45 (esquerda) e conectores de 8 vias (direita). Fonte: O autor.

Por fim, para maior organização e fácil identificação dos vários circuitos presentes no robô, adotou-se um padrão de cores, sempre que possível, entre as ligações elétricas como mostra a Tabela 12. Para realizar essas ligações são utilizados conectores de emenda (Figura 38) que, juntamente com a identificação visual proporcionada pelos cabos coloridos torna ágil futuras manutenções e adição de novos componentes eletrônicos. A bitola dos cabos utilizados foram de  $2,5\text{mm}^2$  para alimentação dos conversores CC-CC,  $1,5\text{mm}^2$  para alimentação dos motores e  $1,0\text{mm}^2$  ou  $0,75\text{mm}^2$  para alimentação de periféricos a depender da demanda por corrente elétrica.

Tabela 12 – Padrão de cores. Fonte: O autor.

<b>Amarelo</b>	24V
<b>Vermelho</b>	12V
<b>Azul</b>	5V
<b>Preto</b>	Ground



Figura 38 – Conector de emenda (esquerda) e cabos elétricos (direita). Fonte: (WAGO, 2022) e (FIOCAMP, 2022).

### 3.2 Desenvolvimento da telemetria e recarga das baterias

Um dos principais problemas encontrados em versões anteriores do robô é a falta de informações quanto ao estado de carga das baterias. A presença desse tipo de informação é crucial para determinar a autonomia do robô e a viabilidade para se realizar inspeções.

Outra questão resolvida é implementação de recarga das baterias. Também em versões anteriores, havia a necessidade de se remover as baterias de dentro do robô, carregá-las em um carregador e reinseri-las no robô. Este tipo de operação, além de trabalhosa e indesejada em um robô de serviço, acabava por gerar centelhamentos que degradavam os terminais das baterias e conectores das mesmas.

### 3.2.1 Telemetria das baterias

As baterias Bren Tronics utilizadas no robô são compatíveis com a comunicação SMBus (Figura 39). Este sistema permite que vários dispositivos se comuniquem entre si por meio de uma rede de comunicação (Figura 40) para leitura de parâmetros pertinentes como tensão elétrica, temperatura, capacidade total, química das células, fabricante entre outras informações listadas no Apêndice B.

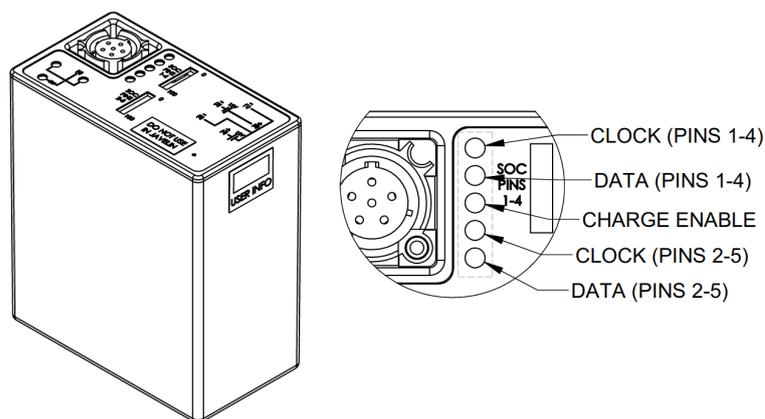


Figura 39 – Pinout das baterias do robô. Fonte: [BREN-TRONICS \(2005\)](#).

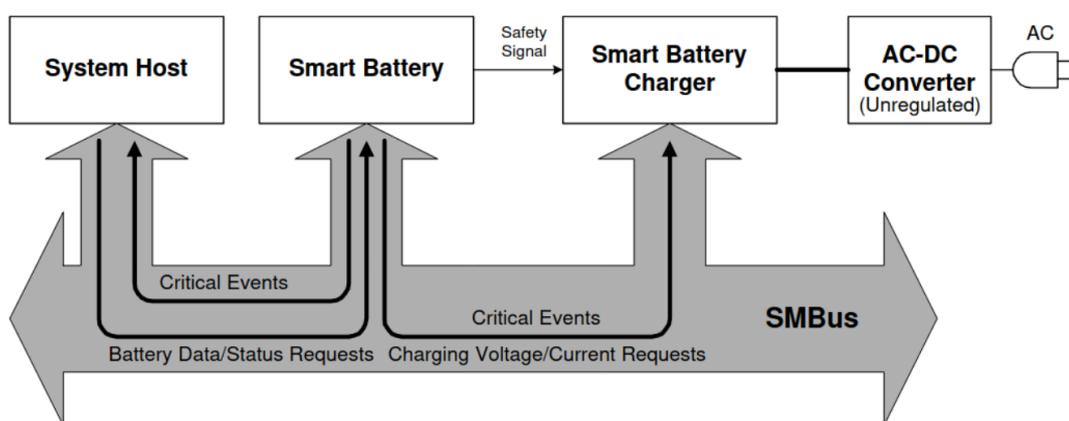


Figura 40 – Comunicação entre dispositivos via SMBus. Fonte: [FORUM \(1998\)](#).

O SMBus possui muitas semelhanças com a comunicação I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), utilizando para sua implementação física apenas um par de fios para o tráfego de *data* e *clock*. As diferenças aparecem principalmente na frequência de operação mais lenta do SMBus, visando melhor estabilidade e distância máxima de comunicação, e compatibilidade com tensões lógicas de 3,3V e 5V ([BREN-TRONICS, 2009](#)).

Apesar do Arduino não possuir suporte oficial ao SMBus, é possível encontrar e utilizar bibliotecas de comunicação I<sup>2</sup>C modificadas e compatíveis com o SMBus, graças ao desenvolvimento de usuários da comunidade *open source*.

---

**Algorithm 1:** Pseudocódigo da leitura de informações das baterias
 

---

```

setup
  init i2c;
  pinMode(pinMultiplexer, output);
  digitalWrite(pinMultiplexer, low);
  serial.begin();
while loop do
  digitalWrite(pinMultiplexer, low);
  serial.print("Informações da bateria 1: ");
  getInfo();
  digitalWrite(pinMultiplexer, high);
  serial.print("Informações da bateria 2: ");
  getInfo();
end
getInfo ()
  serial.print("Tensão: ", i2c.read(0x09));
  serial.print("Carga: ", i2c.read(0x0D));
  serial.print("Corrente: ", i2c.read(0x0A));
  serial.print("Temperatura: ", i2c.read(0x08));
return

```

---

No caso particular do robô, as baterias BT-70791CG utilizadas possuem endereço fixo e imutável, o que tornaria inviável a comunicação devido a conflitos entre os dispositivos da rede. Para contornar o problema, é utilizado um multiplexador que realiza o chaveamento da comunicação entre microcontrolador e as baterias, fazendo portanto a leitura das informações de maneira alternada.

Outra particularidade nas leituras é devido a ligação elétrica das células de cada uma das baterias: se separadas é possível a leitura de informações de cada uma das células, quando ligadas em série (Modo 24V utilizado no robô), apenas uma delas apresentam tensões compatíveis para que ocorra a comunicação SMBus. O esquema de ligação pode ser observado nas Figura 41 e Figura 42.

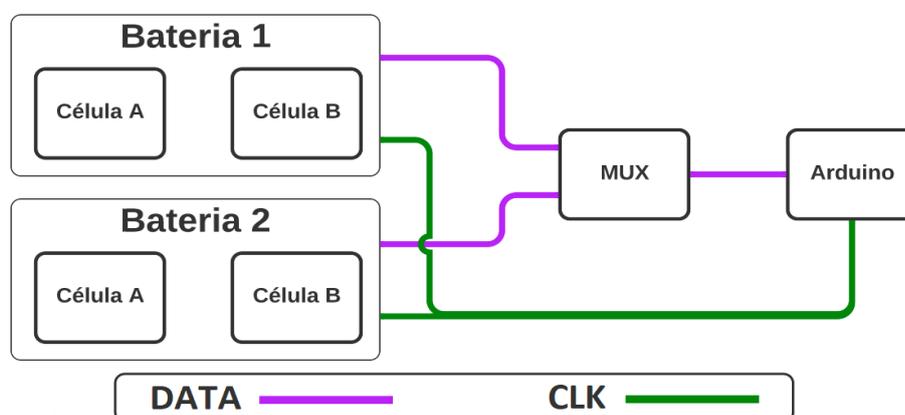


Figura 41 – Diagrama do circuito de leitura das baterias. Fonte: O autor.

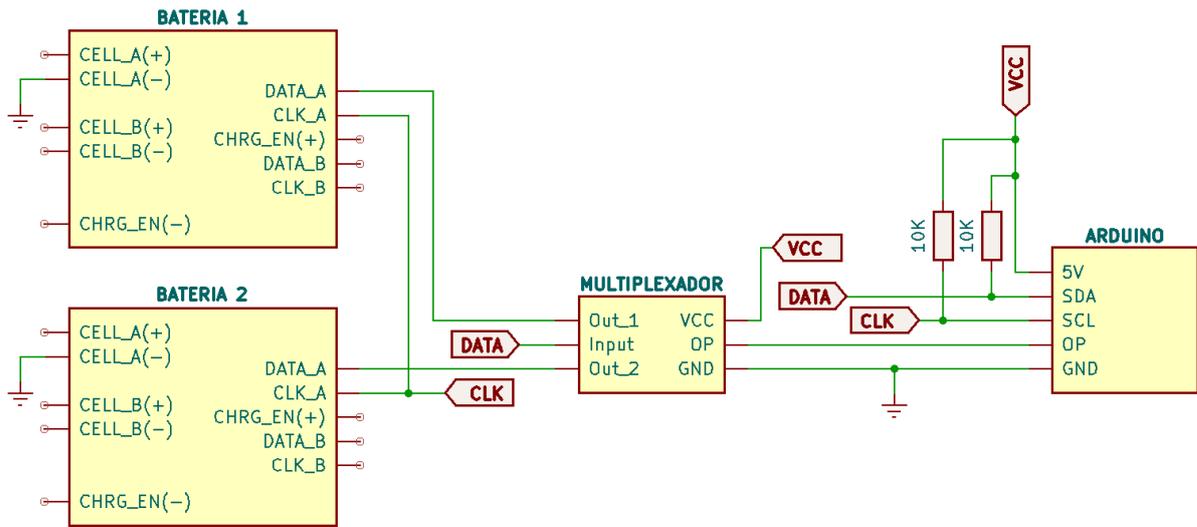


Figura 42 – Esquema elétrico do circuito de leitura das baterias. Fonte: O autor.

### 3.2.2 Circuito de acionamento - alimentação (*on/off*) e recarga

O circuito de acionamento é responsável por controlar de maneira lógica o ligar e desligar do robô e recarga das baterias. Sendo assim, a função deste circuito eletrônico é gerenciar o fluxo de energia, alternando a ligação das baterias, hora com os componentes eletrônicos do robô (robô ligado), hora desconectadas (robô desligado) e hora com os conectores para recarga (robô em modo de recarga). O diagrama da Figura 43 mostra de maneira geral estas ligações elétricas entre os componentes, baterias e suas células, melhor detalhadas ao longo do trabalho.

