

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E
ENGENHARIAS**

PEDRO HENRIQUE ULLIAN

**PROJETO DE INSTALAÇÃO DE ILUMINAÇÃO LED
ULTRAVIOLETA C PARA DESINFECÇÃO DO INTERIOR DE
ELEVADORES**

CAXIAS DO SUL

2023

PEDRO HENRIQUE ULLIAN

**PROJETO DE INSTALAÇÃO DE ILUMINAÇÃO LED
ULTRAVIOLETA C PARA DESINFECÇÃO DO INTERIOR DE
ELEVADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharelado em Engenharia Elétrica na Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mesquita

CAXIAS DO SUL

2023

PEDRO HENRIQUE ULLIAN

**PROJETO DE INSTALAÇÃO DE ILUMINAÇÃO LED
ULTRAVIOLETA C PARA DESINFECÇÃO DO INTERIOR DE
ELEVADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharelado em Engenharia Elétrica na Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado(a) em 05/07/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Mesquita
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Ricardo Leal Costi
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Ricardo Vargas Dorneles
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Este trabalho é dedicado à todos os cientistas e trabalhadores da área da saúde, que não medem esforços para salvar vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar pelo caminho da ética sempre com muita saúde e força.

Aos meus pais Janete Marcolim e Fernando Ullian, que não mediram esforços para me ajudar nessa etapa tão importante da minha vida. Sem eles com toda certeza não teria chegado até aqui.

Agradeço ao estimado Prof. Dr. Alexandre Mesquita, responsável pela orientação deste trabalho e por suas aulas nas disciplinas cursadas.

Aos meus familiares e amigos mais próximos, que sempre compreenderam minha ausência em certas ocasiões e ainda assim me incentivaram e ofereceram apoio.

Aos meus amigos de curso por toda colaboração e sugestões importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Hospital Geral de Caxias do Sul, que me possibilitou ter a ideia inicial para este projeto. E finalmente a todos meus amigos e colegas de trabalho que me ajudaram não só neste, mas também em muitos outros trabalhos da graduação.

"O que importa não é o que acontece, mas como você reage."

Epiteto

RESUMO

Este projeto refere-se ao desenvolvimento de um sistema de desinfecção das superfícies mais contaminadas de uma cabina de elevador através de iluminação por radiação ultravioleta C, sendo neste trabalho a área dos botões de seleção de andar. A desinfecção de superfícies com este método vem se tornando mais comum a cada dia devido a pandemia de COVID-19. Uma comparação entre as lâmpadas existentes no mercado possibilitou a escolha do LED UV-C com emissão de comprimento de onda de 275 nm provando ser o mais eficaz. Assim, foi desenvolvido um conversor CC/CC Ćuk em malha fechada para o acionamento de uma lâmpada germicida de 3,5 W de potência composta por cinco LEDs UV-C em série. Um detector de radiação UV-C mede a irradiação adequada. A exposição a este tipo de radiação, que apresenta sérios riscos a saúde, é evitada com o uso de dispositivos de segurança: um sensor fim de curso e dois detectores de movimento por infravermelho. As informações destes dispositivos são processadas por um microcontrolador que ativa a iluminação e conta o tempo necessário para a desinfecção. O desenvolvimento detalhado do protótipo do sistema junto dos testes realizados foram descritos. O sistema de desinfecção foi instalado numa cabine de elevador e foi obtido o resultado que a lâmpada germicida LED é capaz de inativar certos patógenos em cerca de 89 segundos a uma distância de 5 mm da superfície com a irradiância total de 11,25 mW/cm². Por fim, foram apresentadas as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Desinfecção. Elevador. Lâmpada germicida. LED Ultravioleta C. Segurança.

ABSTRACT

This project concerns the development of a disinfection system for the most contaminated surfaces of an elevator car through ultraviolet C radiation illumination, being in this work the area of the floor selection buttons. Disinfection of surfaces with this method has been becoming more common every day due to the COVID-19 pandemic. One comparison between existing lamps on the market made it possible to choose the UV-C LED with 275 nm wavelength emission proving to be the most effective. Therefore, it was designed a closed-loop DC/DC Ćuk converter has been added to drive a germicidal lamp of 3.5 W power consisting of five UV-C LEDs in series. A detector of UV-C radiation measures adequate irradiation. Exposure to this type of radiation, which causes serious health risks, is avoided with the use of safety devices: a limit switch sensor and two infrared motion detectors. The information from these devices is processed by a microcontroller that activates the lighting and counts the time required for the disinfection. The detailed development of the system prototype along with the tests carried out were described. The disinfection was installed in an elevator cabin and the result was obtained that the germicidal LED lamp is capable of inactivating certain pathogens in about 89 seconds at a distance of 5 mm from the surface with a total irradiance of 11,25 mW/cm². Finally, final considerations and proposals for future works were presented.

Keywords: *Disinfection. Elevator. Germicidal lamp. Ultraviolet C LED. Safety.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Espectro eletromagnético. | 21 |
| Figura 2 – Absorção da radiação ultravioleta na atmosfera terrestre. | 26 |
| Figura 3 – Princípio de funcionamento da lâmpada de mercúrio radiação germicida ultravioleta (GUV). | 28 |
| Figura 4 – Estrutura interna e esboço de um Diodo Emissor de Luz (LED). | 31 |
| Figura 5 – Principais parâmetros da fotometria. | 32 |
| Figura 6 – Configuração de fotodiodo para trabalhar em modo fotocondutivo. | 34 |
| Figura 7 – Detector de presença por infra-vermelho (IV) implementado com tecnologia piroelétrica. | 35 |
| Figura 8 – Estrutura e simbologia de uma chave fim-de-curso. | 35 |
| Figura 9 – Estrutura de um <i>driver</i> LED Corrente alternada (CA). | 36 |
| Figura 10 – Topologias de <i>drivers</i> LED. | 37 |
| Figura 11 – Diagrama em blocos de um <i>driver</i> linear. | 38 |
| Figura 12 – Controle de corrente numa carga LED com transistor MOSFET canal N. | 39 |
| Figura 13 – Controle de corrente numa carga LED com circuito integrado (CI) LM317. | 39 |
| Figura 14 – Conversor <i>Buck</i> | 41 |
| Figura 15 – Conversor <i>Boost</i> | 41 |
| Figura 16 – Conversor <i>Buck-Boost</i> | 42 |
| Figura 17 – Conversor <i>Flyback</i> | 42 |
| Figura 18 – Conversor $\dot{C}uk$ | 42 |
| Figura 19 – Matriz de LEDs controlada por Modulação por Largura de Pulso (PWM). | 44 |
| Figura 20 – Visão geral do microcontrolador ESP32 DEVKITV1. | 44 |
| Figura 21 – Composição e estrutura geral de uma cabina de elevador. | 47 |
| Figura 22 – Lâmpada LED Ultravioleta (UV) num encapsulamento T8. | 48 |
| Figura 23 – Esquemático preliminar do dispositivo SteriLightVent. | 48 |
| Figura 24 – Metodologia proposta. | 51 |
| Figura 25 – Série de LEDs Ultravioleta C (UV-C) proposta. | 51 |
| Figura 26 – Curva típica de Irradiância x I_f do LED UV-C proposto. | 52 |
| Figura 27 – Fonte de alimentação de dois estágios proposta. | 52 |
| Figura 28 – Disposição das lâmpadas e dos dispositivos de segurança na cabina do elevador. | 54 |
| Figura 29 – Dimensões, em mm, da lâmpada LED UV-C proposta. | 54 |
| Figura 30 – Fluxograma de operação do sistema proposto. | 56 |
| Figura 31 – Circuito do conversor $\dot{C}uk$ | 57 |
| Figura 32 – Etapas de operação do conversor $\dot{C}uk$ | 58 |
| Figura 33 – Formas de onda das etapas de operação do conversor $\dot{C}uk$ | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – Circuito do modelo térmico equivalente elétrico do transistor $Q1$ | 64 |
| Figura 35 – Circuito do modelo térmico equivalente elétrico do diodo $D1$ | 65 |
| Figura 36 – Circuito <i>Totem-pole</i> para acionamento do terminal <i>gate</i> de $Q1$ | 66 |
| Figura 37 – Circuito do amplificador inversor para resistor <i>shunt</i> | 66 |
| Figura 38 – Circuito do amplificador não-inversor para o sensor de radiação UV. | 67 |
| Figura 39 – Sensor de presença modelo HC-SR501. | 68 |
| Figura 40 – Sensor de radiação UV modelo UVM-30A. | 68 |
| Figura 41 – Botão para início de sistema. | 69 |
| Figura 42 – Luz indicativa de estado do sistema. | 69 |
| Figura 43 – Placa eletrônica confeccionada como protótipo. | 70 |
| Figura 44 – Esquema do microcontrolador ESP32 DEVKITV1. | 70 |
| Figura 45 – Resposta do sistema ao degrau unitário. | 71 |
| Figura 46 – Diagrama de Bode do sistema. | 72 |
| Figura 47 – Resposta do sistema ao degrau unitário com atuação do compensador P. | 72 |
| Figura 48 – Formas de onda na saída do conversor $\hat{C}uk$ | 74 |
| Figura 49 – Forma de onda da corrente nos indutores L_E e L_S | 74 |
| Figura 50 – Forma de onda da tensão no capacitor C | 75 |
| Figura 51 – Formas de onda no transistor $Q1$ | 75 |
| Figura 52 – Formas de onda no diodo $D1$ | 76 |
| Figura 53 – Formas de onda da tensão na entrada e na saída do amplificador inversor do resistor <i>shunt</i> | 76 |
| Figura 54 – Formas de onda da tensão na entrada e na saída do circuito <i>gate driver</i> | 77 |
| Figura 55 – Fluxograma de comportamento do <i>firmware</i> | 77 |
| Figura 56 – Fluxograma para implementação digital do compensador P. | 78 |
| Figura 57 – Montagem das duas situações utilizadas nos testes. | 79 |
| Figura 58 – Medição de V_S com o multímetro. | 81 |
| Figura 59 – Medição de V_S com o osciloscópio. | 81 |
| Figura 60 – Medição de I_S com o multímetro. | 82 |
| Figura 61 – Tensões no resistor de <i>shunt</i> medidas com o multímetro. | 82 |
| Figura 62 – Tensões no resistor de <i>shunt</i> medidas com o osciloscópio. | 83 |
| Figura 63 – Medição de V_C com o osciloscópio. | 83 |
| Figura 64 – Medição do sinal PWM com o osciloscópio. | 84 |
| Figura 65 – Medição do sinal no terminal <i>gate</i> de $Q1$ com o osciloscópio. | 84 |
| Figura 66 – Medição do sinal no terminal <i>drain</i> de $Q1$ com o osciloscópio. | 85 |
| Figura 67 – Medição do sinal no ânodo de $D1$ com o osciloscópio. | 85 |
| Figura 68 – Estrutura elaborada para o teste de irradiação UV-C. | 86 |
| Figura 69 – Gráfico do teste de irradiação UV-C. | 87 |
| Figura 70 – Teste em laboratório do sistema de desinfecção. | 87 |
| Figura 71 – Cabine do elevador utilizado para teste. | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figura 72 – Fontes de alimentação e placa eletrônica dentro da cabine. | 89 |
| Figura 73 – Lâmpada germicida LED e sensor de radiação UV-C. | 89 |
| Figura 74 – Esquema eletrônico completo. | 96 |
| Figura 75 – Roteamento da Placa de Circuito Impresso (PCI). | 98 |
| Figura 76 – Dispositivos de segurança do sistema. | 99 |
| Figura 77 – <i>Datasheet</i> do LED UV-C da fabricante <i>LucBei</i> | 100 |
| Figura 78 – Pico de emissão do comprimento de onda do do LED UV-C da fabricante <i>LucBei</i> | 101 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Cópias por mL de coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2) obtidos após diferentes tempos de exposição à luz UVC (254 nm) | 23 |
| Tabela 2 – Comprimentos de onda emitidos por gases excimer comuns. | 29 |
| Tabela 3 – Parâmetros dos três modelos de LEDs UV-C utilizados. | 48 |
| Tabela 4 – valor de redução logarítmica (LRV) de três topologias de iluminação UV. | 50 |
| Tabela 5 – Dados iniciais para projeto do conversor $\dot{C}uk$ | 60 |
| Tabela 6 – Medições realizadas com o multímetro. | 80 |
| Tabela 7 – Resultados dos testes de irradiação. | 86 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Resumo de aplicações da radiação UV. | 27 |
| Quadro 2 – Comparação das características das topologias de conversores Corrente contínua (CC)/CC. | 43 |
| Quadro 3 – Comparação das características de alguns modelos de microcontroladores. | 45 |
| Quadro 4 – Trabalhos relacionados abordados. | 46 |
| Quadro 5 – Comparação das características das topologias de iluminação UV. | 49 |
| Quadro 6 – Lista de componentes eletrônicos e demais peças. | 97 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AmpOp | Amplificador Operacional |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| CA | Corrente alternada |
| CC | Corrente contínua |
| CIE | Comissão Internacional de Iluminação |
| CI | circuito integrado |
| COVID-19 | coronavírus |
| EMI | interferência eletromagnética |
| GUV | radiação germicida ultravioleta |
| IV | infra-vermelho |
| LED | Diodo Emissor de Luz |
| LPM | mercúrio de baixa pressão |
| LRV | valor de redução logarítmica |
| MCC | Modo de Condução Contínua |
| MCD | Modo de Condução Descontínua |
| MOSFET | transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico |
| MPM | mercúrio de média pressão |
| NA | normalmente aberto |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| PCI | Placa de Circuito Impresso |
| PFC | correção do fator de potência |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| PWM | Modulação por Largura de Pulso |
| PTH | <i>Pin Through Hole</i> |
| quant. | quantidade |
| RDC | Resolução da Diretoria Colegiada |
| SARS-CoV-2 | coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 |
| SEPIC | <i>Single-ended primary inductance converter</i> |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| THD | distorção harmônica total |

TJB transistor de junção bipolar

UV Ultravioleta

UV-C Ultravioleta C

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| λ | Comprimento de onda em metros |
| J/m^2 | Joules por metro quadrado |
| nm | nanometros |
| Pa | pascal |
| V_f | queda de tensão direta do LED |
| V_{bc} | tensão de limiar |
| cd | candela |
| lm | lumen |
| W | watt |
| lx | lux |
| I_f | corrente direta do LED |
| E_e | irradiância em W/m^2 |
| V_E | tensão de entrada do conversor DC-DC |
| V_S | tensão de saída do conversor DC-DC |
| f_s | frequência de chaveamento |
| R_S | carga de saída do conversor DC-DC |
| η | eficiência do conversor DC-DC |
| ΔI_E | ondulação de corrente na entrada do conversor DC-DC |
| ΔI_S | ondulação de corrente na saída do conversor DC-DC |
| ΔV_E | ondulação de tensão na entrada do conversor DC-DC |
| ΔV_S | ondulação de tensão na saída do conversor DC-DC |
| d | <i>duty cycle</i> , do inglês, razão cíclica do conversor DC-DC |
| T_s | período de chaveamento |
| t_{on} | tempo em que o transistor fica ativado |

| | |
|-----------------|--|
| t_{off} | tempo em que o transistor fica desativado |
| I_S | corrente de saída do conversor DC-DC |
| P_S | potência de saída do conversor DC-DC |
| P_E | potência de entrada do conversor DC-DC |
| I_E | corrente de entrada do conversor DC-DC |
| L_E | indutor de entrada do conversor DC-DC |
| L_S | indutor de saída do conversor DC-DC |
| V_{Cmed} | tensão média no capacitor de entrada do conversor DC-DC |
| C | capacitor de entrada do conversor DC-DC |
| C_S | capacitor de saída do conversor DC-DC |
| I_{LEmax} | corrente máxima no indutor de entrada |
| I_{LEmin} | corrente mínima no indutor de entrada |
| I_{LSmax} | corrente máxima no indutor de saída |
| I_{LSmin} | corrente mínima no indutor de saída |
| I_{Tmax} | corrente máxima no transistor MOSFET |
| I_{Tmin} | corrente mínima no transistor MOSFET |
| I_{Tmed} | corrente média no transistor MOSFET |
| I_{Tef} | corrente eficaz no transistor MOSFET |
| V_{Tmax} | tensão máxima no transistor MOSFET |
| V_{Tmin} | tensão mínima no transistor MOSFET |
| I_{Dmed} | corrente média no diodo |
| I_{Def} | corrente eficaz no diodo |
| C_{SB} | capacitor <i>snubber</i> |
| $P_{Tcom(on)}$ | perdas por comutação durante o acionamento do transistor MOSFET |
| $P_{Tcom(off)}$ | perdas por comutação durante o desacionamento do transistor MOSFET |
| P_{cond} | perdas por condução |

I_G corrente necessária no *gate* do transistor MOSFET

V_{Shunt} tensão sobre o resistor *Shunt*

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA DO TRABALHO | 22 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 23 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 23 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 23 |
| 1.3 | LIMITAÇÕES DO TRABALHO | 24 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 24 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 26 |
| 2.1 | DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO UV | 26 |
| 2.2 | TOPOLOGIAS DE LÂMPADAS UV-C | 27 |
| 2.2.1 | Lâmpadas de mercúrio | 28 |
| 2.2.2 | Lâmpadas Excimer | 29 |
| 2.2.3 | Lâmpadas de xenônio pulsadas | 29 |
| 2.2.4 | LED | 30 |
| 2.3 | MEDIÇÕES | 31 |
| 2.3.1 | Fotometria | 32 |
| 2.3.2 | Radiometria | 32 |
| 2.4 | SENSORES | 32 |
| 2.4.1 | Detector de luz e radiação | 33 |
| 2.4.2 | Detector de movimento por IV | 34 |
| 2.4.3 | Sensores Fim de Curso | 34 |
| 2.5 | TOPOLOGIAS DE ACIONAMENTO DE LÂMPADAS GUV LED | 35 |
| 2.5.1 | Fonte de tensão | 37 |
| 2.5.1.1 | Controle passivo de corrente | 37 |
| 2.5.1.2 | Controle ativo de corrente | 38 |
| 2.5.2 | Fonte de corrente | 39 |
| 2.5.2.1 | Regulador Linear de corrente | 39 |
| 2.5.2.2 | Regulador Chaveado de corrente | 40 |
| 2.5.3 | PWM em matriz de LEDs | 43 |
| 2.6 | MICROCONTROLADOR | 43 |
| 2.7 | REQUISITOS TÉCNICOS NORMATIVOS | 44 |
| 2.7.1 | Equipamentos emissores de radiação UV-C | 45 |
| 2.7.2 | Elevadores | 46 |
| 2.8 | TRABALHOS RELACIONADOS | 46 |
| 2.9 | Considerações finais | 49 |