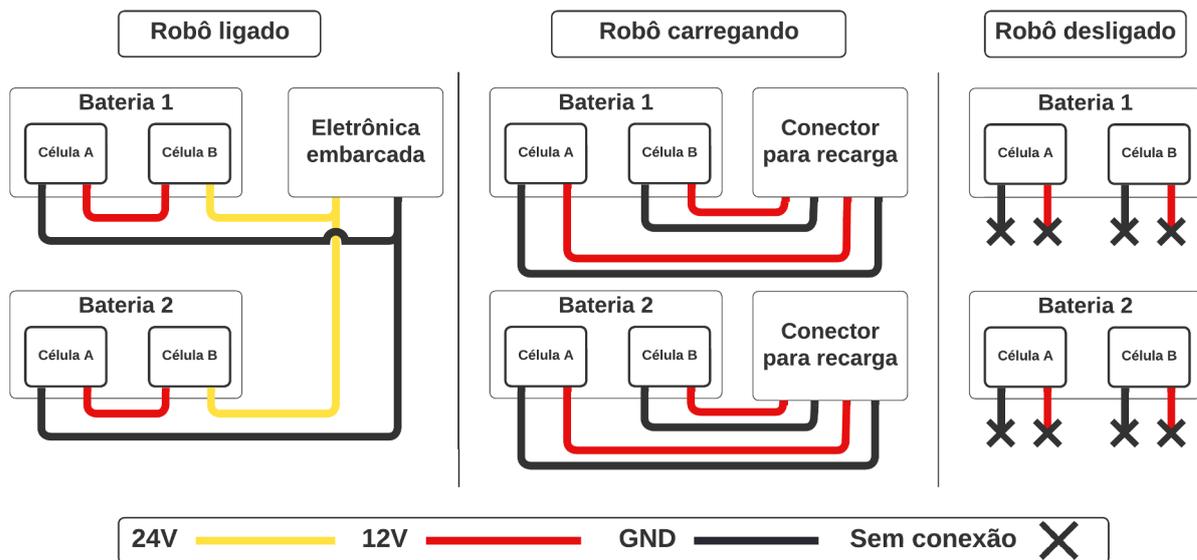


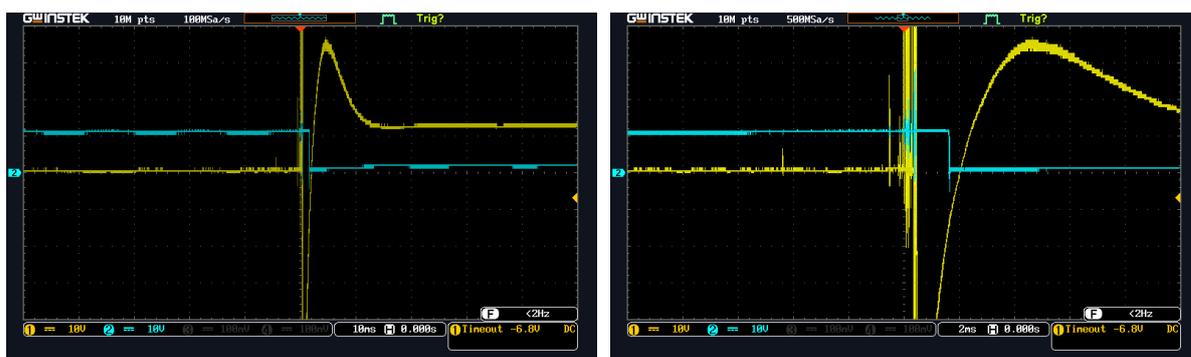
Figura 43 – Diagrama do circuito de acionamento. Fonte: O autor.

#### 3.2.2.1 Circuito de alimentação

Responsável por ligar e desligar o robô, este circuito conecta as baterias ao conjunto de motores e conversores CC-CC. São necessidades particulares do projeto operar com as células



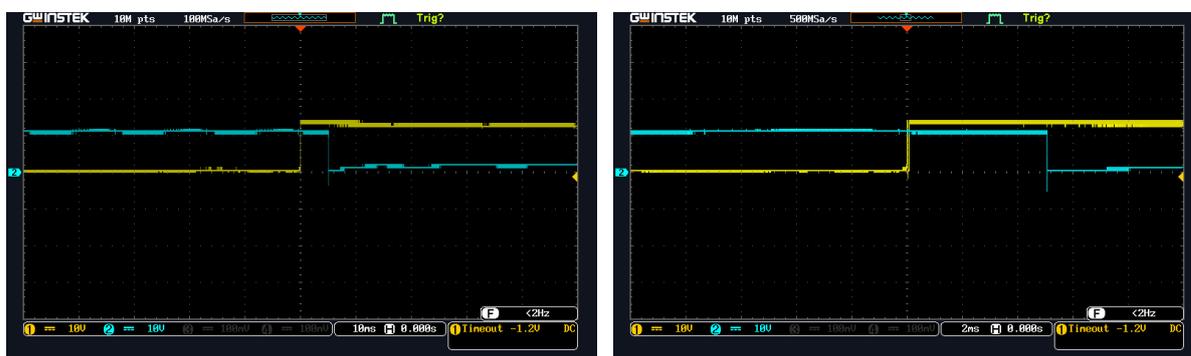
Algumas características também importantes são a presença de circuitos para proteção dos relés e demais componentes: amortecedores RC para evitar centelhamento e desgaste prematuro de seus contatos e diodos de roda-livre entre os terminais das bobinas para prevenir picos elevados de tensão induzida pelas bobinas durante a desenergização. Nos testes em bancada realizados, como mostrado nas Figura 46 e Figura 47, é notável o impacto positivo dessas proteções no desempenho dos relés, protegendo o circuito contra picos de tensão.



(a) Escala de 10ms.

(b) Escala de 2ms.

Figura 46 – Circuito sem diodo de roda livre. Fonte: O autor.



(a) Escala de 10ms.

(b) Escala de 2ms.

Figura 47 – Circuito com diodo de roda livre. Fonte: O autor.

As Figura 48 e Figura 49 mostram o circuito desenvolvido, composto pelo botão de emergência, conjunto de relés mecânicos e componentes como resistores, transistores, diodos, capacitores e fusíveis de proteção. O acionamento dos relés se dá pela simples conexão do carregador ao conector de recarga, não sendo necessário botões extras para essa função. Cada uma das baterias conta com um desses circuitos.

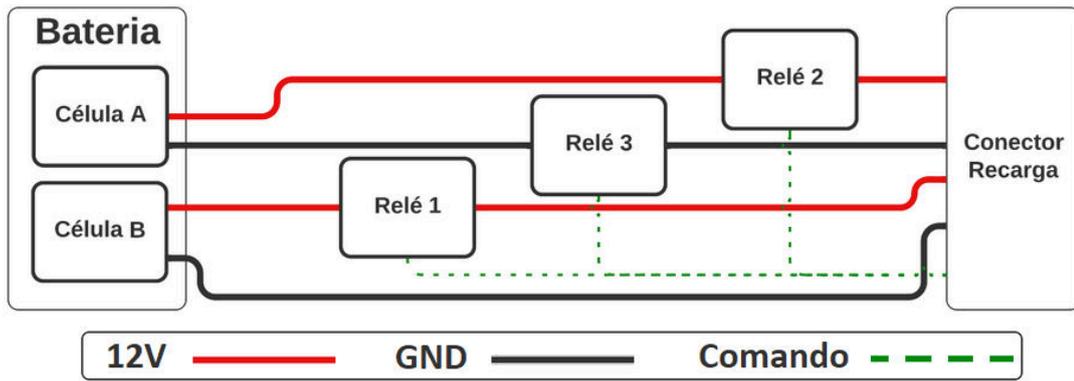


Figura 48 – Diagrama do circuito de recarga. Fonte: O autor

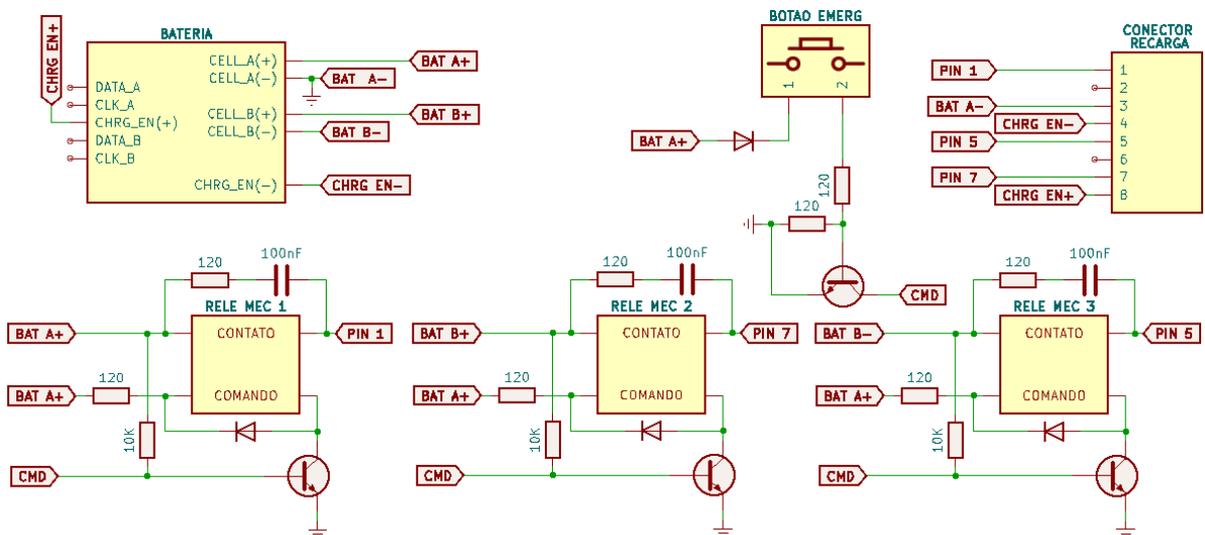


Figura 49 – Esquema elétrico do circuito de recarga. Fonte: O autor

## 4 MONTAGEM

Nesta seção são descritos os processos que compõem a etapa de montagem da eletrônica do robô, num primeiro momento com soldagens de componentes eletrônicos e crimpagem de cabos e terminais e posteriormente com a inserção e ligação de toda eletrônica dentro do robô.

### 4.1 Preparo dos componentes

#### 4.1.1 Soldagem das PCBs

##### 4.1.1.1 Placa dos motores

São inicialmente preparados 4 cabos *flat* de 3 vias com conectores *micro fit* que são utilizados para a comunicação via rede CAN. O uso desses conectores possibilita a rápida substituição de placas ou cabos defeituosos, evitando novos processos de soldagem ou crimpagem. São preparados também 4 capacitores para filtragem de variações na tensão elétrica (Figura 50). Para otimização de espaço dentro do robô, os capacitores são deslocados para cima da placa.

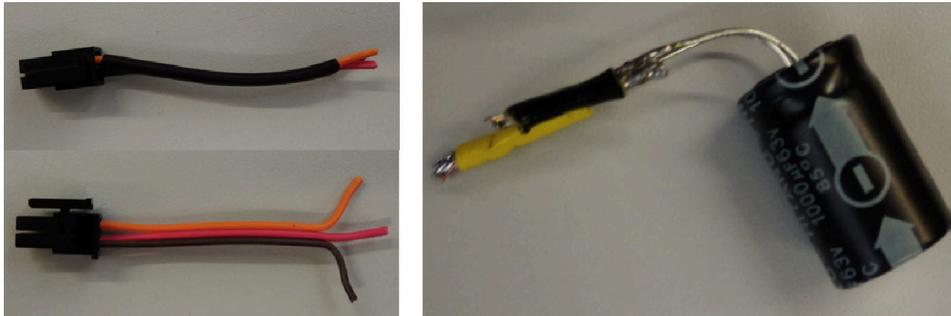


Figura 50 – Componentes das placas dos motores. Fonte: O autor.

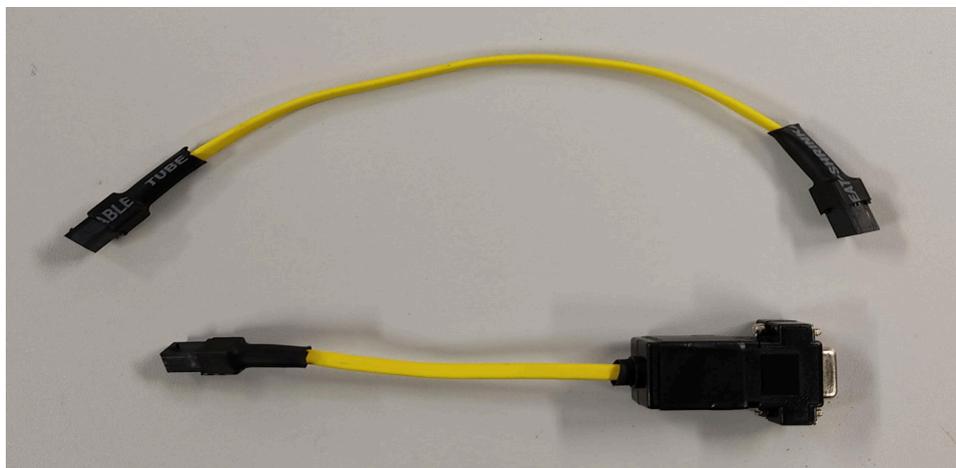


Figura 51 – Cabos da rede CAN. Fonte: O autor.

Posteriormente os componentes são soldados às placas, juntamente com conectores DB9 e cabos para alimentação, como mostra a Figura 52. Além disso há a adição de termo retráteis para melhor isolamento elétrico e resistência mecânica no caso dos cabos. Seja nas versões com 4 ou com 6 motores, o Espeleorobô utiliza 2 dessas placas.

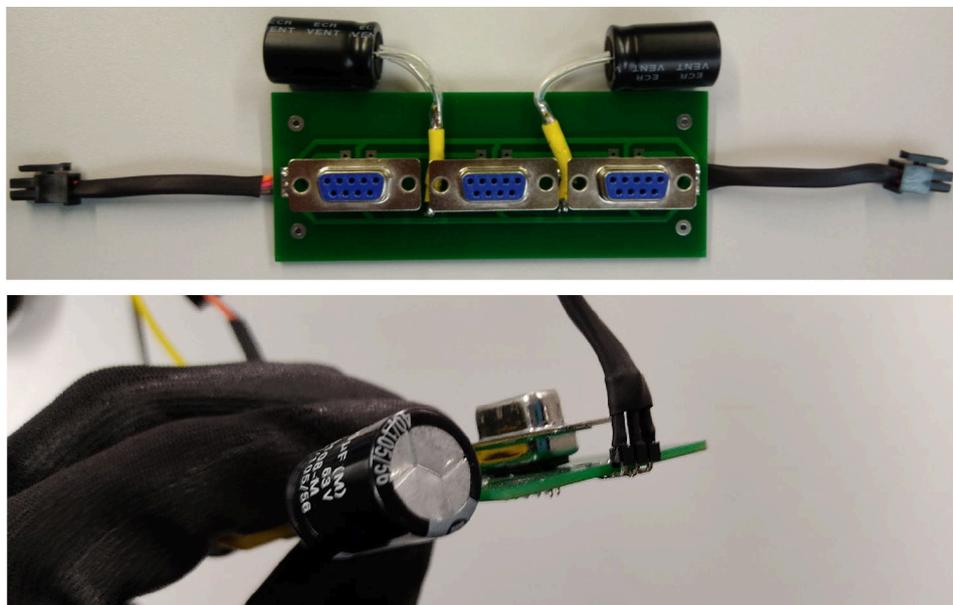


Figura 52 – Placa dos motores finalizada: vista frontal (acima) e vista lateral (abaixo). Fonte: O autor.

#### 4.1.1.2 Placa dos conversores

A montagem dessa placa se inicia pela soldagem de capacitores, porta-fusíveis e cabos para alimentação, respeitando o padrão de cores e espessura dos fios apropriada para cada aplicação (Figura 53).

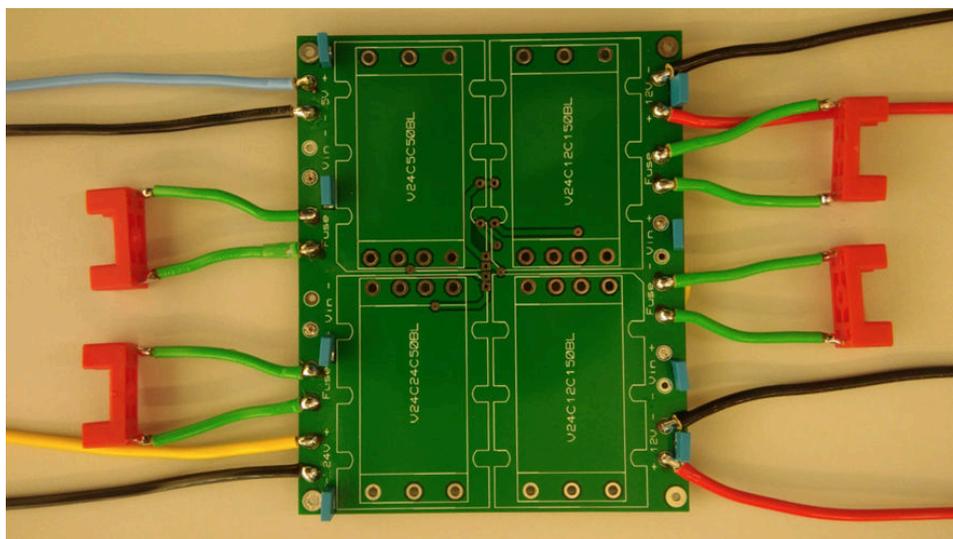


Figura 53 – Placa dos conversores. Fonte: O autor.

Por fim são soldados à placa os conversores CC-CC e adicionados termo retráteis para melhor proteção dos fios (Figura 54).

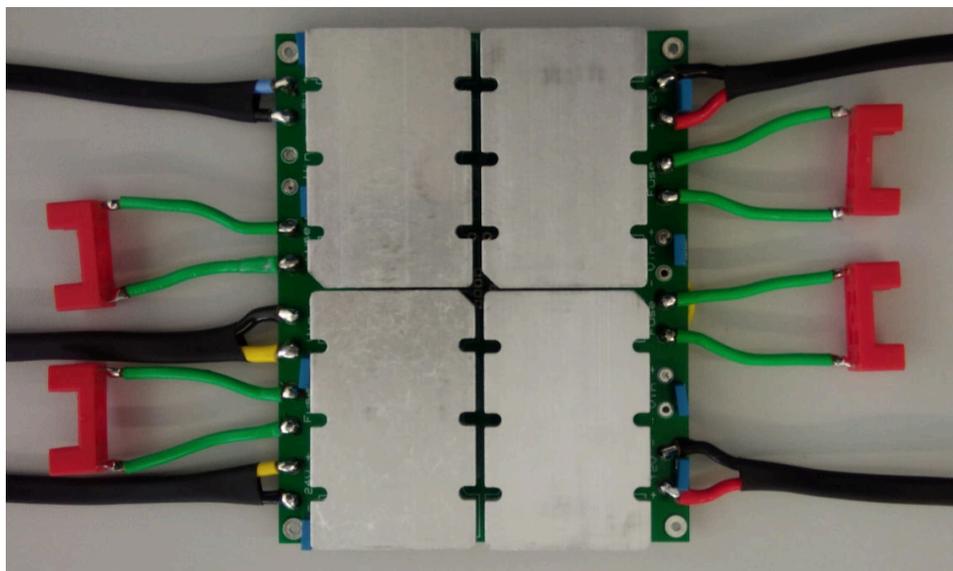


Figura 54 – Placa dos conversores finalizada. Fonte: O autor.

#### 4.1.1.3 Placas dos Arduinos

Por serem placas de *design* simples, a montagem se resume a soldagem de barras de pinos e cabos *flat* com conectores *micro fit*. Apesar do Arduino Mega ser o microcontrolador embarcado no robô, há a opção do uso de um Arduino Nano caso necessário. O resultado final das PCBs pode ser observado nas Figura 55 e Figura 56, ressaltando que nesta última já estão soldados também o multiplexador, resistores *pull-up* e cabos para leitura de informações das baterias.

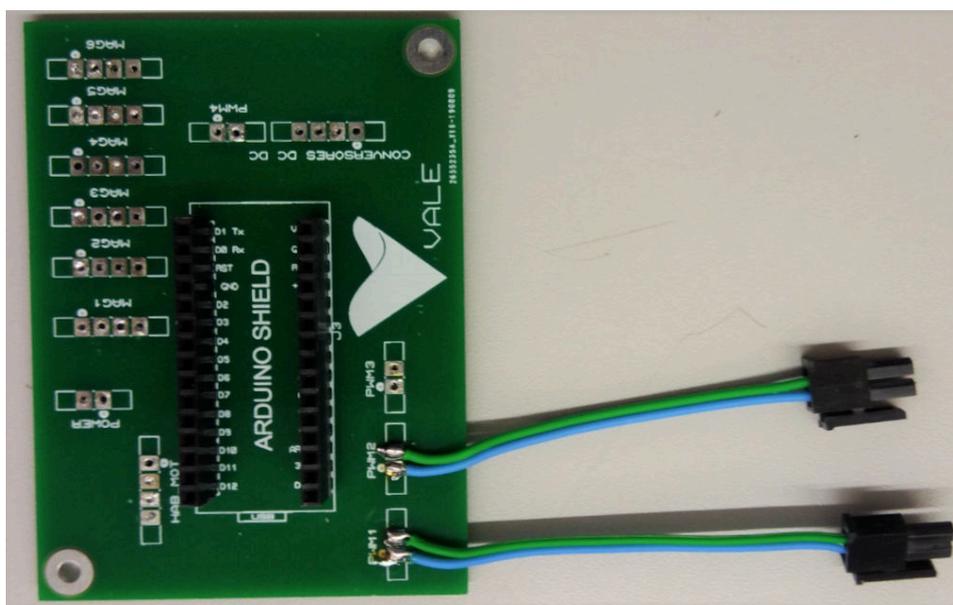


Figura 55 – Placa do Arduino Nano finalizada. Fonte: O autor.

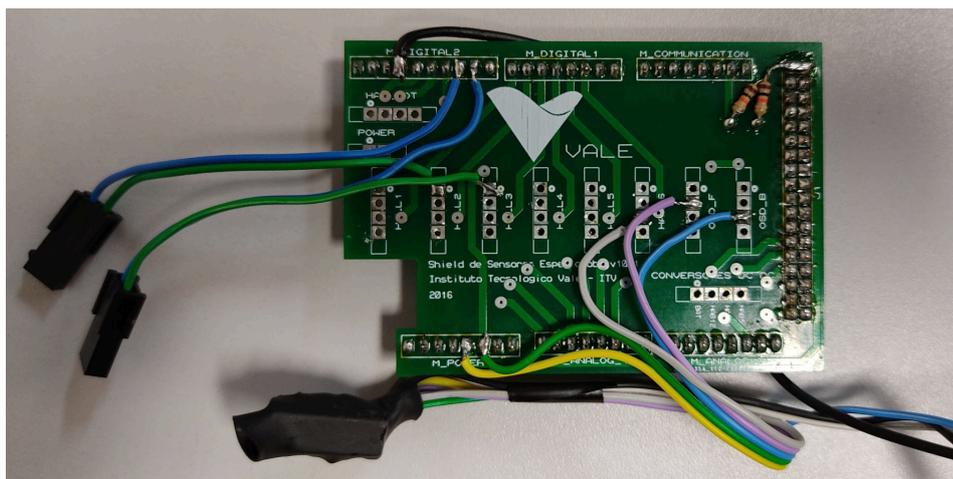


Figura 56 – Placa do Arduino Mega finalizada. Fonte: O autor.