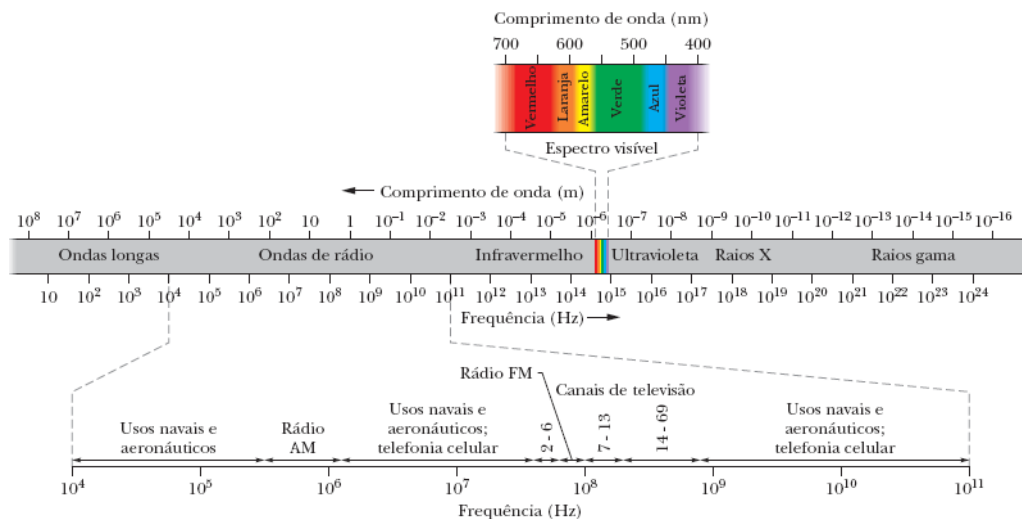
| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3 | PROPOSTA | 51 |
| 3.1 | Modelo e quantidade de LEDs UV-C | 51 |
| 3.2 | Projeto da lâmpada LED UV-C | 52 |
| 3.3 | Disposição e quantidade de lâmpadas | 53 |
| 3.4 | Localização dos dispositivos de segurança | 53 |
| 3.5 | Operação do sistema de desinfecção | 55 |
| 3.6 | Considerações Finais | 55 |
| 4 | IMPLEMENTAÇÃO | 57 |
| 4.1 | ANÁLISE E PROJETO DO <i>HARDWARE</i> | 57 |
| 4.1.1 | Conversor Ćuk | 57 |
| 4.1.1.1 | Análise qualitativa | 58 |
| 4.1.1.2 | Análise quantitativa | 58 |
| 4.1.1.3 | Perdas nos semicondutores | 63 |
| 4.1.1.4 | Gerenciamento térmico | 64 |
| 4.1.1.5 | Acionamento do transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico (MOSFET) | 64 |
| 4.1.2 | Amplificação de sinais | 65 |
| 4.1.2.1 | Resistor <i>shunt</i> | 65 |
| 4.1.2.2 | Radiação UV-C | 66 |
| 4.1.3 | Dispositivos de segurança e demais entradas e saídas | 67 |
| 4.1.3.1 | Sensor de presença | 67 |
| 4.1.3.2 | Sensor de radiação UV | 67 |
| 4.1.3.3 | Chave fim de curso | 68 |
| 4.1.3.4 | Botão para início de sistema | 68 |
| 4.1.3.5 | Luz indicativa de estado do sistema | 69 |
| 4.2 | PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO | 69 |
| 4.3 | PROCESSAMENTO E CONTROLE | 70 |
| 4.4 | SIMULAÇÕES DO <i>HARDWARE</i> | 73 |
| 4.5 | ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO <i>FIRMWARE</i> | 73 |
| 4.6 | Considerações Finais | 78 |
| 5 | RESULTADOS | 79 |
| 5.1 | Teste do conversor Ćuk | 79 |
| 5.1.1 | Tensão de saída | 80 |
| 5.1.2 | Corrente de saída | 80 |
| 5.1.3 | Tensão no resistor de <i>shunt</i> | 81 |
| 5.1.4 | Tensão no capacitor | 82 |
| 5.1.5 | <i>Gate Driver</i> | 83 |
| 5.1.6 | Tensão no transistor MOSFET | 84 |
| 5.1.7 | Tensão no diodo | 84 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | Teste de irradiação UV-C | 85 |
| 5.3 | Teste prático numa cabine de elevador | 87 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 90 |
| | REFERÊNCIAS | 92 |
| | APÊNDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO | 96 |
| | APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES | 97 |
| | APÊNDICE C – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO | 98 |
| | APÊNDICE D – DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA NO INTERIOR DA CABINE DO ELEVADOR. | 99 |
| | ANEXO A – PARTE DO <i>DATASHEET</i> DO LED UV-C ESCOLHIDO | 100 |
| | ANEXO B – TESTE DE ESPECTRO DO LED UV-C ESCOLHIDO . | 101 |

1 INTRODUÇÃO

As ondas eletromagnéticas possuem um largo espectro que apresenta divisão e denominação em concordância com a variação de λ e da frequência como mostra a Figura 1. A luz solar é a fonte predominante de radiações desse espectro apresentando a seguinte distribuição: 56% de infravermelho, 39% de luz visível e 5% de radiação ultravioleta. Apesar do Sol emitir essas três faixas, a luz visível, como o nome sugere, é a única faixa do espectro que a espécie humana consegue ver. Comprimentos de onda entre 400 e 100 nm estão fora dessa faixa e por se situarem logo após a cor violeta esta faixa de λ recebe o nome de UV. Tradicionalmente, a radiação UV é subdividida em: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) e UV-C (100-280 nm), cada qual com características intrínsecas. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016)(BALOGH *et al.*, 2011)

Figura 1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Apesar dos efeitos adversos da exposição a radiação UV, desde o século XIX são estudados seus benefícios, conforme afirma Hockberger (2000) em seu artigo A descoberta do efeito prejudicial da luz solar nas bactérias:

Entre 1877 e 1895, uma notável série de estudos revelou que a luz solar, especialmente a luz azul, violeta e radiação UV, eram capazes de matar diferentes tipos de bactérias. Estes estudos coincidiram com a descoberta de que algumas bactérias causaram ou levaram a doenças mortais[...], houve então muito interesse em desenvolver tratamentos para estas doenças, assim como desenvolver métodos para esterilizar alimentos, bebidas e instrumentos cirúrgicos.[...] (HOCKBERGER, 2000)

No início do século XX o médico e cientista Niels Ryberg Finsen recebeu o Prêmio Nobel da Medicina de 1903 pelo reconhecimento de sua contribuição para o tratamento de doenças

(especialmente lupus vulgaris, uma variação da tuberculose) utilizando a radiação da luz, o que abriu um novo caminho para as ciências médicas (Nobel Prize, 2021). Com esta motivação, mais estudos acerca do uso da radiação continuaram sendo realizados e cada vez mais se consolidava que o UV-C tinha ação germicida.

De acordo com um posicionamento da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) CIE (2020), a exposição à radiação necessária para desativar um agente infeccioso em 90 % (no ar ou em uma superfície) depende das condições ambientais (como a umidade relativa do ar) e do tipo de agente infeccioso. Varia tipicamente de 20 J/m² a 200 J/m² para lâmpadas de mercúrio que emitem predominantemente radiação a 254 nm.

Vários países começaram então a utilizar frequentemente fontes de UV-C para desinfetar salas de cirurgia e outros ambientes durante a noite. Esta ação, aliada ao uso de materiais poliméricos na saúde e a disponibilidade de antibióticos e vacinas é uma importante intervenção ambiental que pode reduzir tanto a propagação por contato quanto a transmissão de agentes infecciosos (como bactérias e vírus) através do ar. Os dispositivos emissores de UV-C podem ser unidades robóticas que se movimentam pelo área ou podem ser posicionados num local específico e acionados por um determinado período de tempo. (CIE, 2020)

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Recentemente o mundo vêm passando pela pandemia da doença coronavírus (COVID-19), que possui alta taxa de transmissão do vírus SARS-CoV-2, o qual já infectou mais de 29 milhões de brasileiros.(CORONAVÍRUS BRASIL, 2022) Além dessa pandemia, não é incomum a rápida disseminação de outras doenças, como a pandemia do vírus H1N1 em 2009 e a disseminação internacional de poliovírus em 2014.(ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAUDE, 2022)

Doremalen *et al.* (2020) enfatizam que o SARS-CoV-2 pode permanecer por mais de três dias em superfícies e persistir no ar por até três horas. Ambulatórios e hospitais são os principais ambientes de permanência do vírus, onde *mouses* de computadores, botões de acionamento de bebedouros e botões de elevadores aparecem como um dos pontos de maior foco de contaminação em hospitais. Wu *et al.* (2020) A empresa BioLambda, Científica e Comercial Ltda realizou um dos teste acerca da eficácia da radiação UV-C contra o COVID-19 em diferentes intervalos de tempo. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 1.

Como muitos pacientes suspeitos ou infectados com alguma doença infecciosa necessitam realizar exames de imagem, eles comumente são transportados para as salas de exames pelos elevadores. Se no hospital não houver elevadores específicos para este tipo de transporte, ele acaba sendo realizado pelo mesmo elevador em que circulam os acompanhantes e funcionários do hospital, o que aumentam ainda mais os riscos de contaminação. Por exemplo, no Hospital Geral de Caxias do Sul, após o transporte do paciente infectado com COVID-19, é realizada a higienização do interior do elevador com produtos desinfetantes que acabam de-

Tabela 1 – Cópias por mL de SARS-CoV-2 obtidos após diferentes tempos de exposição à luz UVC (254 nm)

| Tempo (s) | Dose UVC_{254nm} (mJ/cm²) | População (núm. de cópias) | Inibição viral (%) |
|------------------|---|-----------------------------------|---------------------------|
| 0 | 0 | 2.810.000.000 | 0 |
| 2 | 4,4 | 4.590.000 | 99,8366 |
| 30 | 66 | 18.700 | 99,9993 |
| 120 | 264 | 3.750 | 99,9999 |

Fonte: Adaptado de (Júnior, 2020)

gradando precocemente a estrutura e os botões do elevador, além de inviabilizar seu uso até a secagem e efetividade de desinfecção do mesmo. Quando esse fato acontece em horários em que há maior circulação (troca de turnos de funcionários, entrega de refeições e coleta de resíduos), forma-se um congestionamento nos elevadores.

Com base neste fato, o estudo proposto neste trabalho, que visa desenvolver iluminação LED UV-C para desinfecção do interior de elevadores, se justifica devido a radiação UV não deixar resíduos e nem degradar materiais, além de não precisar aguardar pela secagem dos ambientes. Com isso, desenvolver tal iluminação é uma importante intervenção ambiental que pode reduzir tanto a propagação por contato quanto a transmissão de agentes infecciosos através do ar.

1.2 OBJETIVOS

Com o intuito de direcionar a proposta deste trabalho para a melhor resolução possível, os objetivos foram separados em duas classes: objetivo geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo projetar um sistema capaz de desinfetar o interior de elevadores utilizando-se de iluminação LED UV-C.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para obter com êxito o objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) determinar o modelo e os parâmetros dos LEDs UV-C a serem utilizados para a desinfecção;
- b) desenvolver o conversor que atenda as características necessárias para o acionamento dos LEDs UV-C, a fim de fazer uma iluminação segura, mantendo os níveis corretos de corrente e tensão;

- c) projetar uma distribuição eficaz da iluminação UV-C, a fim de que atinja a maior parte da superfície do interior do elevador;
- d) desenvolver um sistema de segurança para que a iluminação UV-C não seja acionada caso haja alguma pessoa no interior do elevador;
- e) elaborar um protótipo de uma lâmpada LED UV-C;
- f) medir a eficiência de desinfecção da lâmpada LED UV-C sobre os botões de um elevador;
- g) comprovar o funcionamento do sistema de segurança.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) o uso inadequado de equipamentos emissores de luz UV podem causar sérios problemas à saúde humana, como lesões oculares e lesões dérmicas com potencial de carcinogênese. Sabendo-se desses efeitos adversos, este trabalho não apresentará testes com circulação de pessoas em elevadores reais. Assim, o foco será mantido no projeto da forma mais eficaz da iluminação das superfícies para desinfecção e no sistema de segurança para que nenhuma pessoa venha a receber a radiação acidentalmente.

As seguintes restrições são aplicadas ao presente trabalho com a finalidade de restringir-se aos objetivos já apresentados:

- O sistema a ser desenvolvido será aplicado para testes durante um período em que não haja a circulação de pessoas no elevador e;
- não há estipulação de tempo mínimo para desinfecção das superfícies devido a dificuldade de aquisição de LEDs UV-C de elevada potência ótica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, da seguinte forma:

- O Capítulo 1 apresenta a introdução acerca do assunto abordado, assim como a justificativa da escolha do assunto, os objetivos gerais e específicos estipulados e, por fim, as limitações do trabalho.
- O Capítulo 2 expõe o referencial teórico utilizado para entendimento da iluminação UV-C como germicida. Assim como as tecnologias, os sensores e meios de controle utilizados no projeto. Conclui com a apresentação de uma análise de trabalhos e sistemas relacionados com o projeto em questão.

- O Capítulo 3 apresenta a proposta detalhada do trabalho juntamente com a metodologia.
- O Capítulo 4 contempla a implementação do sistema, desde os cálculos, simulações e determinação de componentes práticos.
- O Capítulo 5 detalha os testes realizados e resultados obtidos.
- O Capítulo 6 conclui o trabalho evidenciando os aprendizados e dificuldades encontradas.
- Por fim, são apresentadas as referências, os apêndices e os anexos utilizados.

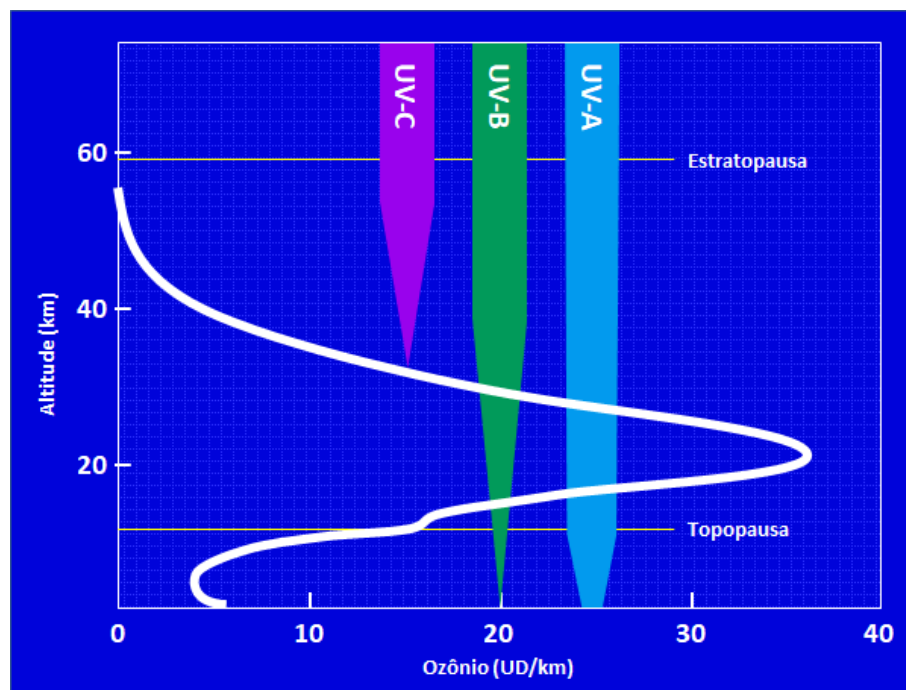
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem a finalidade de fundamentar a metodologia a ser utilizada no decorrer do desenvolvimento deste projeto. Além das principais lâmpadas emissoras de radiação UV-C, informações a respeito de elevadores, sensores de segurança e meios de controle são abordados, assim como as topologias de acionamento da iluminação germicida.

2.1 DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO UV

A desinfecção é um processo físico ou químico que destrói todos os microrganismos patogênicos de objetos inanimados e superfícies, com exceção de esporos bacterianos. O Quadro 1 compara as faixas de radiação UV citadas no Capítulo 1. A radiação UV-A é pouco absorvida na atmosfera e importante para o ser humano porque metaboliza a vitamina D no organismo apesar de provocar o envelhecimento precoce da pele a longo prazo. A Camada de Ozônio é responsável por absorver praticamente toda a radiação UV-B, permitindo que apenas uma pequena quantidade atinja o solo, mas o bastante para causar queimaduras, câncer de pele, danos à visão e modificação do DNA. Já a atmosfera terrestre absorve totalmente a radiação UV-C por causa da Camada de Ozônio e do oxigênio molecular (O_2), como pode ser visualizado na Figura 2, que mostra as quantias de radiação que atravessam os níveis de ozônio (DU/km) numa faixa de altitudes da superfície terrestre. (LEMES, 2014) (CIE, 2020)

Figura 2 – Absorção da radiação ultravioleta na atmosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de (LEMES, 2014).