#### 4.1.2 Sistema de iluminação

São montados inicialmente os 4 conjuntos de LEDs, soldando-se cabos apropriados em seus terminais de alimentação e posteriormente fixando o conjunto em um dissipador térmico de alumínio (Figura 57). É importante a adição de pasta térmica de boa condutividade térmica para melhor eficiência de dissipação. O resultado final pode ser observado na Figura 58.

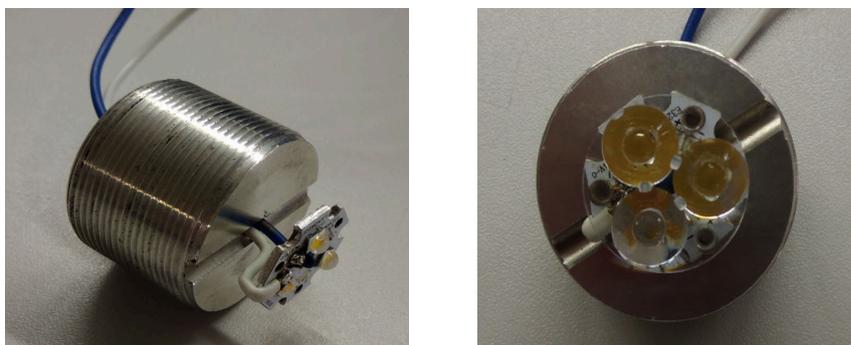


Figura 57 – Montagem dos LEDs: Fixação no dissipador térmico. Fonte: O autor.

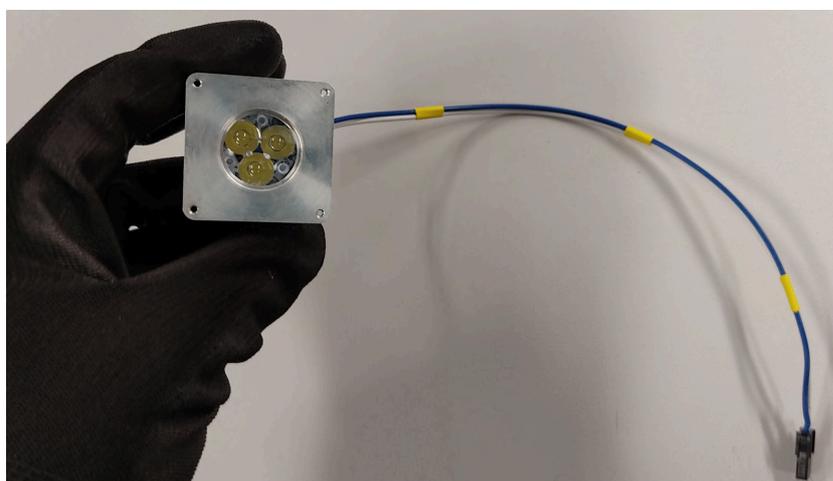


Figura 58 – Resultado final da montagem. Fonte: O autor.

Dando sequência, são preparados 2 *drivers* para os LEDs, que necessitam apenas de transistor para controle de dimerização e conectores *micro fit* (Figura 59 e Figura 60).

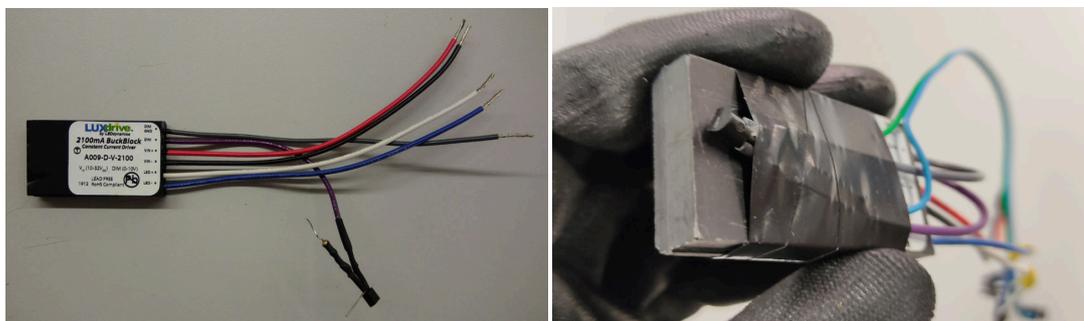


Figura 59 – Soldagem do transistor e fixação no *driver*. Fonte: O autor.

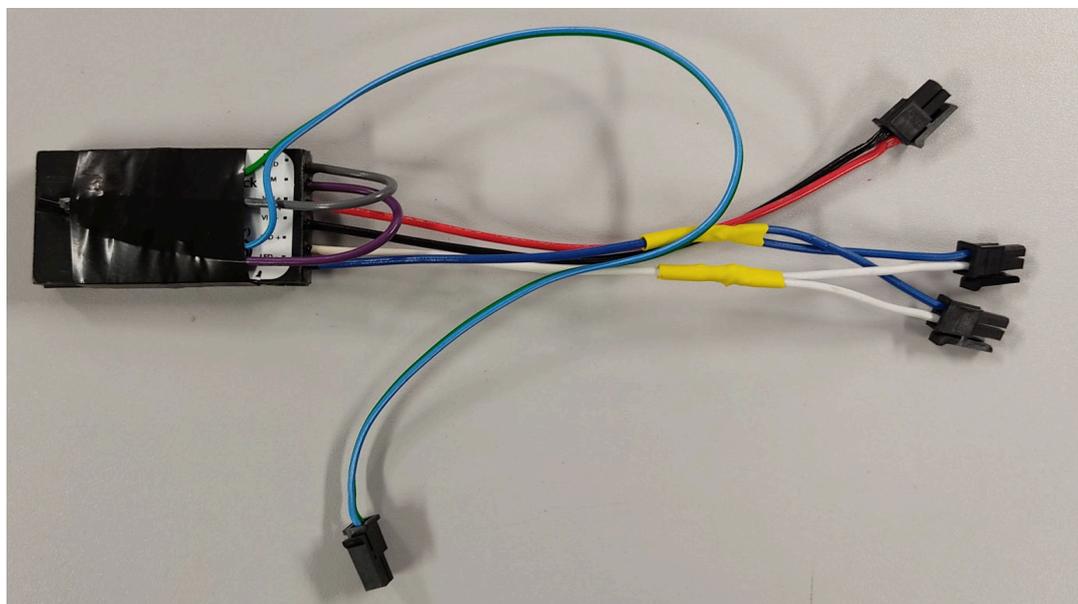


Figura 60 – Resultado final do *driver* dos LEDs. Fonte: O autor.

#### 4.1.3 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento é a etapa mais trabalhosa no processo de soldagem devido a complexidade dos circuitos e grande número de componentes. Seguindo os esquemáticos presentes na subseção [Desenvolvimento da telemetria e recarga das baterias](#), são montados os circuitos de recarga (Figura 61 e Figura 62) e de alimentação (Figura 63).



Figura 61 – Montagem dos relés mecânicos. Fonte: O autor.

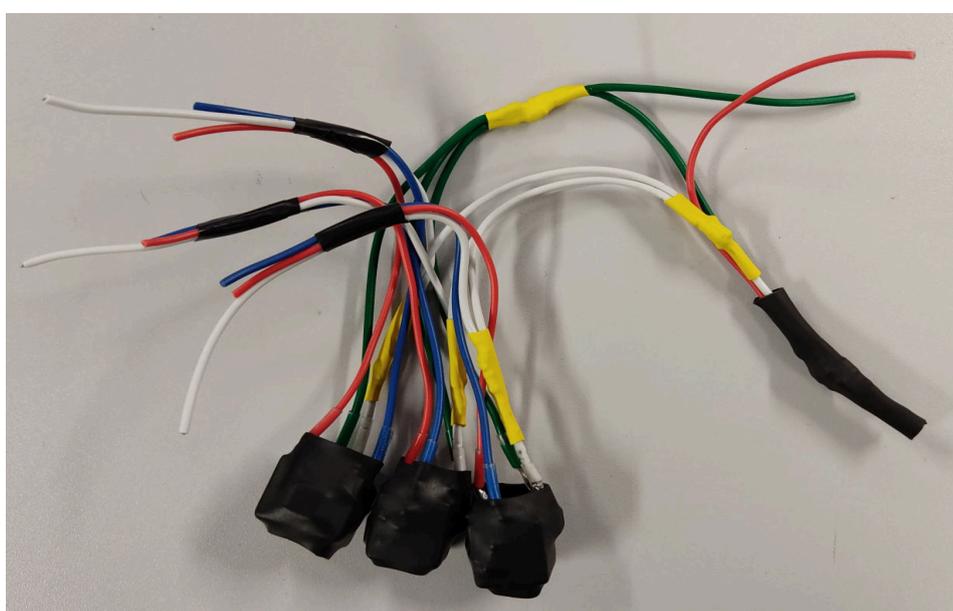


Figura 62 – Resultado final. Fonte: O autor.

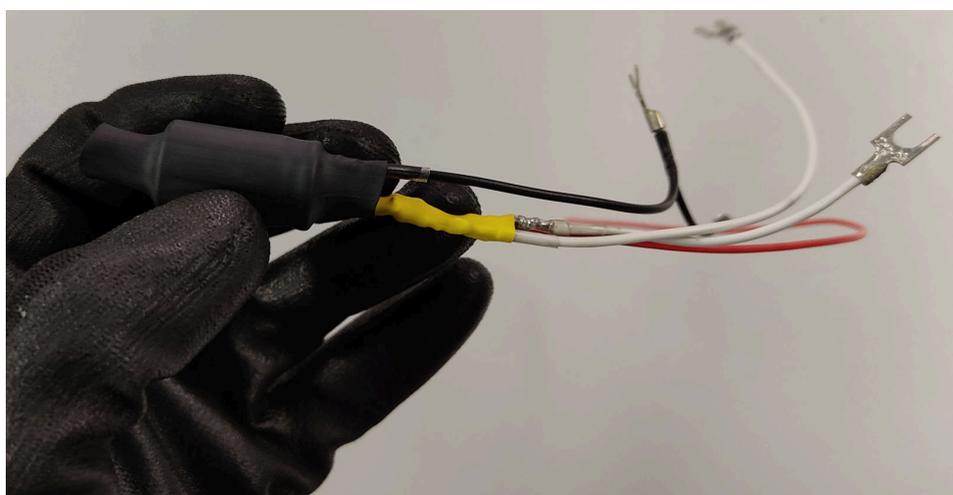


Figura 63 – Montagem dos circuito de acionamento. Fonte: O autor.

#### 4.1.4 Cabos e conectores diversos

Por fim, são confeccionados cabos de rede para comunicação *ethernet*, reduzido o comprimento dos cabos das câmeras para melhor otimização de espaço interno, preparados os botões (Figura 64 e Figura 65) e montagem dos conectores de recarga (Figura 66).

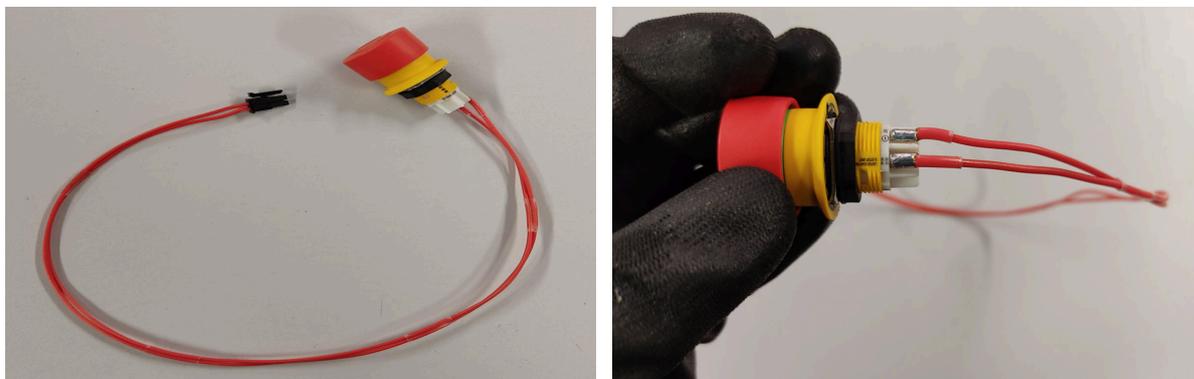


Figura 64 – Botão de emergência. Fonte: O autor.