Quadro 1 – Resumo de aplicações da radiação UV.

| | UVA | UVB | UVC |
|--------------------------|--|--|--|
| Comprimento de onda | 315-400 nm | 280–315 nm | 100–280 nm |
| Capacidade de penetração | Alto poder de penetração, pode penetrar vidros transparente e plásticos | Médio poder de penetração: comprimentos de onda mais curtos poderão ser absorvidos por vidro | Fraco poder de penetração |
| Aplicação | Terapia com radiação UV, impressão 3D, detector anti-falsificação, purificação de ar, fototerapia médica | Cuidados com a saúde e crescimento de plantas | Desinfecção, esterilização, purificação de água e ar |

Fonte: Adaptado de (HSU *et al.*, 2021).

A radiação UV-C é um tipo de desinfecção que ocorre por meio físico e está entre as tecnologias mais investigadas como alternativa aos procedimentos de desinfecção nos diversos tipos de ambientes e superfícies. (CCI, 1994) O comprimento de onda do UV-C, de 100 a 280 nm, é denominado de faixa germicida uma vez que efetivamente inativa bactérias e vírus.

Com energia suficiente para quebrar as ligações químicas do DNA, a radiação UV é absorvida pelo RNA, DNA e proteínas que compõem vírus, bactéria e outros patógenos. Os fótons UV-C absorvidos causam um dano significativo no sistema genômico dos microrganismos, evitando sua replicação e sobrevivência. Isso ocorre devido ao colapso da ligação adenina-timina, que resulta na formação da ligação covalente do dímero de pirimidina, entre duas adeninas, que promove o chamado desenovelamento do DNA, fazendo com que tudo se reorganize de forma desordenada que e evitando a replicação da célula. (BAGNATO, 2022) (LIANG *et al.*, 2021)

De acordo com (PAVIA *et al.*, 2018), foi associada uma redução de 44 % na incidência de infecções virais entre pacientes pediátricos no Hospital Infantil de St. Mary's, localizado em Bayside, Nova York. Equipamentos com lâmpadas UV-C foram incluídos como um complemento aos protocolos de limpeza padrão durante um período de doze meses; sem nenhuma outra nova intervenção introduzida durante esse período. Os resultados sugerem que a tecnologia UV-C é um componente potencialmente importante para eliminar no meio ambiente as infecções virais.

2.2 TOPOLOGIAS DE LÂMPADAS UV-C

Também denominadas lâmpadas de GUV, há décadas elas são utilizadas para desinfecção, portanto diversas tecnologias foram e continuam sendo desenvolvidas, cada uma com características próprias. Cada lâmpada pode emitir uma ampla gama de comprimentos de onda UV-C ou comprimentos bem específicos, como 254 nm ou 222 nm. Alguns modelos também emitem radiação visível e infravermelha. Logo, os comprimentos de onda emitidos podem afetar a eficácia de inativação dos vírus e impactam nos riscos de saúde e segurança associados às lâmpadas. (FDA, 2021, tradução nossa) As tecnologias das lâmpadas podem ser classificadas

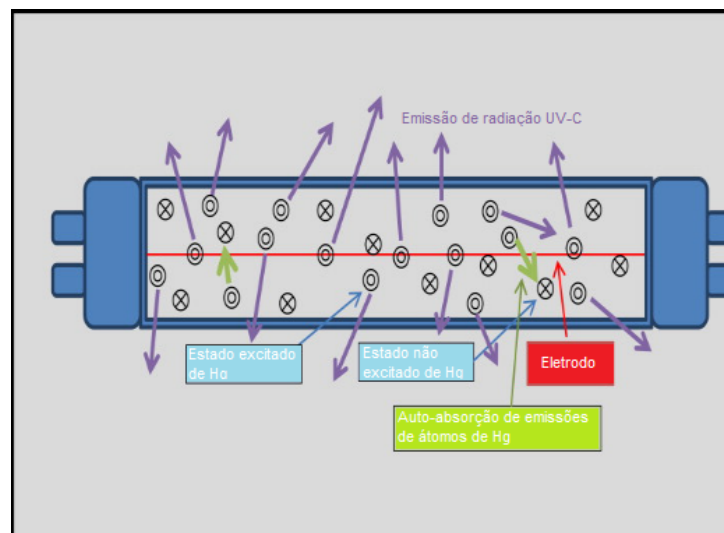
como de emissão contínua ou pulsada, sendo ambas efetivas para desinfecção. (IES, 2020) Assim, a análise da evolução das lâmpadas GUV e a comparação dos modelos existentes se faz necessária para fundamentar o uso do LED.

2.2.1 Lâmpadas de mercúrio

Historicamente, as lâmpadas de mercúrio são as mais comumente utilizadas nas aplicações germicidas comerciais. (SCHAEFER *et al.*, 2007) O principal comprimento de onda de emissão dessas lâmpadas é de 253,7 nm, que está próximo do pico de absorção do DNA (260 nm). (GREEN *et al.*, 2020)

O método mais prático de gerar radiação UV-C é através da passagem de uma corrente elétrica por um gás nobre (geralmente argônio) a baixa pressão (na ordem de 130 a 400 Pa) contendo vapor de mercúrio envolto em um tubo de vidro especial sem revestimento fluorescente. Esse modelo é chamado de lâmpada de mercúrio de baixa pressão (LPM), enquanto que modelos com o gás a pressões maiores que 400 Pa recebem o nome de lâmpadas de mercúrio de média pressão (MPM). Esse modelo é mais compacto e pode ser operada a potências por unidade de comprimento muito maiores que lâmpadas LPM, porém a eficiência na emissão de 253,7 nm é reduzida. (IES, 2020) A Figura 3 demonstra a passagem da corrente elétrica pelo gás e então a emissão de radiação UV-C.

Figura 3 – Princípio de funcionamento da lâmpada de mercúrio GUV.



Fonte: Adaptado de (LAGUNAS-SOLAR, 2014).

A eficiência UV da lâmpada LPM é de 34,6% enquanto que da lâmpada MPM é de 12,2%. Conseqüentemente, lâmpadas LPM tendem a ser utilizadas em aplicações de baixa potência, e lâmpadas MPM são utilizadas em aplicações de alta potência. (SCHAEFER *et al.*, 2007)

Segundo Schaefer *et al.* (2007) sua principal desvantagem está na necessidade de um tempo de aquecimento, que impede uma resposta rápida no acionamento. Além das preocupa-

ções quanto a possíveis contaminações do meio ambiente e da saúde com o mercúrio advindo da quebra e descarte incorreto das lâmpadas.

2.2.2 Lâmpadas Excimer

Pela descarga da barreira dielétrica, as lâmpadas excimer são produzidas com base em dímeros excitados por um gás nobre ou dímeros halógenos. Elas emitem uma alta potência de radiação numa estreita e definida faixa de comprimento de onda no espectro UV dependendo do preenchimento de gás nobre ou da mistura gasosa. (MATAFONOVA *et al.*, 2008) Tais emissões podem ser comparadas na Tabela 2. Sua eficiência UV pode chegar a 40% no caso da lâmpada com gás excimer Xe₂. Al-Gharabli *et al.* (2016)

Tabela 2 – Comprimentos de onda emitidos por gases excimer comuns.

| Gás excimer | Comprimento de onda |
|-----------------|---------------------|
| ArBr | 165 nm |
| Xe ₂ | 172 nm |
| ArCl | 175 nm |
| KrCl | 222 nm |
| KrF | 248 nm |
| XeBr | 282 nm |

Fonte: Adaptado de (PASCHOTTA, 2020)

Lâmpadas produzidas com o gás halogênio cloreto de criptônio (Kr-Cl) emitem radiação na região UV-C distante (205 a 230 nm), entretanto dependendo do envólucro de vidro, comprimentos de onda maiores podem ser também emitidos. Sua comercialização ainda é limitada quando comparada com as lâmpadas de mercúrio. (IES, 2020)

Quanto as vantagens, segundo Matafonova *et al.* (2008) esse modelo de lâmpada possui longa vida útil, liberdade geométrica para construção, alto fluxo luminoso e temperaturas de operação moderadas. E de acordo com Yamano *et al.* (2020) os comprimentos de onda UV-C menores emitidos, geralmente 207 e 220 nm, parecem ser inofensivos a pele de roedores, baseado na observação de que esse comprimento de onda menor não atinge o núcleo das células da epiderme (>10 μm) mas atinge o núcleo das bactérias (<1 μm).

2.2.3 Lâmpadas de xenônio pulsadas

Lâmpadas de xenônio pulsadas emitem um pulso curto de amplo espectro (incluindo UV, visível e infravermelho), e foram filtradas para emitir principalmente radiação UV-C. (FDA, 2021, tradução nossa)

Conforme explica Schaefer *et al.* (2007) elas são livres de mercúrio, tem capacidade instantânea para ligar e bom aumento na inativação das taxas de micróbios e redução de químicos

orgânicos devido a natureza pulsada da luz. Seu princípio de funcionamento é explicado pela descarga elétrica pulsada gerada entre dois eletrodos dentro de um envólucro de quartzo preenchido com xenônio. Uma fonte de energia pulsada serve tanto para iniciar a descarga elétrica plasmática pelo gás e para fornecer energia ao plasma que emite pulsos de luz.

Como esse tipo de lâmpada emite radiação em vários comprimentos de onda, sua eficiência foi estudada na faixa de 200 nm a 300 nm e diferentes tempos de pulso. A eficiência varia de 4,8% com pulsos de 796 μ s a 9% com pulsos de 71 μ s. Isso mostra que a eficiência aumenta com tempos de pulsos menores porque eles produzem uma densidade de energia maior dentro da lâmpada, o que aquece o plasma a altas temperaturas. Entretanto, essa operação reduz significativamente a vida útil da lâmpada. (SCHAEFER *et al.*, 2007)

2.2.4 LED

O LED é um dispositivo semicondutor que emite luz baseado numa junção P-N. As camadas do tipo P e do tipo N são usadas para injetar elétrons e formar lacunas (processo chamado de dopagem) entre a região ativa das camadas. Dependendo das propriedades dos materiais do diodo, o LED pode emitir fótons de múltiplos comprimentos de onda de acordo com o ajuste da estrutura epitaxial. A Figura 4 exemplifica sua estrutura interna e um esboço simplificado. Essa vantagem possibilita o uso do LED em inúmeras aplicações. De acordo com um relatório do UV (2020), o comércio do LED UV-C cresceu de US\$ 20 milhões em 2008 para US\$ 144 milhões em 2019 e estima-se que atingirá os US\$ 991 milhões em 2023. (KOUTCHMA; GREEN; POPOVIĆ, 2018) (HSU *et al.*, 2021)

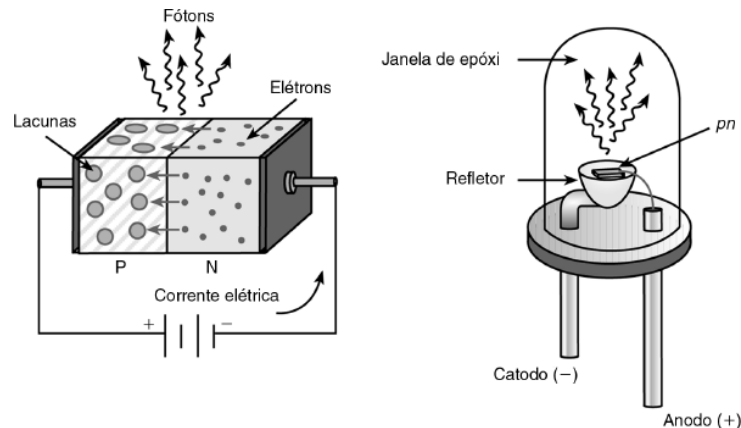
A queda de tensão direta (V_f) necessária para ligar um LED depende da sua cor e da corrente nominal. Por exemplo, a queda de tensão direta necessária para acender um LED vermelho é de 2 V, enquanto que para acender um LED azul é de 3 V. A queda de tensão exata depende do fabricante, dos diferentes materiais usados na dopagem e do comprimento de onda emitido. Consequentemente ela aumenta para LEDs UV-C, que possuem comprimentos de onda menores. (WINDER, 2016)

Os LEDs UV possuem as vantagens de serem pequenos e robustos, não contém mercúrio, vida-útil elevada, capacidade de ligar e desligar instantânea, operam a baixas temperaturas, controle da faixa de comprimento de onda emitida e acionamento CC. Sua eficiência é cerca de 43%. (GREEN *et al.*, 2020) (MCDERMOTT; WALSH; HOWARD, 2008) (JUAREZ-LEON *et al.*, 2020)

A radiação UV com LEDs é aplicada ou por luz contínua ou por luz pulsada. A luz contínua é mais comum e utiliza luz de baixa intensidade continuamente. Já a luz pulsada utiliza pulsos de alta intensidade de luz. Pela capacidade dos LEDs serem ligados e desligados numa alta e ajustável frequência, eles se tornam ideais em aplicações com radiação UV pulsada. (NYANGARESI *et al.*, 2019)

Num estudo realizado por Nyangaresi *et al.* (2019), a inativação da bactéria *E. coli* foi

Figura 4 – Estrutura interna e esboço de um LED.



Fonte: Adaptado de (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

comparada com a aplicação de radiação UV-C LED de 268 nm e 275 nm, sendo ela contínua ou pulsada (1, 5 e 10 kHz). Também foi comparada a temperatura atingida pela junção PN durante a operação dos LEDs, pois conforme a temperatura da junção aumenta, o comprimento de onda emitido pelo LED é deslocado. O resultado do estudo mostrou que na maioria dos casos a emissão contínua foi a que mais elevou a temperatura, de 29° C para 42° C no pior caso. E o comprimento de onda emitido não sofreu variações severas em nenhuma das comparações, variando de 267,7 nm a 270,1 nm para o LED de 268 nm e de 274,9 nm a 275,8 nm para o LED de 275 nm.

2.3 MEDIÇÕES

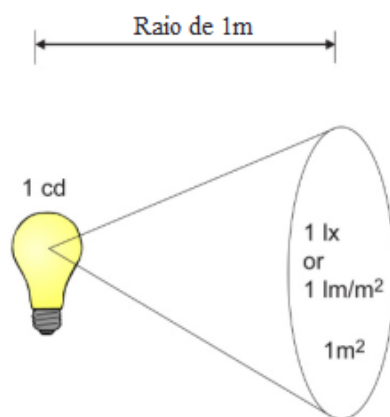
O processo de comprovação experimental é imprescindível para qualquer descoberta ou projeto que traga algum avanço à tecnologia. Logo, faz-se necessária a medição das grandezas físicas envolvidas. Dentre todas as classes das variáveis divididas por suas características físicas, este trabalho restringe-se as variáveis de radiação relacionadas à emissão e absorção de energia através do espaço. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

Segundo Balbinot e Brusamarello (2019b) optoeletrônica é a área da eletrônica responsável pelos dispositivos que emitem e detectam luz. Fontes de luz artificiais geram radiação eletromagnética utilizando uma corrente elétrica para excitar elétrons a níveis mais altos de energia. Quando um elétron muda de nível de energia, um fóton é emitido. Utilizando esse fóton emitido, os dispositivos detectores de luz, como, por exemplo, fototransistores, convertem radiação eletromagnética em corrente elétrica ou tensão elétrica. Na Seção 2.3.1 e na Seção 2.3.2 são abordados termos importantes para as medições e na Seção 2.4.1 os principais dispositivos utilizados.

2.3.1 Fotometria

A fotometria está relacionada à medição da luz visível. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a intensidade luminosa é medida em candela (cd), que nada mais é que a luz produzida por uma fonte luminosa que radia igualmente por todas as direções produzindo 1 lm/sr. O fluxo luminoso total é medido em lumens (lm), que é o equivalente fotométrico de 1 W, ajustado para corresponder a melhor maneira como o olho humano responde à radiação óptica. O comprimento de onda de 555 nm é onde acontece essa melhor resposta, assim 1 W é igual a 683 lm. Numa superfície, a luz com intensidade de 1 cd a 1 m de distância mede-se 1 lm/m² que é o equivalente a 1 lux (lx). A eficiência luminosa é medida em lm/W. Para melhor compreensão a Figura 5 apresenta esses parâmetros. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Figura 5 – Principais parâmetros da fotometria.



Fonte: Adaptado de (WINDER, 2016).

2.3.2 Radiometria

Conforme Balbinot e Brusamarello (2019b) a radiometria é a área de medição de qualquer radiação eletromagnética. O instrumento utilizado deve ter uma resposta espectral plana, pois ele mede a energia radiada de acordo com o comprimento de onda. A energia radiante é a energia que trafega em forma de uma onda eletromagnética, medida em joules. O fluxo radiante é a razão de transferência de energia radiante, medido em W.

O fluxo radiante, cuja unidade é o W/m², possui duas distinções: quando emitido por uma superfície, ele é denominado exitância radiante e quando o fluxo radiante está incidindo em uma superfície, é denominado irradiância.

2.4 SENSORES

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2019a) sensores, algumas vezes chamados de detectores, são dispositivos para medição de variáveis físicas de várias origens, como por exemplo ótica, mecânica ou eletromagnética. O processo de sensoriamento é um caso particular de

transmissão de informação, com transferência de energia, logo qualquer sensor é um conversor de energia. Então obtida, essa informação é processada por um instrumento de medição que apresenta o sinal de saída nas formas analógica ou digital.

Quanto a sua classificação, os sensores podem ser:

- Autogerador (passivo) que não precisa de energia adicional para operar e gera um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo.
- Modulador (ativo) precisa de uma fonte de energia externa para operar, e então essa energia é modificada pelo sensor para produzir o sinal de saída.

Na Seção 2.4.1, Seção 2.4.2 e Seção 2.4.3 são apresentados os modelos de detectores existentes que relacionam-se no desenvolvimento final deste trabalho.

2.4.1 Detector de luz e radiação

Os detectores de luz e radiação podem ser fotorresistores, fotodiodos ou fototransistores. O mais utilizado dos três é o fotodiodo pela sua ampla faixa de aplicações. Basicamente, ele é uma estrutura em junção pn na qual os fótons absorvidos geram elétrons e lacunas. Quando essa junção é iluminada e uma conexão é realizada de ambos os lados, sem nenhuma fonte de tensão externa, é gerada uma corrente elétrica proporcional à intensidade luminosa incidente.

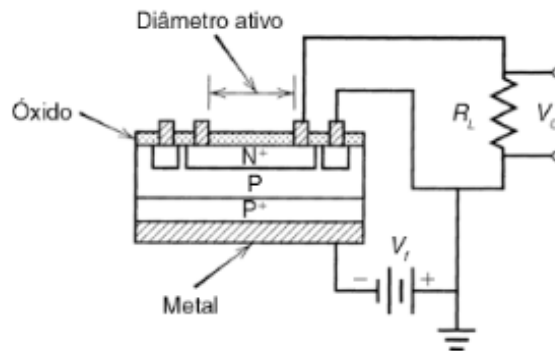
Para Balbinot e Brusamarello (2019b) o fotodiodo é geralmente conectado com um amplificador operacional, sendo que a escolha da configuração depende da resposta em frequência desejada no sistema de medição. Se o fotodiodo é configurado tal como mostra a Figura 6 e sua junção pn é iluminada, uma corrente elétrica composta de duas partes é gerada: uma corrente causada pela polarização reversa (permanece constante) e uma corrente (denominada fotocorrente) que varia linearmente com a intensidade da luz incidente. o fotodiodo que utiliza da junção Schottky é o ideal para medições de radiação, pois o material que ele é composto é sensível a comprimentos de onda do ultravioleta ao infravermelho.

Estes detectores medem os valores da irradiância de fontes de radiação UV-C. Com posse de tais valores é calculada a dose UV-C baseada no método matemático de modelagem padrão de luz UV usando a Equação 2.1:

$$UV_{dose} = E_e \times t, \quad (2.1)$$

onde UV_{dose} é a dose de radiação necessária em J/cm^2 , E_e é a irradiância em W/cm^2 e t é o tempo em segundos necessário para eliminar o microorganismo.

Figura 6 – Configuração de fotodiodo para trabalhar em modo fotocondutivo.



Fonte: Adaptado de (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

2.4.2 Detector de movimento por IV

Segundo Fraden (2004) os sensores IV são sensores passivos de movimento que operam na faixa óptica da radiação térmica e respondem ao calor irradiado entre o elemento sensor e o objeto em movimento. Qualquer objeto com temperatura superior ao zero absoluto emite radiação térmica e a intensidade desta radiação é governada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\phi = A\varepsilon\sigma T^4,$$

onde ϕ é o fluxo térmico do objeto, A é a área da superfície, ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ e T a temperatura do objeto.

Logo, o princípio da detecção de movimento por calor é baseado nessa lei.

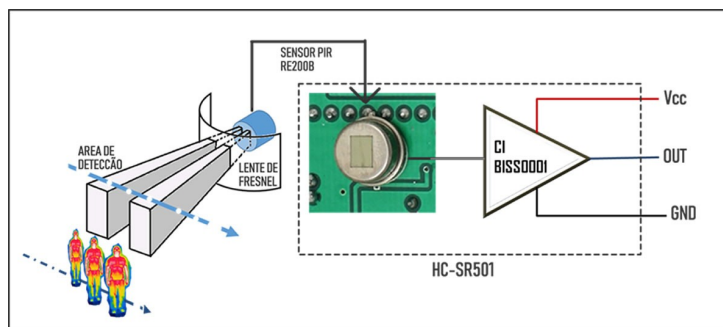
Para a detecção de movimento é necessário que a temperatura da superfície do corpo a ser detectado seja diferente da temperatura dos objetos ao redor, de forma que uma diferença térmica exista. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

Existem três tipos de elementos sensores que podem ser utilizados neste tipo de detector: termistores, termopilhas e piroelétricos, sendo os piroelétricos os mais utilizados devido a sua simplicidade, baixo custo e alta resposta. Esses sensores mudam a carga superficial em resposta à radiação recebida, resultando assim em uma tensão elétrica, e também não precisando esperar equilíbrio térmico quando a temperatura varia. A Figura 7 mostra um detector IV implementado com tecnologia piroelétrica. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

2.4.3 Sensores Fim de Curso

As chaves fim-de-curso são sensores ativos que acionam a partir de um contato físico. Sua operação acontece quando o eixo ou haste de acionamento da chave é deslocado por qualquer objeto que se mova. Uma vez deslocado, a saída deste sensor muda de estado chaveando

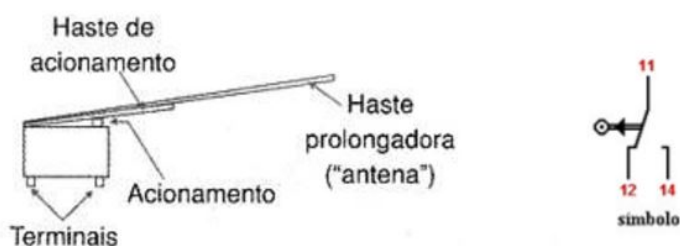
Figura 7 – Detector de presença por IV implementado com tecnologia piroelétrica.



Fonte: Adaptado de (SIMÕES, 2018)

assim um sinal elétrico externo. A Figura 8 mostra uma chave fim-de-curso comum. (MAZZAROPPI, 2007)

Figura 8 – Estrutura e simbologia de uma chave fim-de-curso.



Fonte: Adaptado de (Sala da Elétrica, 2017)

2.5 TOPOLOGIAS DE ACIONAMENTO DE LÂMPADAS GUV LED

Por serem praticamente iguais a LEDs comuns, os LEDs UV-C apresentam características como corrente CC nominal, variação da tensão dependendo da disposição dos LEDs e prejudicam pouco o meio ambiente. Conforme explica Winder (2016), há um ponto importante a ser cuidado na conexão de vários LEDs para projetar uma lâmpada:

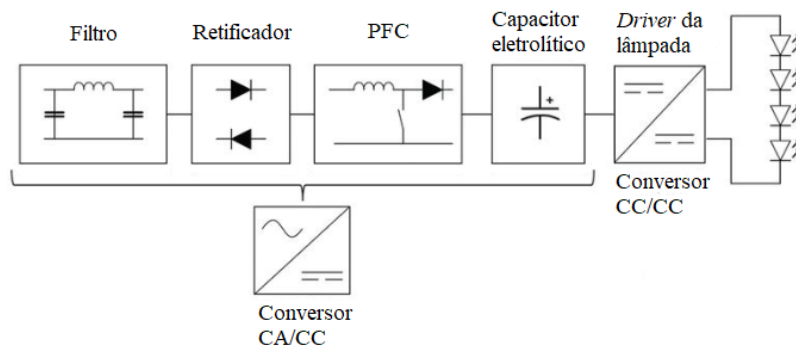
"Quando vários LEDs são utilizados para iluminação, eles são frequentemente conectados em sequência, consistindo de linhas paralelas de LEDs conectados em série. Quando as linhas estão em paralelo, a tensão de alimentação em todas as linhas é a mesma. No entanto, devido a variações de fabricação na tensão direta de cada LED a queda de tensão total de cada linha difere da outra linha da sequência."

Devido às variações de queda de tensão há variações de corrente nas linhas que fazem um LED aquecer mais do que outro. Se há uma diferença de temperatura entre LEDs, isso causará diferenças na queda de tensão de tensão direta. Geralmente a queda de tensão reduz aproximadamente $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ conforme a temperatura aumenta. Quando dois LEDs estão conectados em paralelo, o LED mais aquecido terá uma queda de tensão direta menor, assim circulará

mais corrente por ele gerando mais aquecimento. Portanto, a conexão de LEDs em sequência requer um bom acoplamento entre eles, que é obtido montando-os num substrato de cerâmica. (WINDER, 2016)

O estado da arte dos dispositivos que acionam uma lâmpada GUV LED possui dois estágios de conversão de energia: um estágio de conversão CA/CC monofásico que inclui retificação e correção do fator de potência (PFC) e um estágio de conversão CC/CC que permite o controle preciso da corrente elétrica que circula nos LEDs. Na Figura 9 é apresentada a estrutura de um *driver* LED CA.

Figura 9 – Estrutura de um *driver* LED CA.



Fonte: Adaptado de (GAGO-CALDERÓN; OREJÓN-SÁNCHEZ; HERMOSO-ORZÁEZ, 2018).

Na etapa de conversão CA/CC a função do filtro é suprimir altas frequências e distorção harmônica total (THD) provenientes da rede elétrica da entrada. Várias normas internacionais, por exemplo a IEC 61000-3-2-2019 e a IEEE 519-2014, indicam limites para as distorções harmônicas de corrente e de tensão.¹ Conforme a COMISSÃO INTERNACIONAL DE ELECTROTÉCNICA (2019), as luminárias GUV LED são classificadas como equipamentos classe C e toda luminária com potência maior ou igual a 5 W já deve respeitar certos limites de THD. O retificador é geralmente implementado com diodos em ponte completa e um capacitor, que convertem a rede elétrica de entrada CA para CC. O circuito PFC aumenta a razão entre a potência ativa e a potência reativa consumidas pelo *driver*. Afim de evitar a elevação de THDs e redução do fator de potência, segundo Winder (2016) usualmente é implementada a topologia de circuito *boost* isolada operando em Modo de Condução Contínua (MCC). Por fim, o capacitor eletrolítico reduz a tensão de *ripple* e ajuda para que não hajam curtas piscadas dos LED devido a quedas de tensão.

Na segunda etapa, para garantir condições estáveis de funcionamento, é necessário o uso de um dispositivo que controle a tensão e a corrente que circula pelos LEDs. Há três maneiras

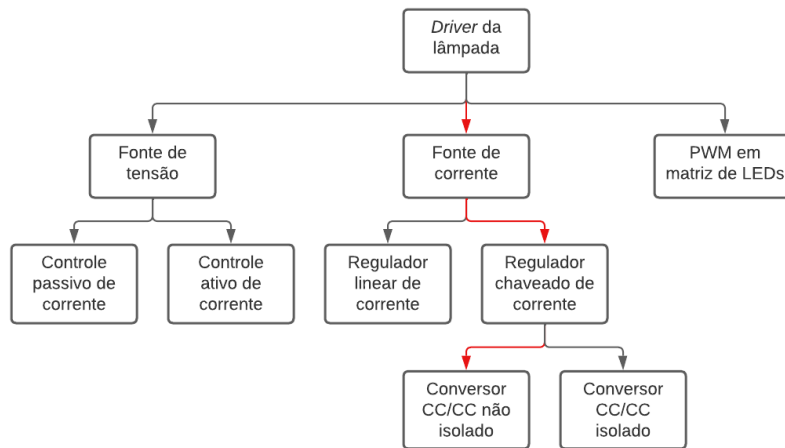
¹ De acordo com Antunes, Leão e Sampaio (2014) THDs são componente de tensão ou corrente cuja frequência é múltiplo inteira da frequência fundamental do sinal de alimentação (60 Hz, neste caso). São provocadas por motores e transformadores, pelo uso de equipamentos de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos (cargas não lineares).

de se obter esse controle:

1. Com um *driver* controlado por fonte de tensão.
2. Com um *driver* controlado por fonte de corrente.
3. Com um controle por PWM em matriz de LEDs.

Duas delas são subdivididas de acordo com o tipo de regulação. A Figura 10 destaca as topologias dos *drivers* LED a serem estudados.

Figura 10 – Topologias de *drivers* LED.



Fonte: O autor (2022).

2.5.1 Fonte de tensão

Devido a característica do LED se comportar como uma carga de tensão constante, a conexão deles em série resulta na divisão proporcional dessa tensão entre a quantidade de LEDs. Pela conexão em série, a mesma corrente circula por eles podendo ser controlada de maneira passiva ou ativa.

2.5.1.1 Controle passivo de corrente

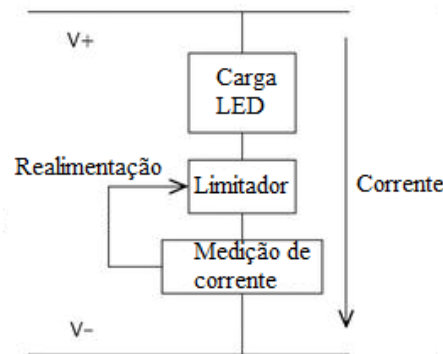
No método de controle passivo é simplesmente usado um resistor limitador de corrente em série com os LEDs. Se a fonte de alimentação estiver bem definida e com saída estável este é o método mais confiável. No entanto, toda a corrente elétrica passa por esse resistor, assim gerando bastante calor. E qualquer insatibilidade da fonte de alimentação o brilho dos LEDs varia notavelmente.

2.5.1.2 Controle ativo de corrente

Os métodos de controle ativos são mais complexos porém mais eficientes. Utiliza-se de dispositivos semicondutores e CIs para regular a corrente que circula pelos LEDs. (GAGO-CALDERÓN; OREJÓN-SÁNCHEZ; HERMOSO-ORZÁEZ, 2018) As topologias mais comuns serão descritas abaixo.

Driver de controle linear da lâmpada: a topologia ativa mais simples é a de controle linear em que utiliza-se um resistor de baixo valor como um sensor que mede continuamente a corrente que circula pelos LEDs e a partir desta medição realiza a realimentação e controla um transistor e realimentação que ajusta a intensidade da corrente. A Figura 11 ilustra um diagrama em blocos desse controle. (GAGO-CALDERÓN; OREJÓN-SÁNCHEZ; HERMOSO-ORZÁEZ, 2018)

Figura 11 – Diagrama em blocos de um *driver* linear.

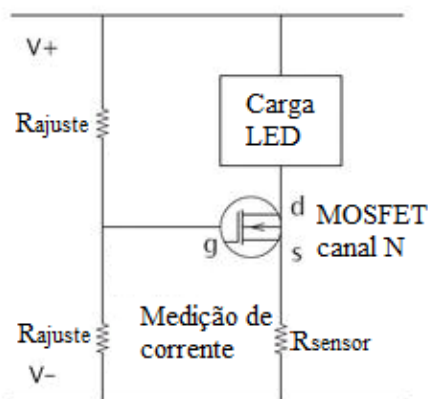


Fonte: Adaptado de (WINDER, 2016).

Modo de depleção com MOSFET: o controle de corrente geralmente é feito com transistores MOSFET canal N. No modo de depleção o MOSFET está ligado permitindo então a passagem da corrente quando a tensão entre *gate-source* é zero. Conforme apresenta a Figura 12, é usado um resistor como sensor de corrente conectado em série com o terminal *source*. Conforme a corrente passa pelo resistor, a queda de tensão nele aumenta e tensão no terminal *source* fica num potencial maior que a tensão no terminal *gate*. Até que em certo ponto, quando a queda de tensão atinge a tensão de limiar V_{th} do MOSFET, ele tenderá a bloquear a passagem da corrente, regulando-a. A principal desvantagem é que V_{th} possui uma elevada faixa de tolerância.

CI regulador de tensão: esses CIs utilizam como referência uma queda de tensão interna que oferece um modo mais preciso. A Figura 13 exemplifica um circuito. Nele, o CI LM317 é usado como um limitador de corrente. Através de seus três terminais: entrada (*in*), saída (*out*) e ajuste, com esse último acontece o controle de regulação da corrente com a ajuda de um resistor como sensor de corrente. Devido a conexão em série do resistor, a corrente que passa por ele é proporcional a corrente da saída. Logo, a tensão no terminal de ajuste será menor que a tensão no terminal de saída. Essa realimentação limita a corrente quando a tensão no terminal de ajuste atinge 1,25 V abaixo da tensão do terminal de saída. Sua desvantagem é a perda significativa de

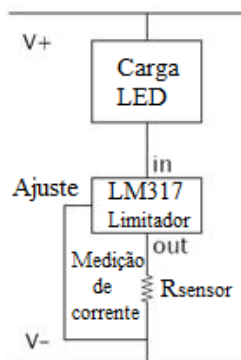
Figura 12 – Controle de corrente numa carga LED com transistor MOSFET canal N.



Fonte: Adaptado de (GAGO-CALDERÓN; OREJÓN-SÁNCHEZ; HERMOSO-ORZÁEZ, 2018).

eficiência devido a queda de tensão interna que é de algumas unidades de volts.

Figura 13 – Controle de corrente numa carga LED com CI LM317.



Fonte: Adaptado de (WINDER, 2016).

2.5.2 Fonte de corrente

Um *driver* LED regulado por corrente é a solução preferencial devido a característica da luminosidade variar de acordo com a corrente que circula pela série de LEDs. A tensão de alimentação quando comparada com a tensão necessária para acionar a série de LEDs é o que determina a melhor escolha para cada situação. Na Seção 2.5.2.1 e Seção 2.5.2.2 são discutidas as diferenças de *drivers* como fonte de corrente.

2.5.2.1 Regulador Linear de corrente

O *driver* regulador linear de corrente é preferível quando a tensão da série de LED está ligeiramente abaixo da tensão de alimentação. Por exemplo, quando a alimentação é diretamente

da fonte CA (220 V no Brasil), são necessários cerca de 100 LEDs de baixa corrente² em série. Com o uso de CIs, como o CL220 da *Microchip*, obtêm-se o acionamento de 66 LEDs com um bom fator de potência.