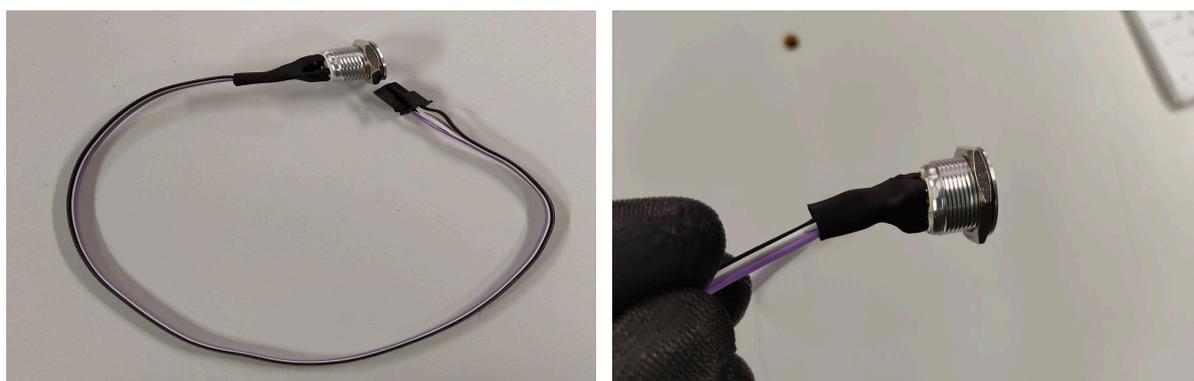


Figura 65 – *Push button* iluminado. Fonte: O autor.



Figura 66 – Conectores de recarga interno (esquerda) e externo (direita). Fonte: O autor.

## 4.2 Inserção da eletrônica no robô

Terminados os preparativos dos componentes eletrônicos, a montagem final do robô se inicia com a fixação dos motores nos mancais. Esta etapa da montagem da eletrônica é feita em conjunto com seu corpo mecânico, sendo possível a construção de versões do robô com 6 motores e 6 rodas ou 4 motores e 4 rodas. Seguindo com a montagem, são inseridas as baterias e PCBs dos motores e conversores CC-CC, isolando eletricamente terminais expostos que possam entrar em contato com o corpo metálico do robô. Após, são inseridos os componentes restantes: LEDs, câmeras, rádio, *switch*, *tether*, Intel NUC e Arduino Mega.

Por fim são inseridos os relés de acionamento e recarga e feitas as ligações elétricas necessárias. As Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70 mostram o resultado final da montagem.

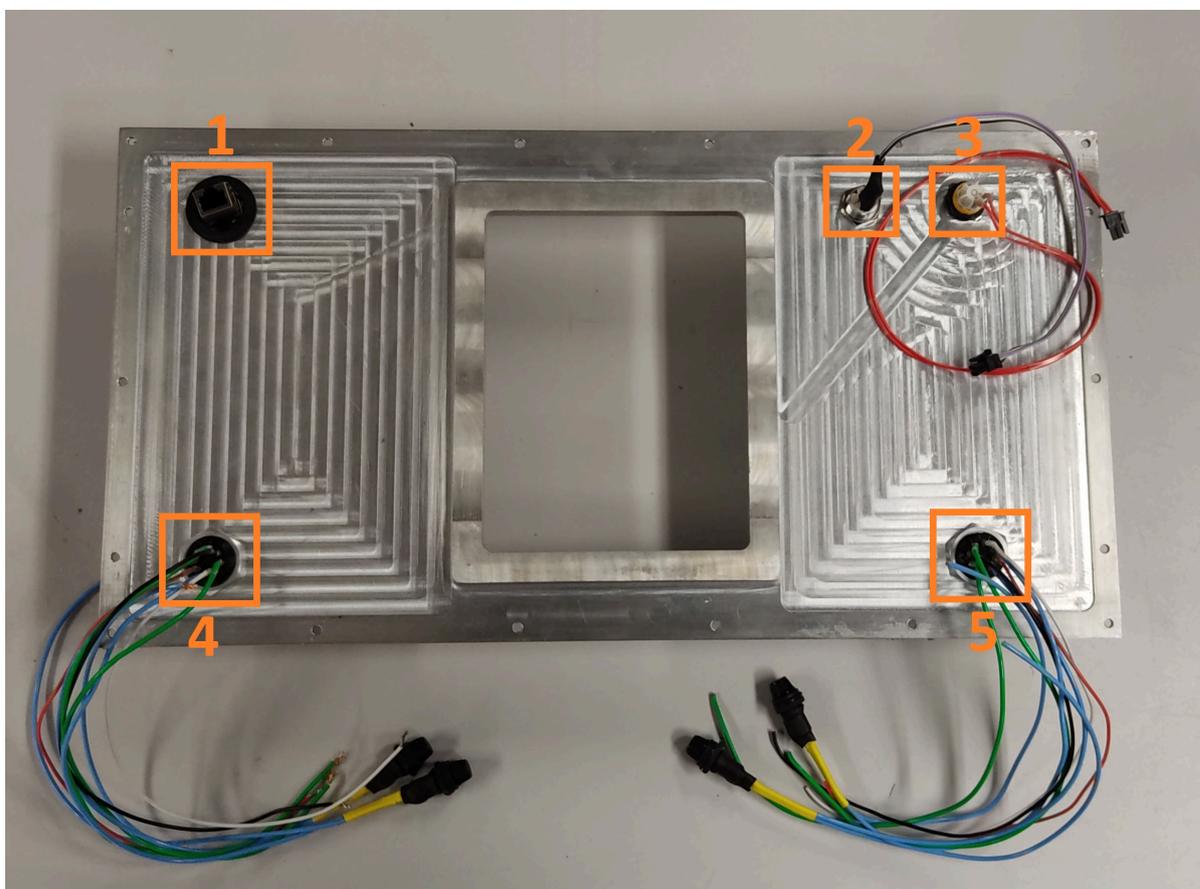


Figura 67 – Parte interna da tampa superior do robô. Componentes: (1) conector RJ-45, (2) *push button*, (3) botão de emergência, (4) e (5) conectores para recarga. Fonte: O autor.

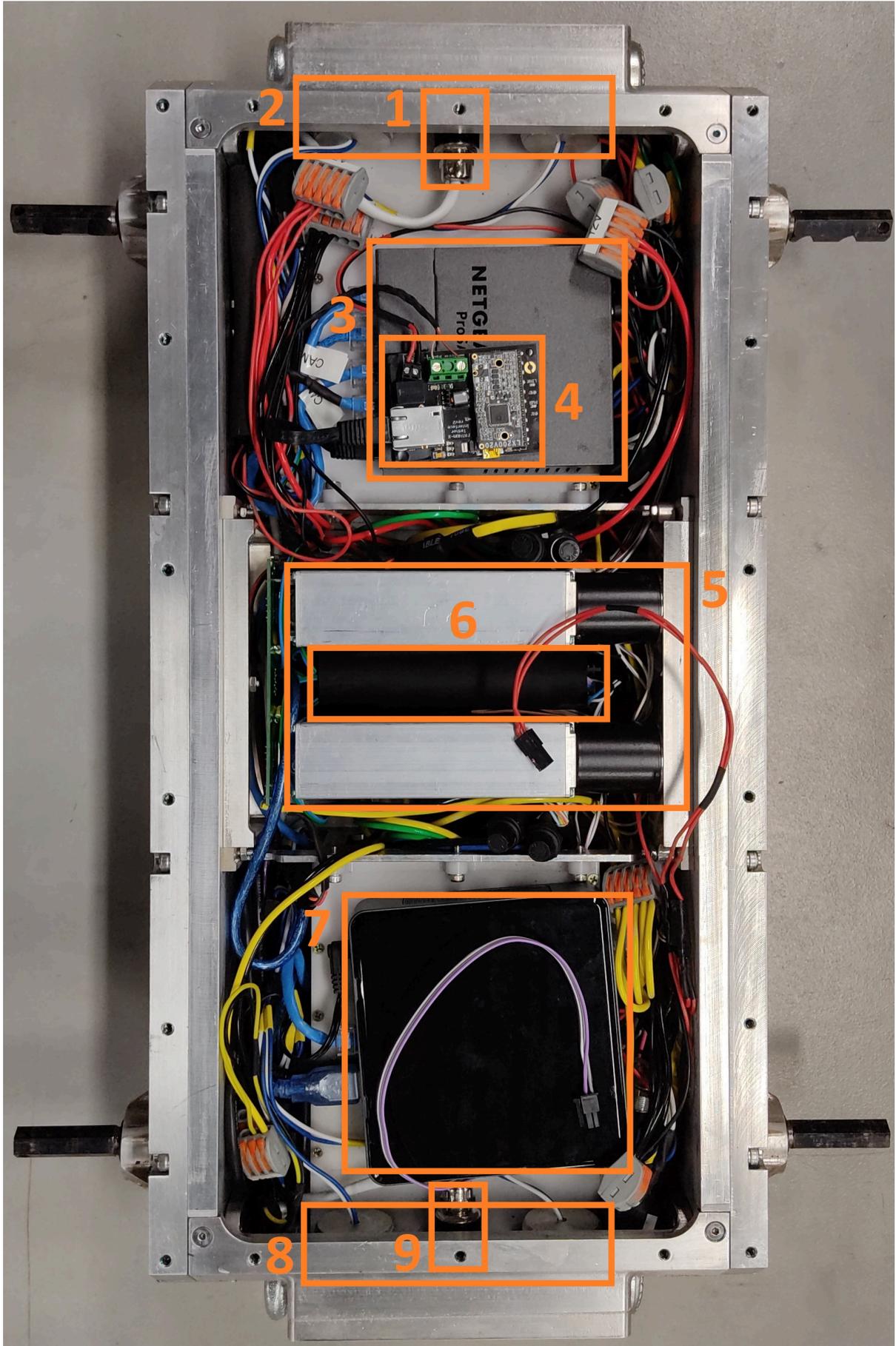


Figura 68 – Vista superior do robô aberto. Componentes: (1) câmera frontal, (2) LEDs frontais, (3) *switch ethernet*, (4) *tether*, (5) motores MCD EPOS, (6) Arduino Mega, (7) Intel NUC, (8) LEDs traseiros e (9) câmera traseira. Fonte: O autor.





Figura 70 – Espeleorobô. Fonte: O autor.

## 5 RESULTADOS

Como resultados é possível citar algumas das inspeções e dos experimentos de campo realizados com o robô que apontam como as melhorias em sua construção, eletrônica embarcada e *software* o permitiram realizar e concluir estas tarefas sem apresentar falhas ou mau funcionamentos.

### 5.1 Inspeções da tubulação de rejeitos da usina de Salobo

Situada em Marabá, sudeste paraense, Salobo é o local com o maior depósito de cobre do Brasil e o segundo projeto de cobre desenvolvido pela mineradora Vale no país. O mega empreendimento envolve a operação integrada de lavra a céu aberto, beneficiamento, transporte e embarque, tendo capacidade nominal de exploração estimada em 200 mil toneladas de cobre anuais somando-se as produções de Salobo e Salobo II (VALE, 2022a).