As razões de se optar por um regulador linear de corrente são: a ausência de quaisquer radiação interferência eletromagnética (EMI) e o baixo custo de implementação. Entretanto, uma baixa eficiência e problemas de aquecimento podem advir da diferença entre a tensão de alimentação e da série de LEDs. Logo, um dissipador de calor pode ser necessário, que é volumoso e encarece a implementação. (WINDER, 2016)

2.5.2.2 Regulador Chaveado de corrente

O conversor chaveado CC/CC é necessário para realizar a regulação de corrente no caso em que a tensão da série de LEDs é maior que a tensão de alimentação, ou quando ela é significativamente menor que a tensão de alimentação. (WINDER, 2016)

Esta topologia converte uma tensão CC de entrada V_e em uma tensão CC de saída V_s e regula a tensão CC de saída contra variações da linha e carga, além de outras funções. Eles operam a altas frequências de chaveamento que permitem obter respostas mais dinâmicas a rápidas a variações da corrente na carga e/ou na tensão de alimentação. (RASHID, 2001, tradução nossa)

Segundo Rashid (2001, tradução nossa), a razão de conversão CC/CC ocorre pelo chaveamento de chaves controladas para eletrônica de potência, como MOSFETs e transistor de junção bipolares (TJBs) de potência. A chave opera com uma razão de trabalho D definida pelo tempo que ela permaneça fechada t_{on} e o tempo que ela permanece aberta t_{off} conforme a frequência de chaveamento f e período $T = 1/f$. Além da chave controlada, os conversores CC/CC utilizam de elementos passivos como indutores. Dependendo da corrente que circula por eles, há dois modos de operação possíveis:

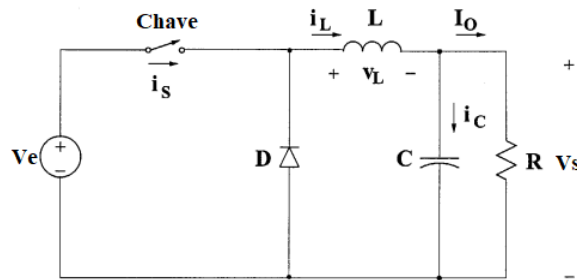
- MCC: a corrente no indutor é sempre maior que zero. É preferível pela eficiência e melhor aproveitamento das chaves e componentes passivos.
- Modo de Condução Descontínua (MCD): a corrente no indutor é zero durante uma parte do período de chaveamento. É mais utilizada em aplicações de controle especial em que a saturação do indutor não pode ocorrer.

A conversão CC/CC pode ocorrer com ou sem isolamento galvânica entre a fonte de entrada e a carga. A maioria das topologias não isoladas possui uma topologia semelhante isolada. As topologias mais comuns serão descritas a seguir:

² Para Winder (2016), LEDs de baixa corrente estão na faixa de 20 a 100 mA de corrente direta (I_f) e possuem mais eficiência que LEDs de alta corrente.

Conversor *Buck*: a topologia *Buck* mostrada na Figura 14 é utilizada em aplicações que a tensão V_s na carga é menor que a tensão V_e da fonte de alimentação. Segundo Winder (2016), V_s deve ser menor que 85% de V_e , caso contrário torna-se difícil de controlar V_s . Com essa característica é chamado de conversor rebaixador e aceita baixos, médios ou altos valores de V_e dependendo da modificação do circuito.

Figura 14 – Conversor *Buck*.

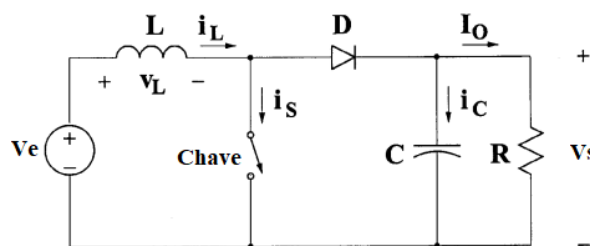


Fonte: Adaptado de (RASHID, 2001, tradução nossa).

Os modelos isolados mais populares do conversor *buck* são: o conversor *forward* que opera só com uma chave e deve contar com um enrolamento específico para a desmagnetização do transformador, evitando a saturação do núcleo; o conversor *push-pull* que opera com duas chaves; o conversor *half-bridge* que também opera com duas chaves mas utiliza dois capacitores na entrada que dividem igualmente V_e e, por fim o conversor *full-bridge* que substitui os capacitores do *half-bridge* por chaves controladas. (RASHID, 2001, tradução nossa) Devido a esses conversores serem indicados para aplicações com alta demanda de potência (maior que 500 W) (BARBI, 2001), que não é o caso deste trabalho, não será feita uma revisão mais detalhada sobre eles.

Conversor *Boost*: a topologia *Boost* mostrada na Figura 15 é utilizada em aplicações que a tensão V_s na carga é maior que a tensão V_e da fonte de alimentação. De acordo com Winder (2016), ele só deve ser utilizado quando V_s é 120% o valor de V_e . O MCC é ideal quando D é menor ou igual a 6, senão o MCD deve ser utilizado, mesmo que entregando menos eficiência.

Figura 15 – Conversor *Boost*.

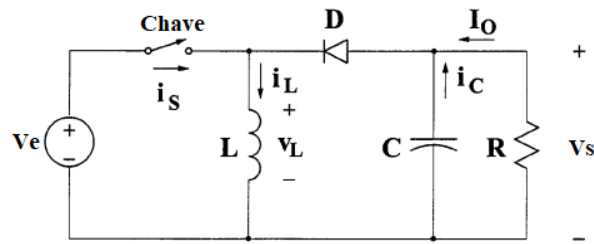


Fonte: Adaptado de (RASHID, 2001, tradução nossa).

Conversor *Buck-Boost*: a topologia *Buck-Boost* mostrada na Figura 16 permite elevar ou rebaixar V_e . Winder (2016) indica seu uso quando a razão da diferença entre V_e e V_s por V_s

é maior que 20% das variações de V_e , que geralmente é uma bateria.

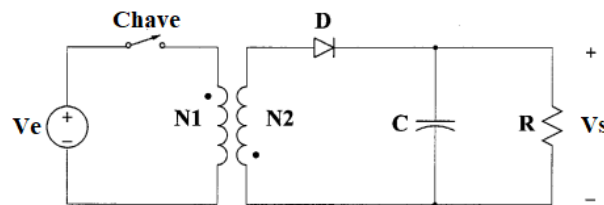
Figura 16 – Conversor *Buck-Boost*.



Fonte: Adaptado de (RASHID, 2001, tradução nossa).

Conversor *Flyback*: a topologia *Flyback* mostrada na Figura 17 é a versão isolada do conversor *Buck-Boost*. Geralmente é utilizado o MCD no qual o fluxo magnético é anulado em cada comutação, com isso não há saturação do núcleo. Outra vantagem do MCD é um valor de indutância menor comparado com o MCC. (WINDER, 2016)

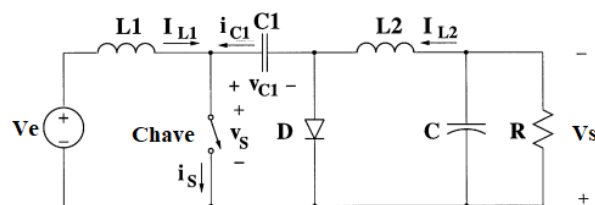
Figura 17 – Conversor *Flyback*.



Fonte: Adaptado de (RASHID, 2001, tradução nossa).

Conversor *Çuk*: a topologia *Çuk* mostrada na Figura 18 pode ser considerado como uma associação de um conversor *boost* com um conversor *buck*. Logo, há a possibilidade de operar como elevador ou redutor de tensão. A entrada e a saída apresentam características de fonte de corrente, sendo que V_s é invertida de V_e .

Figura 18 – Conversor *Çuk*.



Fonte: Adaptado de (RASHID, 2001, tradução nossa).

Um modelo isolado similar ao conversor *Çuk* é o conversor *Single-ended primary inductance converter* (SEPIC). Porém, a entrada apresenta característica de fonte de corrente, pequena ondulação de corrente e a saída apresenta característica de fonte de tensão que facilita o uso de múltiplos valores para V_s .

O Quadro 2 mostra as principais características e aplicações nos ramos de iluminação LED para cada uma das topologias de conversores CC/CC mostradas até então, a fim de auxiliar na escolha da melhor topologia a ser definida no Capítulo 3 deste trabalho.

Quadro 2 – Comparação das características das topologias de conversores CC/CC.

| Conversores CC/CC | | | | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|-------|--|
| Conversor | Característica de entrada | Característica de saída | Relação saída/entrada | Isolado | Custo | Aplicação |
| <i>Buck</i> | Fonte de tensão | Fonte de corrente | $V_s < V_e$ | Não | Baixo | Longa série de LEDs. |
| <i>Boost</i> | Fonte de corrente | Fonte de tensão | $V_s > V_e$ | Não | Baixo | LEDs de baixa corrente com baterias; LEDs de alta corrente em televisores. |
| <i>Buck-Boost</i> | Fonte de tensão | Fonte de tensão | $V_s < \text{ou} > V_e$ | Não | Baixo | Aplicações automotivas devido as variações da bateria. |
| <i>Flyback</i> | Fonte de tensão | Fonte de tensão | $V_s < \text{ou} > V_e$ | Sim | Médio | Tensões CA de entrada que necessitam isolamento. |
| Ćuk | Fonte de corrente | Fonte de corrente | $V_s < \text{ou} > V_e$ | Não | Médio | Série de LEDs que necessitam de corrente controlada; Aplicações automotivas. |

Fonte: O autor (2022).

2.5.3 PWM em matriz de LEDs

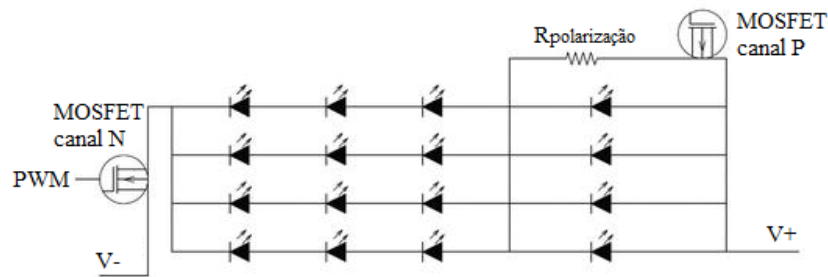
Essa topologia de acionamento e controle dos LEDs baseada em PWM é realizada com poucos componentes. Ainda assim é muito eficaz, pois garante uma temperatura segura dentro das condições de trabalho aceitando uma faixa de variações de tensão da fonte, que geralmente é uma bateria. A frequência do PWM deve assumir valores entre 0,5 kHz e 1 kHz, dessa maneira ela é alta o suficiente para evitar tremulações e baixa o suficiente para não produzir excessiva EMI.

Uma matriz de LEDs conforme a Figura 19 opera com um CI de baixo consumo, um sensor de temperatura e um MOSFET canal N. Este último assume o acionamento e desacionamentos dos LEDs, começando a operar com 100% do ciclo de trabalho. A medida que a temperatura aumenta ou a tensão da fonte varia, a realimentação negativa informa o sistema para ajustar o PWM. Uma redução do ciclo de trabalho implica numa redução da potência consumida e na luz emitida, mas também reduz o calor gerado nos LEDs. O MOSFET canal P conectado em paralelo com os primeiros LEDs de cada linha tem a função de desconectá-los por discretos instantes através de um segundo PWM. Isso só é realizado quando a tensão da fonte fica abaixo de certo valor (V_f do LED abaixo da nominal) que acarretaria luminosidade insuficiente.

2.6 MICROCONTROLADOR

De acordo com Penido e Trindade (2013) um microcontrolador é um computador em um único *chip*. Esse *chip* contém um processador, memória, periféricos de entrada e de saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, dentre outros. Por permitirem a reprogramação dos comandos executados, terem alto desempenho e baixa potência de consumo, os

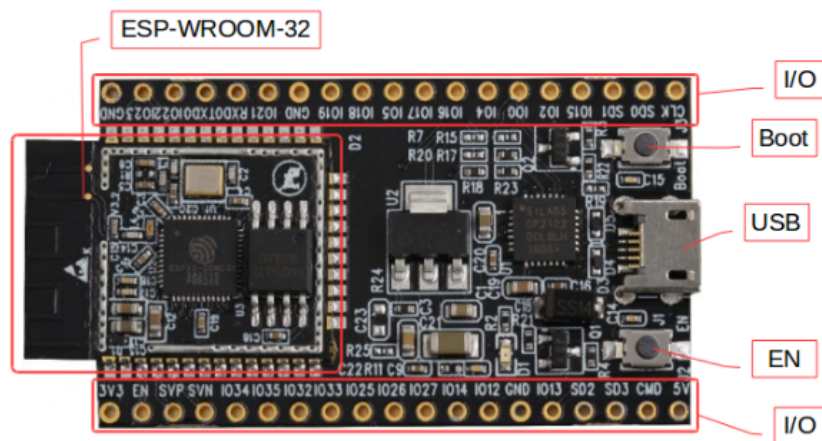
Figura 19 – Matriz de LEDs controlada por PWM.



Fonte: Adaptado de (GAGO-CALDERÓN; OREJÓN-SÁNCHEZ; HERMOSO-ORZÁEZ, 2018).

microcontroladores atendem a necessidade de sistemas computacionais compactos e de custo acessível a uma demanda específica. Atualmente, os maiores modelos e fabricantes são: a linha PIC da *Microchip*, a Intel MCS da *Intel*, o ESP32 da *Espressif Systems*, o STM32 da *ST Microelectronics*, o Raspberry Pi PICO da *Raspberry Foundation* e o Atmel AVR da *Atmel*, utilizado nos modelos *Arduino*. A Figura 20 apresenta a vista superior de um destes modelos.

Figura 20 – Visão geral do microcontrolador ESP32 DEVKITV1.



Fonte: Adaptado de (Espressif Systems, 2021).

Devido a segurança essencial para que a iluminação UV-C não ligue se houver pessoas no interior do elevador, é necessária a utilização de um microcontrolador, que centralizará as informações recebidas pelos detectores e será responsável pela tomada de decisão. Perante os diversos modelos existentes de microcontroladores, o Quadro 3 apresenta uma comparação das principais características de alguns modelos. Esta comparação é importante para a tomada de decisão no Capítulo 3 do melhor modelo que desempenhará as funções desejadas neste trabalho.

2.7 REQUISITOS TÉCNICOS NORMATIVOS

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável por desenvolver a normalização técnica. Essas normas, por si só, não são consideradas leis,

Quadro 3 – Comparação das características de alguns modelos de microcontroladores.

| Modelo | RaspberryPi PICO | Arduino NANO | STM32 Blue Pill | ESP32 DEVKIT V1 |
|---|----------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Microcontrolador | RP2040 Dual Core | ATMEGA 328 Single Core | FI03C8T6 Single Core | ESP32 Dual Core |
| Arquitetura do núcleo | ARM Cortex M0+ | RISC AVR | ARM Cortex M3 | XTENSA LX6 |
| <i>Clock</i> | 32-bit | 8-bit | 32-bit | 32-bit |
| | 48 MHz | 16 MHz | 72 MHz | 80 MHz |
| Memória RAM | 264 kB | 2 kB | 20 kB | 520 kB |
| Memória FLASH | 2 MB | 32 kB | 64 kB | 4 MB |
| EEPROM | Não possui | 1 kB | Não possui | 512 B |
| Tensão de alimentação | 5 V USB Micro tipo B | 5 V USB tipo B | 5 V USB Micro tipo B | 5 V USB Micro tipo B |
| Tensão de operação | 3,3 V | 5 V | 3,3 V | 3,3 V |
| Entradas/Saídas de propósito geral | 26 | 22 (14 digitais e 8 analógicas) | 36 | 37 |
| Portas ADC | 3 x 12-bit | 6 x 10-bit | 10 x 12-bit | 18 x 12-bit |
| Portas com SPI/I2C/UART | 2\2\2 | 1\1\1 | 2\2\3 | 4\2\3 |
| Portas PWM | 16 | 6 | 12 | 16 |
| Conexão sem fio | Não possui | Não possui | Não possui | <i>Wi-Fi e Bluetooth</i> |

Fonte: O autor (2022).

contudo a legislação exige o cumprimento de determinada norma em muitos casos. (ABNT, 2022)

Na área da saúde, a ANVISA é uma agência reguladora, vinculada ao Ministério da Saúde. Ela tem por finalidade controlar e avaliar a produção e o consumo de produtos submetidos à vigilância sanitária promovendo a proteção da saúde da população. (ANVISA, 2022)

O desenvolvimento deste trabalho requer que as normas e orientações vigentes para equipamentos emissores de radiação UV-C e elevadores sejam revisadas na Seção 2.7.1 e na Seção 2.7.2.

2.7.1 Equipamentos emissores de radiação UV-C

A ANVISA, por meio das Notas Técnicas 82/2020 (ANVISA, 2020) e 32/2021 (ANVISA, 2021), orienta sobre a avaliação de eficácia e segurança dos equipamentos emissores de radiação UV-C em ambientes públicos e de superfícies em geral com alegação de ação desinfetante, onde os seguintes requisitos importantes são destacados:

- **Regularização:** ainda não há regularização específica quanto a estes equipamentos, porém devido ao interesse à saúde humana, é importante a garantia da eficácia e da segurança dos produtos pelos fabricantes. Somente necessitam regularização os dispositivos emissores de luz UV destinados à desinfecção de instrumentais cirúrgicos e outros materiais usados em saúde são enquadrados como produtos para a saúde, na Classe de Risco II, conforme regra 15 da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 185, de 2001.
- **Comprovação da eficácia:** os principais métodos são testes conduzidos em laboratórios de microbiologia ou modelos de dose-resposta ou testes de eficácia ambiental ou estudos de resultados clínicos.

- **Validação:** requer o controle do tempo, da dose, da intensidade da radiação UV, taxa de fluxo e o estado da lâmpada (temperatura e vida útil). Análises de segurança elétrica, segurança mecânica e a compabilidade eletromagnética do dispositivo no ambiente de uso pretendido devem ocorrer.

Segundo a ANVISA, a regularização oficial será desenvolvida em processo regulatório específico, no âmbito da Agenda Regulatória 2021/2023 da Anvisa. Não há normas vigentes da ABNT que estabeleçam critérios para equipamentos emissores de radiação UV-C.

2.7.2 Elevadores

Há diversas normas ABNT vigentes com relação a construção, instalação e manutenção de elevadores. As características de interesse para realização deste trabalho são as dimensões mínimas exigidas. Para padronizar as dimensões será considerado um elevador de maca conforme NBR14712:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e transporte para pessoa portadora de deficiência (cadeira de rodas) conforme NBR13994:2000 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). A partir da visualização da Figura 21, o interior da cabina do elevador deve ter dimensões internas mínimas de 1500 mm de largura por 2200 mm de comprimento e altura livre mínima 2000 mm.

2.8 TRABALHOS RELACIONADOS

Motivados pela pandemia de COVID-19, muitos cientistas e pesquisadores se propuseram em desenvolver equipamentos de desinfecção de ambientes e superfícies com tecnologias mais avançadas e que prejudiquem menos o meio ambiente. Este é o caso do uso de LEDs GUV ao invés das mais empregadas atualmente lâmpadas de mercúrio. Neste capítulo, serão revisados diferentes trabalhos relacionados ao desenvolvimento de lâmpadas LEDs GUV porém, diferente da proposta deste trabalho, para nenhum ambiente em específico. O Quadro 4 apresenta resumidamente os trabalhos em questão:

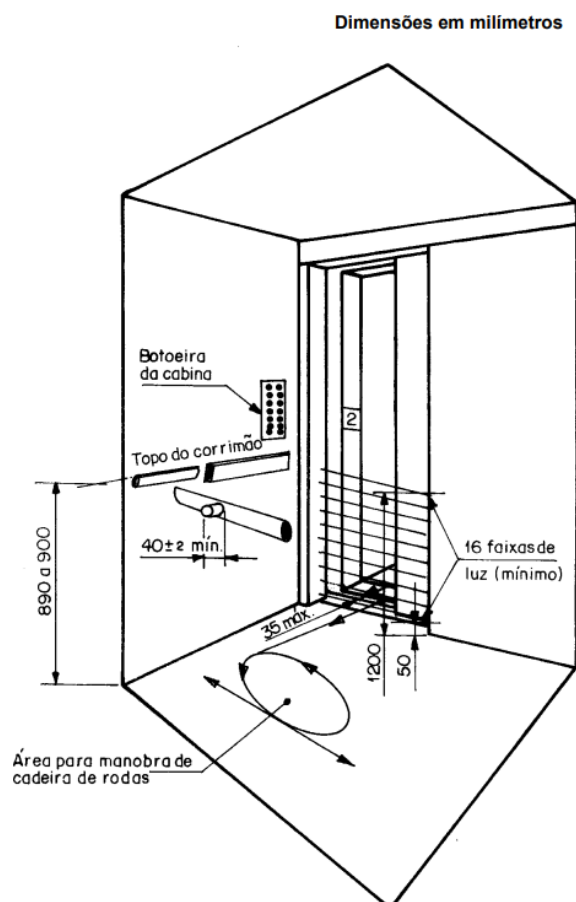
Quadro 4 – Trabalhos relacionados abordados.

| Autor | Trabalho | Comprimento de onda do LED UV |
|---|---|-------------------------------|
| (JUAREZ-LEON <i>et al.</i> , 2020) | Projeto e implementação de uma lâmpada LED GUV | 254 nm, 280 nm e 343 nm |
| (ZHURAVLEVA; NESTERKINA; KUZNETSOV, 2020) | Desenvolvimento de uma lâmpada ultravioleta LED de uso especial em um encapsulamento T8 | 370 nm |
| (CIUGUDEANU; BEU; BUZDUGAN, 2021) | SteriLightVent - Dispositivo híbrido de descontaminação por iluminação UV | Não especificado |

Fonte: O autor (2022).

Juarez-Leon *et al.* (2020), implementou em seu trabalho um *driver* LED com alimentação CA de 90-254 V. Este *driver* possui *soft-start* e um estágio de controle com PWM para manter a corrente constante nos LEDs UV-C. A eficiência final obtida foi de 83,55% com uma temperatura estável em regime permanente.

Figura 21 – Composição e estrutura geral de uma cabina de elevador.



Fonte: Adaptado de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Foram utilizados três modelos de LEDs UV-C no *driver* implementado com características apresentadas na Tabela 3. Entretanto, para fins comparativos a uma lâmpada GUV de mercúrio, somente para o modelo que emite o comprimento de onda de 254 nm foram realizados testes de irradiação com um módulo de sensor UV com capacidade de medição de 0 a 20 mW/cm². Um LED foi posicionado a diferentes distâncias do sensor e mediou-se uma capacidade máxima de radiação de 2 mW/cm² a 0,5 cm que é reduzida a 0,2 mW/cm² a 2,5 cm de distância. Aplicando Equação 2.1, seriam necessários 500 s de exposição, a uma distância de 0,5 cm, para eliminar o SARS-CoV-2.

Zhuravleva, Nesterkina e Kuznetsov (2020), desenvolveu um arranjo de LEDs UV num encapsulamento T8 a fim de substituir um modelo específico de lâmpada de mercúrio na faixa do UV-A nesse mesmo encapsulamento. Para obter a mesma intensidade de radiação e fluxo de 700 mW com o comprimento de onda de 370 nm, foram utilizados 12 LEDs UV de 370 nm com máxima potência ótica de 65 mW cada um e potência total do arranjo de 1,19 W. A lâmpada desenvolvida pode ser visualizada na Figura 22.

Assim como a lâmpada de mercúrio, o *driver* LED tem alimentação CA de 230 V, porém a corrente do arranjo de LEDs é de apenas 100 mA. Para garantir a radiação UV desejada foi

Tabela 3 – Parâmetros dos três modelos de LEDs UV-C utilizados.

| Parâmetro | Modelo do LED UV-C | | |
|----------------------------|--------------------|-----|------|
| Comprimento de onda (nm) | 254 | 280 | 343 |
| V_f (V) | 7,5 | 6 | 4,3 |
| I_f (mA) | 100 | 500 | 700 |
| Máxima potência ótica (mW) | 7 | 40 | 55 |
| Nº de LEDs na série | 10 | 15 | 20 |
| Potência total (W) | 7,5 | 45 | 60,2 |

Fonte: Adaptado de (JUAREZ-LEON *et al.*, 2020).

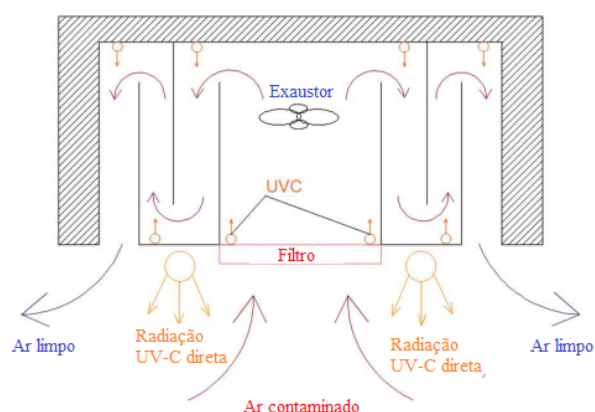
Figura 22 – Lâmpada LED UV num encapsulamento T8.



Fonte: Adaptado de (ZHURAVLEVA; NESTERKINA; KUZNETSOV, 2020).

ecolhido um tubo de vidro especial para a transmissão de radiação na faixa de comprimento de onda de 350 a 400 nm. Em regime estacionário a potência da lâmpada obtida foi de 1,4 W com fluxo de 705 mW. Não foram realizados testes de dose UV por que a lâmpada desenvolvida não emite radiação na faixa do UV-C. No entanto, os autores concluíram que a lâmpada LED consome sete vezes menos energia e tem uma vida útil esperada mais longa (5 vezes) que a lâmpada GUV de mercúrio.

Figura 23 – Esquemático preliminar do dispositivo SteriLightVent.



Fonte: Adaptado de (CIUGUDEANU; BEU; BUZDUGAN, 2021).

Ciugudeanu, Beu e Buzdugan (2021) propõem o desenvolvimento de um dispositivo de descontaminação híbrido que combina duas difentes maneiras de desinfecção por radiação UV-C: desinfecção de superfícies por radiação direta quando não há pessoas no local e do ar contaminado no espaço através de filtros e fontes UV-C localizadas em espaços fechados do

dispositivo, assim podendo funcionar mesmo com a presença de pessoas no local. A Figura 23 mostra um esquemático preliminar do dispositivo. Para validação do dispositivo híbrido, testes e estudos de eficiência e duração de exposição requerida para a inativação dos patógenos serão conduzidos em laboratório e nos locais pretendidos de instalação do mesmo.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram revisados os assuntos pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho. Acerca das diferentes topologias de iluminação UV-C discutidas na Seção 2.2 foi elaborado o Quadro 5 para melhor visualização das vantagens do uso de LEDs para desinfecção. Outro importante motivo é que em 2013 na convenção de Minamata sobre mercúrio, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) decidiu proibir, até 2020, novos produtos contendo mercúrio para o bem-estar da saúde humana e do meio ambiente.

Quadro 5 – Comparação das características das topologias de iluminação UV.

| Característica | Lâmpadas de mercúrio | Lâmpadas Excimer | Lâmpadas de xenônio pulsadas | LEDs |
|-------------------------------|---|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Vida útil | Curta | Longa | Curta | Longa |
| Comprimentos de onda emitidos | Várias faixas UV, precisam de filtros para exatidão | Estreitos e definidos | Amplo espectro (visível, IV e UV) | Estreitos e definidos |
| Tipo de acionamento elétrico | AC | AC | AC | DC |
| Custo benefício | Baixo | Médio | Baixo | Alto |
| Perdas de energia | Muito calor gerado | Moderada | Depende da frequência dos pulsos | Econômico |
| Resistência mecânica | Frágil, feitas de vidro | Frágil, feitas de vidro | Frágil, feitas de vidro | A choque e vibração |
| Iluminação | Desfocada, desigual | Desfocada | Desfocada, desigual | Focada |

Fonte: O autor (2022).

Liang *et al.* (2021) realizou experimentos de efetividade na desinfecção de SARS-CoV-2 com três topologias de lâmpadas diferentes. O LRV viral ³ obtido nas amostras é apresentado na Tabela 4.

Observando a Tabela 4, o LED UV-C (275 nm) foi a topologia mais efetiva na desinfecção de SARS-CoV-2 mesmo com uma intensidade menor (79,8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) que a da lâmpada de mercúrio (850 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$). Segundo Liang *et al.* (2021) tal efetividade se deve ao fato do comprimento de onda de 275 nm ser o pico de absorção do RNA/DNA, assim desintegrando as funções protéicas e inativando o vírus.

Acerca das topologias de acionamento de lâmpadas UV LED abordadas na Seção 2.5 pode concluir-se que pela necessidade da radiação UV emitida ser constante, a corrente nos

³ O termo "redução logarítmica" é uma expressão matemática dada por: $LRV = \log_{10}(\text{quant. microbiana inicial}) - \log_{10}(\text{quant. microbiana final})$. Com ela calcula-se a quantidade (quant.) relativa de micróbios que são eliminados pela desinfecção. Uma redução de 1-Log significa que 90% de um determinado micróbio foi eliminado com uma redução de 10 vezes na população microbiana. Uma redução de 2-Log resulta em 99%, ou uma redução de 100 vezes na população microbiana.

Tabela 4 – LRV de três topologias de iluminação UV.

| Tempo de exposição | LRV | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|
| | 5 s | 10 s | 20 s | 40 s |
| LED UV-C (275 nm) | 4,23 | >6 | >6 | >6 |
| Lâmpada de mercúrio (254 nm) | 1,17 | 3,34 | >6 | >6 |
| Lâmpada excimer (222 nm) | 0,33 | 0,6 | 1,83 | 1,33 |

Fonte: Adaptado de (LIANG *et al.*, 2021)

LEDs deve ficar o mais próximo possível do valor de I_f e o aquecimento dos LEDs deve ser evitado. Assim, uma das topologias apresentadas na Seção 2.5.2.2 é a melhor opção devido a alta eficiência e regulagem precisa da corrente na carga.

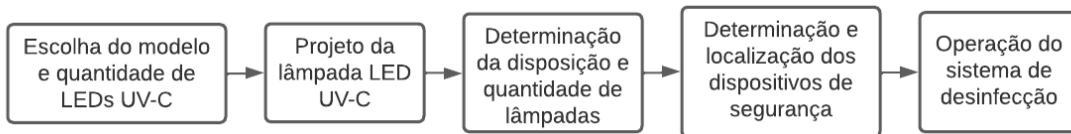
Mediante revisão dos trabalhos relacionados abordados na Seção 2.8, observa-se que a preocupação com a desinfecção de locais contaminados com patógenos aliada a longa vida útil dos LEDs e a qualidade do meio ambiente está resultando no desenvolvimento de dispositivos cada vez mais eficazes.

Após uma pesquisa realizada na *internet*, foram encontrados alguns modelos de lâmpadas GUV LED e dispositivos sendo comercializados porém, com pouca comprovação científica acerca da eficácia. Testes e validações se fazem necessários para qualquer nova lâmpada, pois os LEDs permitem ser fabricados para emitir comprimentos de onda específicos de modo que o controle da corrente e temperatura deve ser levado em conta. Assim, é garantida a dose UV esperada.

3 PROPOSTA

Este capítulo tem a finalidade de apresentar a proposta de um projeto de instalação de iluminação LED UV-C para desinfecção do interior de elevadores. A metodologia a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho pode ser visualizada de forma resumida na Figura 24 e com base nessa sequência de processos ela será descrita com mais detalhes nas próximas seções.

Figura 24 – Metodologia proposta.



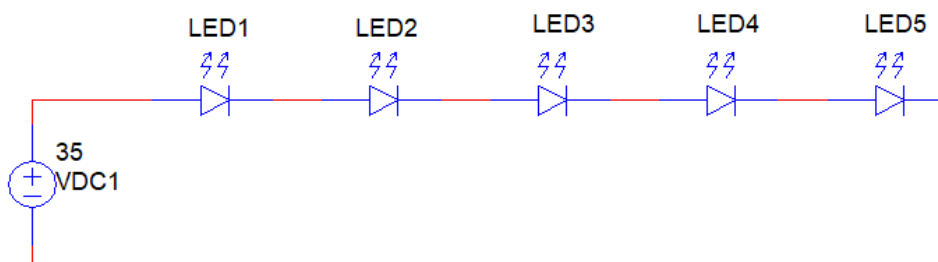
Fonte: O autor (2022).

3.1 MODELO E QUANTIDADE DE LEDs UV-C

Conforme revisão realizada no Capítulo 2 e dados da Tabela 4, o modelo de LED UV-C proposto possui emissão de radiação no comprimento de onda de 275 nm. Um modelo apropriado é o de 275 nm da fabricante *LucBei*. De acordo com o *datasheet* do Anexo A, o LED UV-C é acionado com I_f de 100 mA e V_f de 5 a 8 V. O fluxo radiante com este valor de I_f varia de 7 a 10 mW, assim como o pico do comprimento de onda que varia de 265 a 315 nm. No entanto, o fabricante realizou testes que indicam o pico exatamente em 277,1 nm, com I_f de 100 mA e V_f de 6,896 V, resultando numa potência de 689,6 mW conforme pode ser visualizado no Anexo B.

Para a implementação da lâmpada GUV proposta serão utilizados cinco LEDs conectados em série conforme pode ser visualizado na Figura 25. De acordo com o *datasheet*, $V_f = 7$ V e $I_f = 100$ mA, são necessários para a operação adequada. Logo, a série precisará de 35 V de tensão e 100 mA de corrente, que resulta numa potência total de 3,5 W.

Figura 25 – Série de LEDs UV-C proposta.

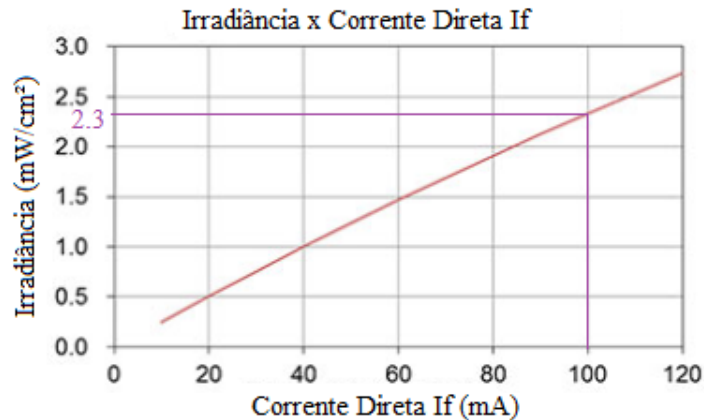


Fonte: O autor (2022).

A irradiância E_e típica do modelo de LED UV-C proposto é de 2,3 mW/cm² e está traçada na Figura 26. Utilizando a Equação 3.1, os cinco LEDs emitem uma irradiância total E_{eTotal} de 11,5 mW/cm².

$$E_{eTotal} = N_{LEDs} \times E_e, \quad (3.1)$$

Figura 26 – Curva típica de Irradiância x I_f do LED UV-C proposto.



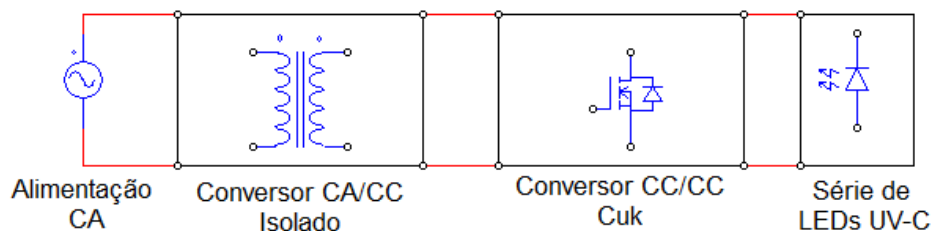
Fonte: Adaptado de *LucBei* (2022).

De acordo com *Narla et al.* (2020), exposições UV-C de 1 J/cm² são capazes de desinfetar máscaras com filtro N95 contaminadas com o vírus influenza e SARS-CoV-2. Então, para uma dose UV-C de 1 J/cm² e uma irradiância de 11,5 mW/cm², utilizando a Equação 2.1, determina-se um tempo aproximado de 87 segundos para a inativação destes patógenos.