Os rejeitos gerados pelas atividades de mineração envolvendo o processamento do minério de cobre são direcionados a uma barragem de rejeitos por meio de dutos. A tubulação tem um comprimento total de 800 metros e devido a ocorrência de vazamentos em alguns pontos críticos percebeu-se a necessidade de uma inspeção para avaliação de danos às paredes internas.

Foram realizadas inspeções na tubulação em abril de 2018 com a versão antiga do robô utilizando comunicação via rádio e em setembro de 2019 já com a versão atual utilizando comunicação via cabo. Em ambas as inspeções foram gerados registros fotográficos por meio das gravações das câmeras, indicando pontos em que haviam desgastes nas paredes da tubulação que não poderiam ser percebidos por uma análise visual externa (Figura 71). Ao se comparar o desempenho do Espeleorobô durante as inspeções pode-se destacar alguns pontos que mostram o melhor desempenho da versão atual em relação a sua antecessora:

- Em virtude das câmeras utilizadas possuem melhor qualidade de imagem, auxiliadas também pelo sistema de iluminação mais eficiente, a qualidade de imagem das gravações se demonstrou superior, facilitando a identificação de pontos com desgastes nas paredes da tubulação;
- A comunicação via cabo utilizando o *tether* se mostrou mais estável e prática do que a comunicação sem fio via rádio. Isto porque durante a primeira inspeção, com a impossibilidade de se apontar a antena da base de controle para dentro da tubulação, foi necessário que a antena fosse instalada em um veículo auxiliar que percorria a tubulação lado a lado com o robô de maneira externa. Já a comunicação cabeada operou sem problemas, tendo seu alcance limitado apenas pelo comprimento do cabo;

- Apesar da gravação das imagens e registros fotográficos, por a versão antiga do robô não possuir vedação parte da eletrônica embarcada foi danificada devido a infiltração de água presente na tubulação, onde alguns de seus motores e componentes eletrônicos foram queimados por curto-circuitos. A proteção IP67 presente na versão atual do robô permitiu que a inspeção fosse realizada sem danos à eletrônica embarcada, protegendo contra os fluidos presentes na tubulação.



Figura 71 – Inspeções em Salobo: 2018 (esquerda) e 2019 (direita). Fonte: [TORRE \(2019\)](#); [THIAGO FILHO \(2019\)](#).

## 5.2 Experimento de campo na Mina Du Veloso

A Mina Du Veloso, localizada no município de Ouro Preto-MG, é um dos atrativos turísticos da cidade e um espetacular exemplar da genialidade africana nos trabalhos em busca de ouro na antiga Vila Rica nos séculos XVIII e XIX ([PRETO, 2022](#)). Aberta em 2012 para pesquisa e visitação, são mais de 400 metros de galerias interligando salões, poços d'água e diversas áreas de garimpo com valetas para escoamento da água usada na mineração.

Em fevereiro 2020 foi efetuado um experimento de campo com o robô visando reconstruir um mapa tridimensional da galeria principal da mina. Nessa ocasião o Espeleorobô contou com uma torre de instrumentação fixada em sua tampa superior que embarcava um LIDAR, IMU e câmeras de profundidade Intel RealSense (Figura 72).

A melhor organização dos cabos, adoção de padrão de cores e uso dos conectores de emenda na montagem do robô tornaram rápida e bem mais prática a adição desses novos sensores e dispositivos embarcados na torre de instrumentação do robô. A comunicação via cabo utilizando o *tether* se mostrou novamente superior a comunicação sem fio via rádio, permitindo uma conexão entre base de controle e robô mais estável, veloz e com maior alcance.



Figura 72 – Experimento de campo na Mina Du Veloso. Fonte: Acerto ITV.

### 5.3 Inspeção de galeria na Mina da Conceição

Conhecida como "Cidade do Ferro", Itabira-MG abriga um grande complexo de mineração formado por sete minas, as duas maiores Conceição e Cauê, já em processo de recuperação ambiental, além das Minas do Meio, formadas pelas minas de Periquito, Dois Córregos, Onça, Camarinha e Chacrinha (VALE, 2022b).

Foi realizada uma inspeção de uma galeria na Mina da Conceição em maio de 2022 com o objetivo de analisar possíveis pontos de vazamento em uma tubulação de transporte de óleo próximo ao local de reparo e oficina mecânica do maquinário utilizado no complexo. O robô foi colocado dentro da galeria para a filmagem da tubulação através de uma câmera instalada em sua torre de instrumentação e ao fim da inspeção içado de volta por meio do cabo de comunicação (Figura 73).

Assim como no experimento de campo na Mina Du Veloso, a melhor organização dos cabos, adoção de padrão de cores e uso dos conectores de emenda facilitaram a instalação da câmera na torre de instrumentação do robô para os registros fotográficos. A comunicação via cabo utilizando o *tether* foi essencial para a realização da inspeção, uma vez que estabelecer uma comunicação sem fio seria inviável devido às dimensões do alçapão e profundidade da galeria. Por se tratar de uma galeria com a presença de várias outras tubulações além da que

foi inspecionada, o ambiente apresentou severa contaminação com resíduos de óleo, graxa, combustível e outros fluidos, sendo que a vedação e proteção IP67 garantiram a integridade do *hardware* embarcado no robô.



Figura 73 – Inspeção na Mina da Conceição. Fonte: Acerto ITV.

## 6 CONCLUSÃO

Foi apresentada neste trabalho a implementação da eletrônica embarcada no Espeleorobô, detalhando seu desenvolvimento e descrevendo as etapas que envolvem seu processo de montagem. O experimento de campo na Mina Du Veloso e as inspeções nas Mina da Conceição e Usina de Salobo foram de grande exigência e validaram suas melhorias. Pode-se destacar que nas duas primeiras o dispositivo realizou as operações de maneira rápida e sem apresentar qualquer tipo de mau funcionamento e as inspeções em Salobo demonstram ainda mais a efetividade das melhorias da versão atual do robô em comparação a sua antecessora.

Por se tratar de um robô de serviço foi de grande importância o desenvolvimento dos sistemas de telemetria e recarga das baterias, pois são elementos imprescindíveis para métricas de autonomia e usabilidade do robô. A padronização de cores, organização dos cabos e uso de conectores de emenda facilitam sua manutenção e adição de novos sensores, como os presentes em sua torre de instrumentação durante mapeamentos tridimensionais.

Pode-se concluir que esta nova versão do Espeleorobô apresenta, de modo geral, ainda mais robustez e confiabilidade. Os aprimoramentos propostos e implementados pela a equipe de pesquisa do ITV-RoC, desde a versão inicial, e os desenvolvimentos apresentados neste trabalho vêm agregando novas funcionalidades ao robô e permitindo ainda mais possibilidades de aplicações.

### 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como proposta de desenvolvimento e revisão da plataforma para trabalhos futuros, tem-se a utilização de *switch ethernet* compatível com a tecnologia PoE, tornando ainda mais fácil a adição de novos componentes. A substituição do *switch* Netgear GS105Ev2 pelo modelo GS105PE e do conversor CC-CC Vicor modelo V24C5C50BL pelo modelo V24C48C50BL são viáveis para esta mudança visto que possuem dimensões semelhantes.

A utilização de LEDs com melhor eficiência energética e portanto menor produção de calor pode ser um ponto positivo pois reduziria a temperatura interna do robô. Um sistema de troca de calor com o ambiente externo ou a instalação de LEDs externos ao robô podem ser soluções também viáveis.

Sugere-se por fim a adição de IMU para melhor controle da inclinação do robô por parte do operador e evitar possíveis tombamentos que podem gerar prejuízos ou danos ao dispositivo e uso de câmeras PTZ para realização de inspeções e tele-operação.

## REFERÊNCIAS

- ANYBOTICS. *Automation Digitalization at Scale: ANYmal Makes the Case at BASF*. 2021. Disponível em: <<https://www.anybotics.com/anymal-makes-the-case-at-basf-chemical-plant/>>. Acesso em: 07 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.
- ARDUINO. *Arduino Mega 2560 Rev3*. 2022. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>>. Acesso em: 28 mai 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 29.
- AXIS. *AXIS P1224-E Network Camera Miniature HDTV camera for discreet outdoor surveillance*. 2015. Disponível em: <<https://www.axis.com/dam/public/cb/2a/ca/datasheet-axis-p1224-e-network-camera-en-US-334434.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 28.
- AXIS. *AXIS P1224-E Network Camera*. 2022. Disponível em: <<https://www.axis.com/pt-br/products/axis-p1224-etechnical-specifications>>. Acesso em: 27 mai. 2022. Citado na página 28.
- AZPÚRUA, H. et al. Towards semi-autonomous robotic inspection and mapping in confined spaces with the espeleorobô. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2021. v. 101, 04 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.
- BARROS, L. G. D. de. *Desenvolvimentos e aplicações de dispositivos robóticos em ambientes de mineração : proposta de sistema de vedação para o EspeleoRobô II e ferramenta de remoção de cobertura de borracha para emenda de correias*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/14054>>. Acesso em: 04 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.
- BREN-TRONICS, I. *INTERFACE CONTROL DRAWING BB-2590 SMBus*. 2005. Disponível em: <<https://www.bren-tronics.com/resource/Drawing/Drawing/ICD-BB-2590%20SMBus%20REV%20J.pdf>>. Acesso em: 03 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 38.
- BREN-TRONICS, I. *APPLICATION NOTE: IMPLEMENTING THE SM-Bus INTERFACE FOR USE WITH BREN-TRONICS BATTERIES*. 2009. Disponível em: <[https://www.avrfreaks.net/sites/default/files/forum\\_attachments/IMPLEMENTING%20THE%20SMBus%20INTERFACE.PDF](https://www.avrfreaks.net/sites/default/files/forum_attachments/IMPLEMENTING%20THE%20SMBus%20INTERFACE.PDF)>. Acesso em: 28 mai 2022. Citado na página 38.
- BREN-TRONICS, I. *BB-2590/U, 9.9 Ah High Capacity Rechargeable Lithium-Ion Battery*. 2022. Disponível em: <<https://www.bren-tronics.com/bt-70791cg.html>>. Acesso em: 07 jun. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 10, 25 e 26.
- BREN-TRONICS, I. *Medium Rate AC/DC Charger Kit with US Plug Adapter*. 2022. Disponível em: <<https://www.bren-tronics.com/catalog/product/view/id/1117/s/btk-70822-mr-1/category/9/>>. Acesso em: 03 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 36.