3.2 PROJETO DA LÂMPADA LED UV-C

A fim de ligar os LEDs UV-C respeitando a operação adequada para uma longa vida útil em termos de temperatura propõe-se uma fonte de alimentação de dois estágios conforme a Figura 27.

Figura 27 – Fonte de alimentação de dois estágios proposta.



Fonte: O autor (2022).

No primeiro estágio um conversor CA/CC realiza o rebaixamento da tensão de alimentação CA de 90 a 230 V. A fim de evitar distúrbios advindos da alimentação de entrada para o segundo estágio, ele possui isolamento galvânica, filtro EMI e PFC.

Então, o segundo estágio é um conversor CC/CC topologia Ćuk operando em MCC. Após revisão das topologias na Seção 2.5, a topologia Ćuk apresenta característica de fonte de corrente tanto na entrada quanto na saída, o que beneficia o controle exato da radiação emitida. Dessa maneira, esse estágio é responsável por rebaixar a tensão CC do primeiro estágio para os 35 V necessários. Além disso, esse estágio mantém a corrente adequada de 100 mA na série de LEDs através da realimentação pelo sensor de corrente e do controle realizado pelo microcontrolador.

3.3 DISPOSIÇÃO E QUANTIDADE DE LÂMPADAS

No interior de um elevador, a superfície mais sujeita a infecção de patógenos é a botoeira da cabina, pois os passageiros selecionam o andar pressionando os botões com a mão. Outra superfície com alta probabilidade de infecção são os corrimões onde os passageiros apoiam as mãos. Portanto, propõe-se a instalação de lâmpadas LED UV-C logo acima da botoeira da cabina e no teto da cabina percorrendo o perímetro que estão fixados os corrimões. Um esboço da disposição proposta para as lâmpadas pode ser visualizado no esboço da Figura 28.

O cálculo do número total de lâmpadas LED UV-C baseia-se nas dimensões internas mínimas citadas na Seção 2.7.2. Cada lâmpada possui cinco LEDs em série com dimensões apresentadas na Figura 29. Sendo uma lâmpada destinada a botoeira da cabina e o perímetro percorrido pelos corrimões na cabina é de $P_{corrimao} = 5900$ mm e cada lâmpada possui comprimento total $C_{lampada} = 145$ mm. Assim, estipula-se com a Equação 3.2 a quantidade total de aproximadamente 41 lâmpadas.

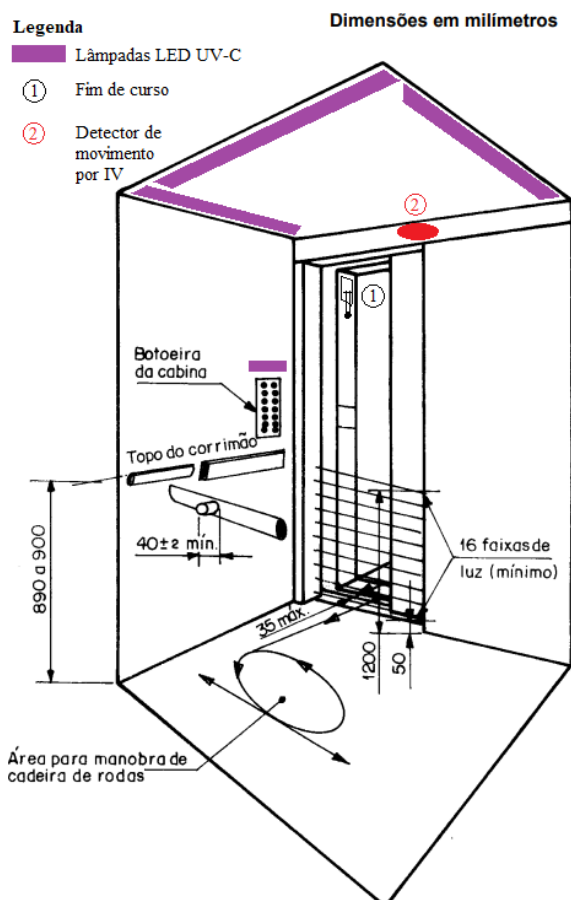
$$Quantidade_{lampadas} = 1 + \frac{P_{corrimao}}{C_{lampada}} \quad (3.2)$$

3.4 LOCALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

Devido aos sérios danos a saúde que a exposição a radiação UV-C pode causar, o uso de dispositivos de segurança é extremamente necessário para evitar que hajam passageiros na cabina do elevador no momentos de desinfecção. Para isso, propõe-se a instalação de dois dispositivos:

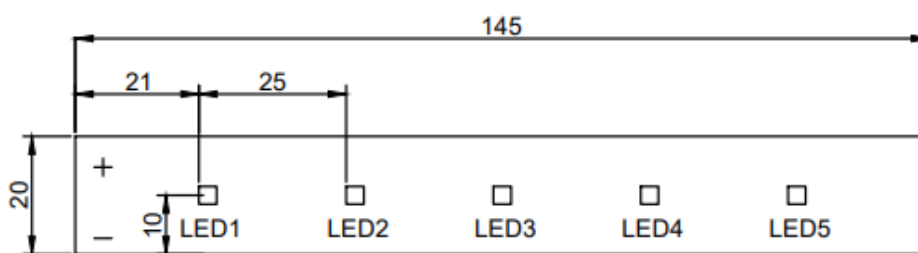
1. Fim de curso: uma chave fim de curso com contato normalmente aberto (NA) localizada no batente da porta do elevador tem sua haste acionada e seu contato fechado quando a porta está fechada. Dessa maneira, é impossibilitada a entrada de passageiros na cabina.

Figura 28 – Disposição das lâmpadas e dos dispositivos de segurança na cabina do elevador.



Fonte: Adaptado de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Figura 29 – Dimensões, em mm, da lâmpada LED UV-C proposta.



Fonte: O autor (2022).

2. Detector de movimento por IV: instalado acima da porta, este dispositivo identifica se há a presença de algum passageiro na cabina. Até que o detector não identifique a movimentação de nenhum passageiro a desinfecção não é iniciada. E também, detectando qualquer movimento durante a desinfecção, o detector envia um sinal e imediatamente a desinfecção é cessada, pois pode haver algum passageiro na cabina.

A localização proposta dos dispositivos de segurança pode ser visualizada no esboço da

Figura 28.

De modo a garantir a dose de radiação necessária para inativação dos patógenos, propõe-se também a instalação de um detector de radiação UV-C que medirá continuamente se o comprimento de onda correto e a dose desejada estão sendo emitidos pelas lâmpadas.

3.5 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE DESINFECÇÃO

A partir da análise dos microcontroladores na Seção 2.6, foi escolhido o microcontrolador ESP32 DEVKITV1 para realizar a rotina de controle e operação do sistema de desinfecção. Além deste microcontrolador possuir as características apresentadas no Quadro 3, ele ainda possui entradas para dez sensores capacitivos, sensor de efeito Hall e sensor de temperatura. (Espressif Systems, 2021)

A operação do acionamento e controle da iluminação LED UV-C proposta segue o fluxograma da Figura 30.

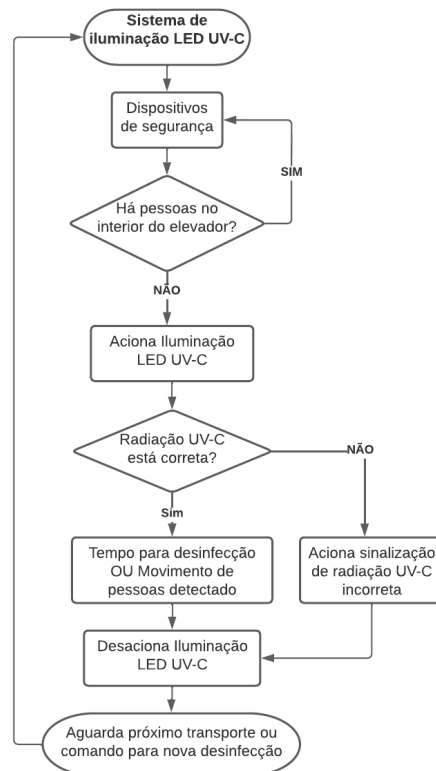
Primeiramente, verifica-se se há a presença de passageiros na cabina por meio dos dispositivos de segurança. Quando constatada que a porta do elevador está fechada pelo sinal do sensor fim de curso, procura-se alguma movimentação de passageiros com o detector de movimento por IV. Se houver movimentação de pessoas no interior do elevador, o sistema retorna para o processo anterior e verifica novamente. Se não houver mais pessoas então é acionada a iluminação LED UV-C para desinfecção das superfícies. Nesse instante, o detector de radiação UV-C mede o comprimento de onda e a dose de radiação que estão sendo emitidos pelas lâmpadas. Se estes parâmetros não estiverem nos valores corretos aciona-se uma sinalização luminosa indicando que a radiação UV-C está incorreta, provavelmente devido a queima de um ou mais LEDs ou alguma outra anormalidade no sistema. Então, é desacionada a iluminação e a desinfecção é cancelada. Se os valores estiverem corretos inicia-se a contagem do tempo para desinfecção. Durante esse tempo é bloqueada a entrada de pessoas na cabina e o detector de movimento envia um sinal desativando a iluminação em caso de qualquer movimento detectado.

Após a contagem do tempo ocorre o desacionamento da iluminação LED UV-C pois a desinfecção foi realizada. A rotina será iniciada novamente assim que houver o transporte de novos passageiros e eles tiverem saído da cabina, ou quando o sistema receber o comando para nova desinfecção.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante limitações do trabalho esclarecidas na Seção 1.3, propõe-se a instalação de uma lâmpada e implementação do sistema em um elevador real durante um período em que não haja a circulação de pessoas, pois a exposição à radiação poderia trazer sérios riscos a saúde.

Figura 30 – Fluxograma de operação do sistema proposto.



Fonte: O autor (2022).

Na implementação do sistema será instalada uma lâmpada LED UV-C na área dos botões de escolha do andar do elevador. Também serão fixados o detector de radiação UV-C e os dispositivos de segurança com sua disposição planejada. Todo o processo de desinfecção ocorrerá conforme o fluxograma do sistema.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Conforme o sistema proposto no Capítulo 3, neste capítulo serão explanadas as etapas de desenvolvimento, cálculos e análises para a correta implementação do sistema.

4.1 ANÁLISE E PROJETO DO *HARDWARE*

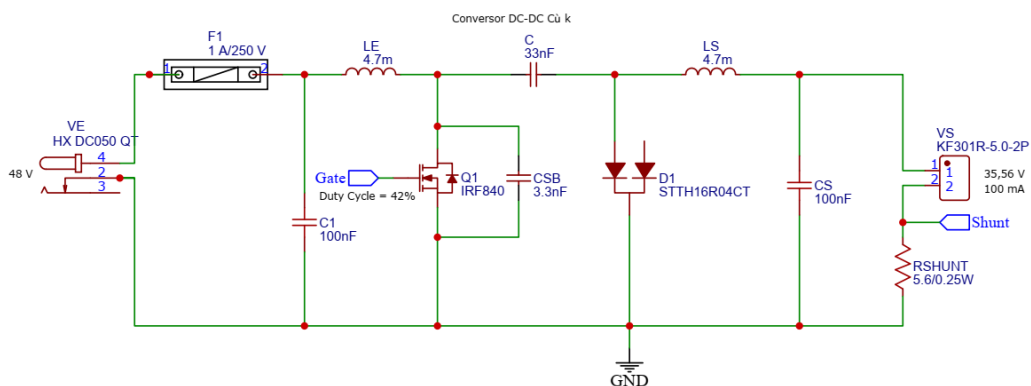
Para melhor desenvolvimento e detalhamento, o projeto do *hardware* do sistema proposto é baseado em três etapas que serão descritas na sequência: conversor Çuk, amplificação de sinais e dispositivos de segurança e demais entradas e saídas. O esquema eletrônico completo do *hardware* desenvolvido é apresentado no Apêndice A e foi feito utilizando o *software* EasyEDA. Uma lista completa dos componentes eletrônicos e peças utilizadas está contida no Apêndice B.

4.1.1 Conversor Çuk

Devido a sua característica de saída ser uma fonte de corrente, o conversor Çuk foi escolhido para este sistema. De acordo com Rashid (2014), este conversor fornece uma tensão de saída com polaridade oposta à da entrada, em um nível maior ou menor.

Utilizando indutores, capacitores e semicondutores sua operação ocorrerá em MCC reduzindo a tensão de entrada para o valor adequado para acionar a carga de LEDs UV-C, conforme pode ser visualizado na Figura 31. As análises a seguir detalham seu funcionamento e os cálculos para determinação dos elementos passivos e ativos.

Figura 31 – Circuito do conversor Çuk.



Fonte: O autor (2023).

4.1.1.1 Análise qualitativa

Quando é aplicado um sinal PWM ao terminal *gate* do transistor Q_1 , ora ele é acionado, ora desacionado de acordo com a frequência e *duty cycle* definidos. Em conjunto com o diodo D_1 ocorre uma ação síncrona de chaveamento. Logo, a operação do circuito pode ser dividida em duas etapas representadas pela Figura 32.

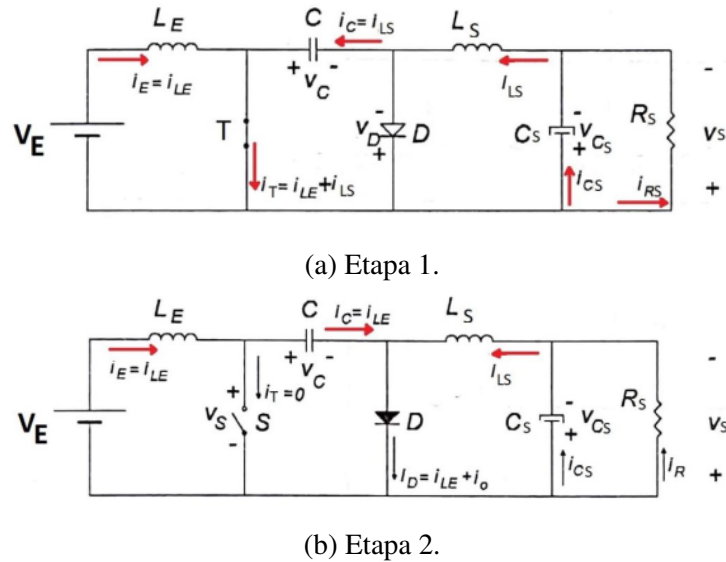


Figura 32 – Etapas de operação do conversor Ćuk.

Fonte: Adaptado de (RASHID, 2014).

A etapa 1 inicia com o acionamento de Q_1 , permitindo que a corrente através do indutor L_E cresça. Enquanto isso, a tensão do capacitor C polariza reversamente o diodo D_1 e o desaciona. O capacitor C descarrega sua energia sobre C_S , R_S e L_S encerrando a etapa 1.

A etapa 2 se inicia quando Q_1 é desacionado. Desse modo, o diodo D_1 é diretamente polarizado e o capacitor C é carregado através de L_E , D_1 e da tensão de entrada V_E . Nesse momento, a energia armazenada no indutor L_S é transferida para a carga, sendo também o capacitor C o meio de transferência de energia da fonte para a carga. A Figura 33 apresenta as formas de onda nos acionamentos dos componentes.

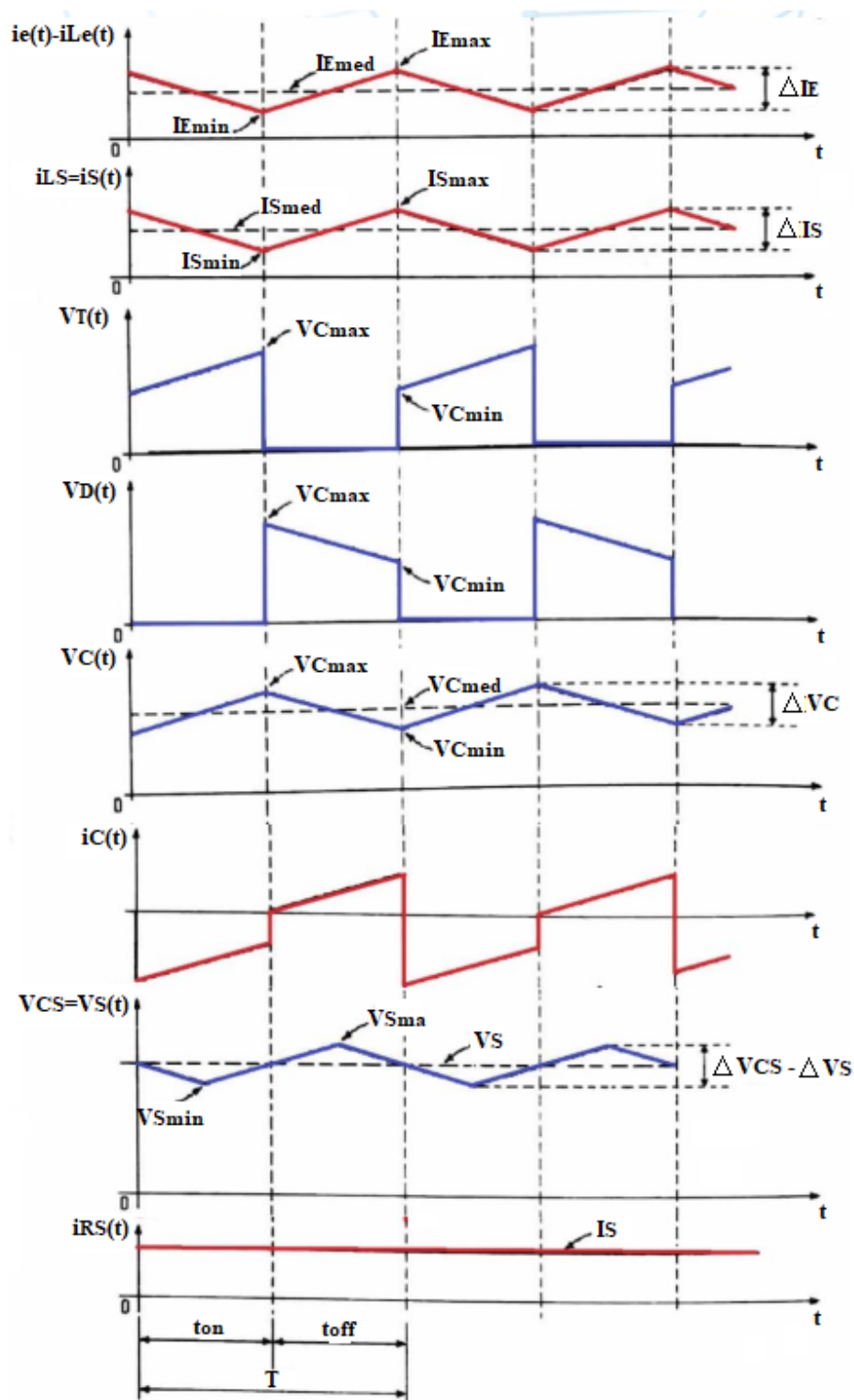
4.1.1.2 Análise quantitativa

Baseando-se na análise quantitativa de Rashid (2014), a seguir é apresentado o equacionamento para construção do conversor Ćuk. Para o cálculo dos valores dos componentes foram estipulados dados iniciais informados na Tabela 5.