- BREN-TRONICS, I. *Power/SMBus Cable*. 2022. Disponível em: <<https://www.bren-tronics.com/bta-70762-1.html>>. Acesso em: 03 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 36.
- CONNECTIVITY, T. *Alcoswitch AV16, Push Button Switches, Single Pole - Single Throw Configuration (Pole-Throw), Anti-Vandal, Single Actuator, Flush Actuator Profile*. 2022. Disponível em: <<https://www.te.com/usa-en/product-2213775-7.datasheet.pdf>>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 33.
- CORPORATION, V. *Brick Package Maxi, Mini, Micro DC-DC Converters*. 2018. Disponível em: <[https://www.vicorpower.com/documents/family\\_overviews/fo\\_maxi-mini-micro.pdf](https://www.vicorpower.com/documents/family_overviews/fo_maxi-mini-micro.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 26.
- CORPORATION, V. *Maxi, Mini, Micro DC-DC Converters*. 2022. Disponível em: <<https://www.vicorpower.com/dc-dc-converters-board-mount/high-density-dc-dc-converters>>. Acesso em: 06 jun. 2022. Citado na página 26.
- COTA, E. *Infraestrutura de comando e controle para um dispositivo robótico remoto de inspeção e monitoramento de cavidades*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/429>>. Acesso em: 28 mai 2022. Citado na página 16.
- EAO. *EAO Main Catalog*. 2021. Disponível em: <[https://eao.com/fileadmin/documents/PDFs/en/01\\_main-catalogue/EAO\\_MC\\_61\\_Main-Catalogue\\_EN.pdf](https://eao.com/fileadmin/documents/PDFs/en/01_main-catalogue/EAO_MC_61_Main-Catalogue_EN.pdf)>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 33.
- ELETRÔNICA, A. *Antena móvel ASA-900CI*. 2022. Disponível em: <<https://arseletronica.com.br/solucoes/antena-movel-asa-900ci/>>. Acesso em: 03 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 30.
- ELETRÔNICA, A. *ASA-900CI Antena Móvel Adesiva Omnidirecional UHF*. 2022. Disponível em: <<https://arseletronica.com.br/wp-content/uploads/2021/11/501198-501212-501213-501214-501236-501237-ASA-900CI.pdf>>. Acesso em: 03 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 31.
- FIOCAMP. *Fios e Cabos*. 2022. Disponível em: <<https://fiocamp.com.br/produtos/fios-e-cabos/>>. Acesso em: 09 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 37.
- FORUM, S. I. *Smart Battery Data Specification*. 1998. Disponível em: <<http://sbs-forum.org/specs/sbdat110.pdf>>. Acesso em: 29 mai 2022. Citado 4 vezes nas páginas 8, 10, 38 e 68.
- GEHRING, C. et al. Anymal in the field : Solving industrial inspection of an offshore hvdc platform with a quadrupedal robot. In: ISHIGAMI, G.; YOSHIDA, K. (Ed.). *Field and Service Robotics*. Singapore: Springer, 2021. v. 16, p. 247 – 260. ISBN 978-981-15-9459-5. ISSN 2511-1256. 12th Conference on Field and Service Robotics (FSR 2019); Conference Location: Tokyo, Japan; Conference Date: August 29-31, 2019. Citado na página 15.
- INSPECTION, T. R. *The Taurob Inspector The world's most versatile data collecting robot*. 2022. Disponível em: <<https://taurob.com/taurob-inspector/technical-product-sheet>>. Acesso em: 31 mai 2022. Citado na página 20.

INSPECTION, T. R. *THE TAUROB INSPECTOR*. 2022. Disponível em: <<https://taurob.com/wp-content/uploads/2020/08/Technical-Product-Sheet.pdf>>. Acesso em: 31 mai 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.

INTEL. *Intel NUC 10 Performance Mini PC - NUC10i5FNKPA*. 2022. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/195505/intel-nuc-10-performance-mini-pc-nuc10i5fnkpa/specifications.html>>. Acesso em: 30 mai. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 27.

INTEL. *Intel NUC as a Digital Signage Player*. 2022. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/boards-kits/nuc/edge-compute.html>>. Acesso em: 29 mai. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 27.

LEDDYNAMICS. *A007/A008 Indus Star High-Power LED Light Module*. 2011. Disponível em: <[http://www.leddynamics.com/wp-content/uploads/2019/01/A007\\_A008\\_IndusStar\\_v2.1.pdf](http://www.leddynamics.com/wp-content/uploads/2019/01/A007_A008_IndusStar_v2.1.pdf)>. Acesso em: 31 mai. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 10, 29 e 30.

LEDDYNAMICS. *A009 BuckBlock High Output Wide Range LED Power Module*. 2017. Disponível em: <[http://www.leddynamics.com/wp-content/uploads/2018/11/A009\\_BuckBlock.pdf](http://www.leddynamics.com/wp-content/uploads/2018/11/A009_BuckBlock.pdf)>. Acesso em: 31 mai. 2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 10, 29 e 30.

MAXON. *MCD EPOS Intelligent compact drive*. 2016. Disponível em: <[https://www.maxongroup.com/medias/sys\\_master/root/8821076492318/16-440-441-442-EN.pdf](https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8821076492318/16-440-441-442-EN.pdf)>. Acesso em: 09 jun. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 24.

MAXON. *MCD EPOS, 60W Intelligent compact drive*. 2022. Disponível em: <<https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/326343>>. Acesso em: 09 jun. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 24.

METALTEX. *Relés automotivos MAD - Relé 1NA duplo 10A*. 2022. Disponível em: <<https://www.metaltex.com.br/produtos/componentes/reles-automotivos/mad-rele-1na-duplo-10a>>. Acesso em: 05 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.

NASA. *Mars Curiosity Rover*. 2022. Disponível em: <<https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/summary/>>. Acesso em: 05 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.

NETGEAR. *Data Sheet Gigabit Ethernet Plus Switches*. 2021. Disponível em: <[https://www.netgear.com/images/datasheet/switches/Gigabit\\_Ethernet\\_Plus\\_Switches\\_DS.pdf](https://www.netgear.com/images/datasheet/switches/Gigabit_Ethernet_Plus_Switches_DS.pdf)>. Acesso em: 07 jun. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 27.

NETGEAR. *GS105Ev2 — 5-Port Gigabit Ethernet Plus Switch*. 2022. Disponível em: <<https://www.netgear.com/support/product/GS105Ev2download>>. Acesso em: 07 jun. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 27.

PEAK-SYSTEM. *PCAN-USB - CAN Interface for USB*. 2022. Disponível em: <<https://www.peak-system.com/PCAN-USB.199.0.html?L=1>>. Acesso em: 06 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 25.

PRETO, S. M. de T. O. *MINA DU VELOSO*. 2022. Disponível em: <<https://turismo.ouropreto.mg.gov.br/atrativo/570>>. Acesso em: 07 jun 2022. Citado na página 56.

ROBOTICS, B. *Fathom Spool*. 2022. Disponível em: <<https://bluerobotics.com/store/cables-connectors/tether-management/tms-asm-kit-vp/>>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 31.

ROBOTICS, B. *Fathom-X Tether Interface Board Set*. 2022. Disponível em: <<https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/tether-interface/fathom-x-r1/>>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 10 e 31.

ROBOTICS, C. *Clearpath Robotics*. 2022. Disponível em: <<https://clearpathrobotics.com/>>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.

ROBOTICS, C. *Husky - UNMANNED GROUND VEHICLE*. 2022. Disponível em: <<https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.

ROBOTS. *Perseverance*. 2022. Disponível em: <<https://robots.ieee.org/robots/perseverance/>>. Acesso em: 05 jun 2022. Citado na página 15.

ROBOTS. *RHex*. 2022. Disponível em: <<https://robots.ieee.org/robots/rhex/>>. Acesso em: 06 jun 2022. Citado na página 16.

ROBOTS, I. *Deploy one of the most advanced robot!* 2022. Disponível em: <<https://www.intuitive-robots.com/spot-robot/>>. Acesso em: 06 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.

ROBOTS, S. *Inspection Robots*. 2022. Disponível em: <<https://www.superdroidrobots.com/robots/professional-inspection-robots>>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.

ROCHA, F. A. S. *Análise de mobilidade de um dispositivo robótico para inspeção remota de cavidades*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10066>>. Acesso em: 30 mai 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.

ROVER, L. *Leo Rover Hardware structure*. 2022. Disponível em: <<https://www.leorover.tech/documentation/hardware-structure>>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 21.

ROVER, L. *Leo Rover is an outdoor Robotics Development Kit*. 2022. Disponível em: <<https://www.leorover.tech/the-rover>>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.

TECHNOLOGIES, S. *DC Series Relays*. 2022. Disponível em: <<https://www.sensata.com/products/relays/1-dc-series-d2d07>>. Acesso em: 05 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.

THIAGO FILHO, A. M. d. S. *Implementação da plataforma tecnológica embarcada em um dispositivo robótico móvel para inspeção de ambientes confinados : Espeleorobô*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2599>>. Acesso em: 29 mai 2022. Citado 3 vezes nas páginas 9, 16 e 56.

TORRE, M. P. *Desenvolvimento e aplicação de robôs industriais e de serviço em processos de mineração*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13000>>. Acesso em: 31 mai 2022. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 56.

UBIQUITI. *airMAX 900 MHz Yagi Antenna Data Sheet*. 2018. Disponível em: <[https://dl.ubnt.com/datasheets/airmaxyagi/airMAX\\_900MHz\\_YAGI\\_Antenna.pdf](https://dl.ubnt.com/datasheets/airmaxyagi/airMAX_900MHz_YAGI_Antenna.pdf)>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 10, 30 e 31.

UBIQUITI. *airMAX Rocket M900*. 2018. Disponível em: <[https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketm/RocketM\\_DS.pdf](https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketm/RocketM_DS.pdf)>. Acesso em: 01 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 30.

VALE. *Conheça Salobo, o maior projeto de cobre da Vale*. 2022. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/conheca-salobo-maior-projeto-cobre-vale.aspx>>. Acesso em: 05 jun 2022. Citado na página 55.

VALE. *Mina do Cauê*. 2022. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/environmental-social/mina-do-caue/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 04 jun 2022. Citado na página 57.

WAGO. *Conector de Emenda Linha 222*. 2022. Disponível em: <<https://www.wago.com/br/conexao/conectores-de-emenda/linha222>>. Acesso em: 02 jun 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 37.

WETZEL, E. M. et al. A step towards automated tool tracking on construction sites: Boston dynamics spot and rfid. In: LEATHEM, T.; COLLINS, W.; PERRENOUD, A. (Ed.). *ASC2022. 58th Annual Associated Schools of Construction International Conference*. EasyChair, 2022. (EPiC Series in Built Environment, v. 3), p. 488–496. ISSN 2632-881X. Disponível em: <<https://easychair.org/publications/paper/hkMc>>. Citado na página 15.

# APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO DO ESPELEOROBÔ

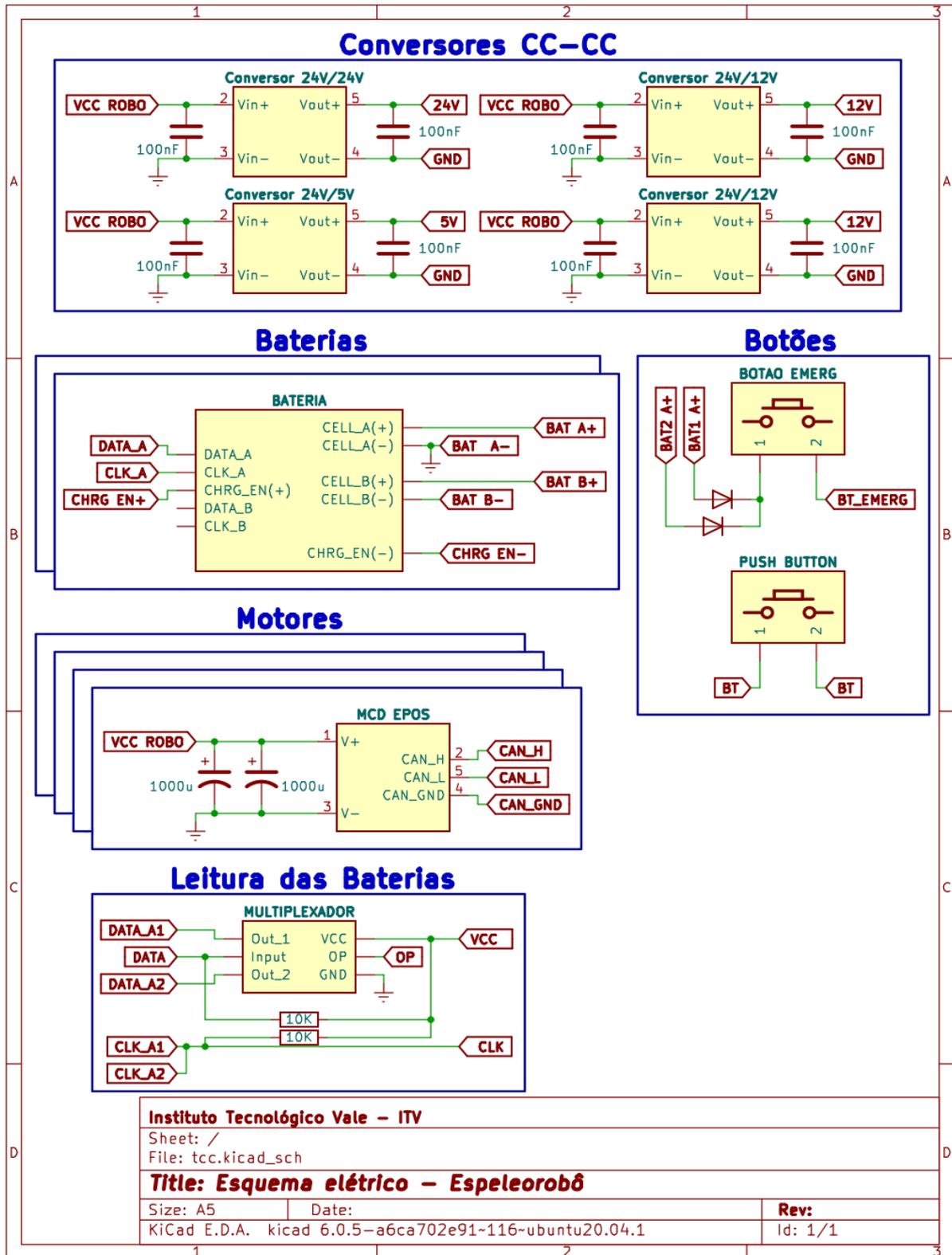


Figura 74 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor.

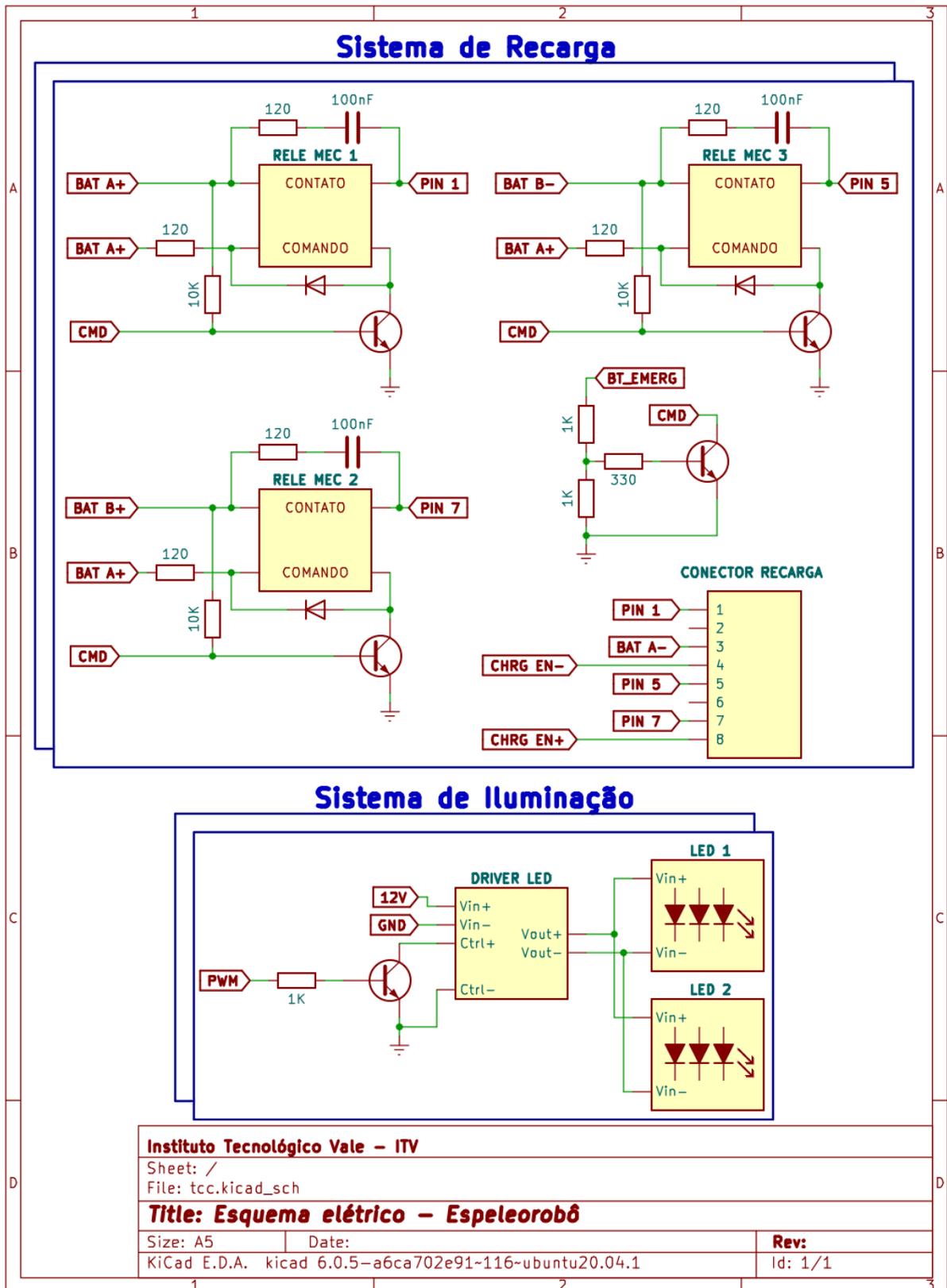


Figura 75 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor.

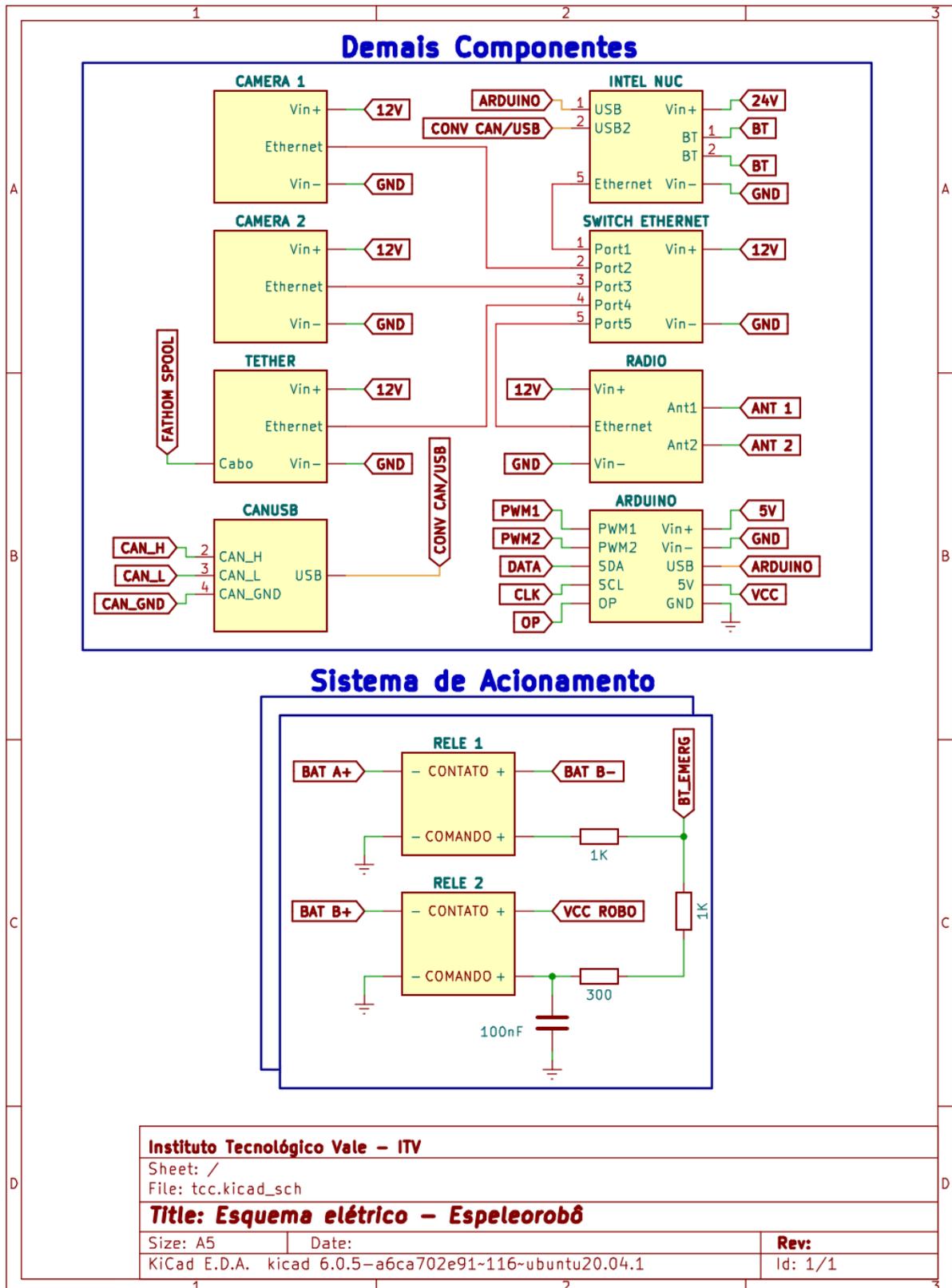


Figura 76 – Esquema elétrico do Espeleorobô. Fonte: O autor.

## APÊNDICE B – PARÂMETROS SMBUS

Tabela 13 – Parâmetros que podem ser lidos via SMBus. Fonte: [FORUM \(1998\)](#) - Adaptado.

Funções	Código em hexadecimal
<b>ManufacturerAccess()</b>	(0x00)
<b>RemainingCapacityAlarm()</b>	(0x01)
<b>RemainingTimeAlarm()</b>	(0x02)
<b>BatteryMode()</b>	(0x03)
<b>AtRate()</b>	(0x04)
<b>AtRateTimeToFull()</b>	(0x05)
<b>AtRateTimeToEmpty()</b>	(0x06)
<b>AtRateOK()</b>	(0x07)
<b>Temperature()</b>	(0x08)
<b>Voltage()</b>	(0x09)
<b>Current()</b>	(0x0A)
<b>AverageCurrent()</b>	(0x0B)
<b>MaxError()</b>	(0x0C)
<b>RelativeStateOfCharge()</b>	(0x0D)
<b>AbsoluteStateOfCharge()</b>	(0x0E)
<b>RemainingCapacity()</b>	(0x0F)
<b>FullChargeCapacity()</b>	(0x10)
<b>Run Time To Empty()</b>	(0x11)
<b>AverageTimeToEmpty()</b>	(0x12)
<b>AverageTimeToFull()</b>	(0x13)
<b>ChargingCurrent()</b>	(0x14)
<b>ChargingVoltage()</b>	(0x15)
<b>BatteryStatus()</b>	(0x16)
<b>CycleCount()</b>	(0x17)
<b>DesignCapacity()</b>	(0x18)
<b>DesignVoltage()</b>	(0x19)
<b>SpecificationInfo()</b>	(0x1A)
<b>ManufactureDate()</b>	(0x1B)
<b>SerialNumber()</b>	(0x1C)
<b>ManufacturerName()</b>	(0x20)
<b>DeviceName()</b>	(0x21)
<b>DeviceChemistry()</b>	(0x22)
<b>DeviceChemistry()</b>	(0x23)