Sendo a Equação 4.1 a relação entre as tensões de saída e entrada e d o *duty cycle*, obtêm-se o valor exato da razão cíclica:

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{d}{1-d} \rightarrow d = \frac{V_S}{V_E + V_S} = 0,4255. \quad (4.1)$$

Figura 33 – Formas de onda das etapas de operação do conversor Ćuk.



Fonte: Adaptado de (RASHID, 2014).

O período de chaveamento T é de 10μ e representa a soma dos tempos t_{on} e t_{off} em que o transistor Q_1 é ativado e desativado, respectivamente. Para determinar tais tempos, utiliza-se a Equação 4.2 e a Equação 4.3:

Tabela 5 – Dados iniciais para projeto do conversor Ćuk.

| | |
|---|----------------|
| Tensão de entrada V_E | 48 V |
| Tensão de saída V_S | 35,56 V |
| Frequência de chaveamento f_s | 100 kHz |
| Carga R_S | 355,6 Ω |
| Eficiência η | 85% |
| Ondulação de corrente na entrada ΔI_E | 30% |
| Ondulação de corrente na saída ΔI_S | 30% |
| Ondulação de tensão na entrada ΔV_C | 15% |
| Ondulação de tensão na saída ΔV_S | 15% |

Fonte: O autor (2023).

$$t_{on} = d.T = 4,255\mu s, \quad (4.2)$$

$$t_{off} = T - t_{on} = 5,745\mu s. \quad (4.3)$$

A corrente de saída I_S constante necessária para a carga em questão é calculada pela Equação 4.4, onde R_S é a soma da resistência equivalente dos LEDs UV-C e do resistor de *shunt*:

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = 100mA. \quad (4.4)$$

A eficiência η relaciona a potência de entrada P_E com a potência de saída P_S entregue a carga. Calculando-se P_S com a Equação 4.5, então obtêm-se P_E com a Equação 4.6:

$$P_S = V_S.I_S = 3,56W, \quad (4.5)$$

$$P_E = \frac{P_S}{\eta} = 4,19W. \quad (4.6)$$

Com o valor de P_E , calcula-se a corrente de entrada I_E com a Equação 4.7:

$$I_E = \frac{P_E}{V_E} = 87,25mA. \quad (4.7)$$

Em seguida, calcula-se o valor ideal dos dois indutores L_E e L_S com a Equação 4.8 e Equação 4.9, respectivamente. Para a construção do conversor decidiu-se utilizar o valor de 4,7 mH para ambos os indutores por ser um valor acessível de ser encontrado no mercado.

$$L_E = \frac{V_E.d}{\Delta I_E.f_s} = 7,8mH \quad (4.8)$$

$$L_S = \frac{V_E \cdot d}{\Delta I_S \cdot f_s} = 6,8mH \quad (4.9)$$

Para determinar o valor do capacitor C , é necessário saber a tensão média sobre ele através da Equação 4.10. Então, os capacitores C e C_S , utilizam-se da Equação 4.11 e a Equação 4.12, respectivamente para seus cálculos. Definiu-se o valor do capacitor C em 33 nF e 100 nF para o capacitor C_S , por serem valores acessíveis de serem encontrados no mercado. Como a capacitância de C_S é maior que o valor calculado, a variação da tensão será menor.

$$V_{C_{med}} = \frac{V_E}{1-d} = 83,55V \quad (4.10)$$

$$C = \frac{I_E \cdot (1-d)}{\Delta V_C \cdot f_s} = 40nF \quad (4.11)$$

$$C_S = \frac{V_E \cdot d}{8 \cdot \Delta V_S \cdot L_S \cdot f_s^2} = 7,04nF \quad (4.12)$$

De modo a especificar as grandezas elétricas limitantes dos dois semicondutores, transistor $Q1$ e diodo $D1$, primeiramente calculam-se os valores de corrente máximos e mínimos dos indutores L_E e L_S , de acordo com a ondulação de corrente permitidas na entrada e saída, conforme a Equação 4.13, Equação 4.14, Equação 4.15 e a Equação 4.16:

$$I_{LEmax} = I_E + \frac{\Delta I_E}{2} = 100,34mA, \quad (4.13)$$

$$I_{LEmin} = I_E - \frac{\Delta I_E}{2} = 74,16mA, \quad (4.14)$$

$$I_{LSmax} = I_S + \frac{\Delta I_S}{2} = 115mA, \quad (4.15)$$

$$I_{LSmin} = I_S - \frac{\Delta I_S}{2} = 85mA. \quad (4.16)$$

O modelo do transistor escolhido é o MOSFET IRF840, canal N, que suporta uma tensão máxima entre os terminais de *drain* e *source* de 500 V e uma corrente de dreno de 5 A. A escolha se deve ao seus baixos tempos de chaveamento e resistência *drain-source*. Tais valores balizadores superam os valores calculados na Equação 4.17, Equação 4.18, Equação 4.19, Equação 4.20, Equação 4.21 e na Equação 4.22:

$$I_{Tmax} = I_{LEmax} + I_{LSmax} = 215,34mA, \quad (4.17)$$

$$I_{Tmin} = I_{LEmin} + I_{LSmin} = 159,16mA, \quad (4.18)$$

$$I_{Tmed} = \frac{I_{Tmax} + I_{Tmin}}{2} \cdot d = 79,67mA, \quad (4.19)$$

$$I_{Tef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{0,4255T} \left(\frac{I_{Tmax} + I_{Tmin}}{2} \right)^2 dt} = 122,14mA, \quad (4.20)$$

$$V_{Tmax} = V_{Cmed} + \frac{\Delta V_C}{2} = 89,82V, \quad (4.21)$$

$$V_{Tmin} = V_{Cmed} - \frac{\Delta V_C}{2} = 77,28V. \quad (4.22)$$

O modelo do diodo escolhido é o diodo *shottky* STTH16R04CT que suporta uma tensão repetitiva reversa máxima de 400 V e uma corrente direta de 8 A. A escolha se deve a suas baixíssimas perdas por chaveamento e capacidade de operar em altas frequências. Os valores de tensão máxima V_{Dmax} e mínima V_{Dmin} para o diodo são os mesmos dos valores para o transistor calculados na Equação 4.21 e na Equação 4.22. No entanto, os valores de corrente são diferentes devido ao maior tempo que o diodo permanece em condução. Na Equação 4.23 e na Equação 4.24 são apresentados tais valores:

$$I_{Dmed} = \frac{I_{Tmax} + I_{Tmin}}{2} \cdot (1 - d) = 107,58mA, \quad (4.23)$$

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{(1-0,4255)T} \left(\frac{I_{Tmax} + I_{Tmin}}{2} \right)^2 dt} = 141,93mA. \quad (4.24)$$

Devido ao surgimento de uma tensão transitória sobre o transistor $Q1$ causada pelas indutâncias do circuito, é necessária a conexão de um circuito *snubber* em paralelo para limitar o pico dessa tensão transitória. O capacitor C_{SB} desempenha esse papel e seu valor mínimo é calculado na Equação 4.25. (RASHID, 2014)

$$C_{SB} = I_E + I_S \cdot \frac{t_f}{V_{Tmax}} = 41,69pF, \quad (4.25)$$

onde t_f é o tempo que o transistor leva para sair do modo de condução, em ns. Dessa maneira, definiu-se um valor maior de 3,3 nF.

Segundo Rashid (2014), os componentes eletrônicos dos conversores devem ser protegidos por fusíveis de ação rápida na possível ocorrência de curto-circuitos ou falhas. Para esse

propósito, foi inserido o fusível $F1$ de 0,5 A/250 V, tendo como regra prática geral um valor da corrente ligeiramente maior que a corrente média do transistor, já conseguindo fornecer proteção adequada em condições de falha.

4.1.1.3 Perdas nos semicondutores

Devido ao chaveamento elevado dos semicondutores, estes dispositivos apresentam perdas ao serem comutados e também perdas quando em condução. Tais perdas não podem ser negligenciadas pois são determinantes e auxiliam nos cálculos de gerenciamento térmico.

As perdas de comutação referentes ao transistor $Q1$ estão divididas em: perdas na entrada de condução e perdas na saída de condução. Elas são calculadas com a Equação 4.26 e a Equação 4.27, respectivamente. A perda em condução é calculada com a Equação 4.28. De posse dos valores dessas perdas é realizada sua soma e obtêm-se as perdas totais no transistor, P_{TotalT} , com a Equação 4.29. O tempo de comutação para o transistor entrar em condução t_r é de 23ns, enquanto que o tempo de comutação para o transistor sair da condução t_f é de 20ns. E a resistência *drain-source* R_{DSon} é de 0,85 Ω .

$$P_{Tcom(on)} = \frac{1}{T} \int_0^{(t_r)} \left(\frac{V_{Tmax} + I_{Tef}}{2} \right) dt = 10,97mW \quad (4.26)$$

$$P_{Tcom(off)} = \frac{1}{T} \int_0^{(t_f)} \left(\frac{V_{Tmax} + I_{Tef}}{2} \right) dt = 12,62mW \quad (4.27)$$

$$P_{cond} = R_{DSon} \cdot I_{Tef}^2 = 12,68mW \quad (4.28)$$

$$P_{TotalT} = P_{cond} + (P_{Tcom(on)} + P_{Tcom(off)}) = 36,27mW \quad (4.29)$$

O diodo *shottky* é caracterizado pelo seu tempo de chaveamento extremamente baixo. Logo, as perdas por chaveamento podem ser desprezadas. Contudo, calculam-se as perdas em condução com a Equação 4.30, já sendo as perdas totais no semicondutor. O valor de tensão direta V_{To} para $D1$ entrar em condução é de 0,9 V e o valor da resistência da junção R_D é de 34m Ω .

$$P_{TotalD} = V_{To} \cdot I_{Dmed} + R_D \cdot I_{Def}^2 = 101,65mW \quad (4.30)$$

De acordo com a Equação 4.31, os dois semicondutores utilizados resultam em 3,88% das perdas no conversor implementado.

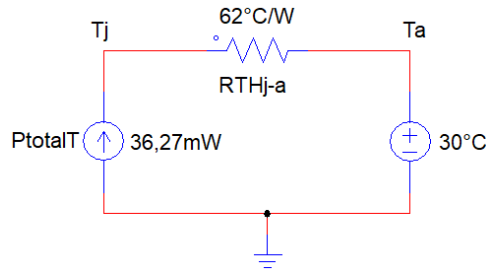
$$Perdas(\%) = \frac{P_{TotalT} + P_{TotalD}}{P_S} = 3,88\% \quad (4.31)$$

4.1.1.4 Gerenciamento térmico

Um requisito indispensável em projetos que envolvem semicondutores de potência é o gerenciamento térmico dos mesmos. Caso a temperatura na junção ultrapasse um determinado valor, que é específico para cada modelo de semicondutor, dependendo de seus aspectos construtivos, o dispositivo pode ser danificado comprometendo o funcionamento do sistema sobre o qual ele atua. Para os casos em que há a ultrapassagem de temperatura, são projetados dissipadores térmicos para serem incorporados aos dispositivos para que o calor possa ser transferido ao ambiente. A necessidade do uso de dissipadores é verificada através da determinação da máxima potência dissipada em cada semicondutor do sistema.

A temperatura na junção de $Q1$ foi calculada com base no modelo térmico equivalente elétrico, descrito por Rashid (2014). O circuito equivalente está representado na Figura 34.

Figura 34 – Circuito do modelo térmico equivalente elétrico do transistor $Q1$.



Fonte: O autor (2023).

Realizando o equacionamento do circuito da Figura 34, obtêm-se a Equação 4.32, que é utilizada na determinação da temperatura na junção do transistor. O encapsulamento do transistor escolhido (TO-220AB) permite o valor máximo de temperatura na junção de 150°C . Logo, não é necessário o uso de dissipador térmico.

$$T_j - T_a = P_{TotalT}(R_{THj-a}) \rightarrow T_j = P_{TotalT}(R_{THj-a}) + T_a = 32,25^{\circ}\text{C} \quad (4.32)$$

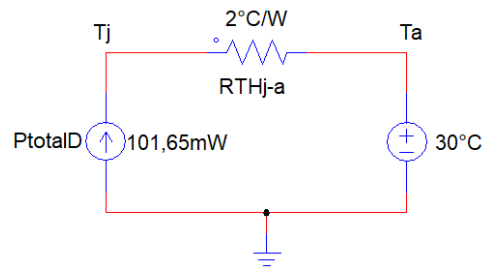
Realizando-se o mesmo procedimento para $D1$, obtêm-se a Equação 4.33 com a análise do circuito do modelo térmico equivalente elétrico, representado na Figura 35. O encapsulamento do diodo escolhido (TO-220AB) permite o valor máximo de temperatura na junção de 175°C . Logo, não é necessário o uso de dissipador térmico.

$$T_j - T_a = P_{TotalD}(R_{THj-a}) \rightarrow T_j = P_{TotalD}(R_{THj-a}) + T_a = 30,2^{\circ}\text{C} \quad (4.33)$$

4.1.1.5 Acionamento do MOSFET

O microcontrolador que realiza o comando de acionamento de $Q1$ pelo terminal *gate* consegue fornecer no máximo uma corrente de 12 mA com a tensão de PWM em 3,3 V. Estes

Figura 35 – Circuito do modelo térmico equivalente elétrico do diodo $D1$.



Fonte: O autor (2023).

valores não são suficientes para o transistor entrar em condução. Assim, é necessária a implementação de um circuito de acionamento auxiliar chamado de *Gate Driver*. Basicamente, este circuito protege o microcontrolador e o transistor, além de garantir seu acionamento rápido. A corrente necessária no *Gate Driver* para que o tempo t_G de comutação a condução do transistor seja de 30 ns é calculada pela Equação 4.34. Sendo 63 nC a carga elétrica total Q_G no terminal *gate*.

$$I_G = \frac{Q_G}{t_G} = 2,1A \quad (4.34)$$

O circuito do *Gate Driver* implementado é comumente conhecido como *Totem-pole* e pode ser visualizado na Figura 36. Para sua implementação, foram utilizados quatro TJBs *Darlington* de 65 W cada, pois possuem um alto valor de ganho. Sendo três deles o modelo TIP122 e um deles o modelo TIP127, eles estão conectados de forma que o sinal de saída segue a mesma lógica da saída do microcontrolador porém, com um nível de tensão maior. Havendo nível lógico alto na *label PWM*, o transistor $Q2$ é polarizado, enquanto que $Q3$ não é polarizado de modo que ocorre a polarização de $Q4$, assim liberando o nível lógico mais alto na *label Gate*. Havendo nível lógico baixo na *label PWM*, $Q2$ não é polarizado, mas $Q3$ sim, desse modo agora $Q5$ é polarizado, havendo assim nível lógico baixo na *label Gate*.

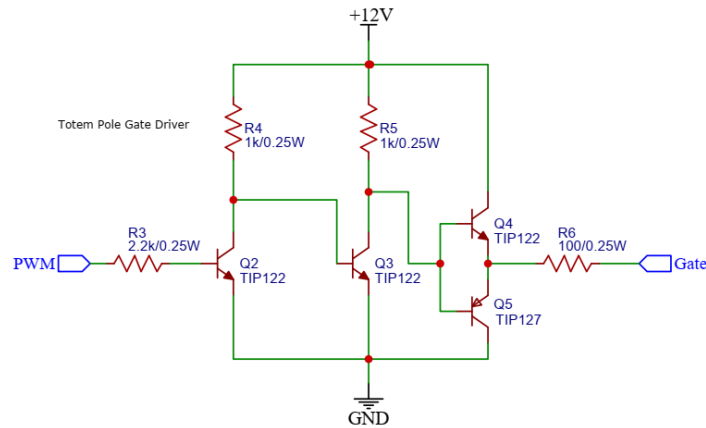
4.1.2 Amplificação de sinais

Alguns dos sinais que precisam ser lidos pelo microcontrolador não possuem a amplitude necessária para seu processamento. Então, utiliza-se um Amplificador Operacional (AmpOp) para amplificar o sinal em questão num nível adequado às necessidades do microcontrolador. Neste trabalho são utilizados dois AmpOps, que estão num único encapsulamento do CI LM358. (FRANCO, 2015)

4.1.2.1 Resistor *shunt*

De modo a medir a corrente que circula pela série de LEDs UV-C está conectado em série também um resistor *shunt* de $5,6\Omega$. Como este resistor é de baixo valor, assim não in-

Figura 36 – Circuito *Totem-pole* para acionamento do terminal *gate* de $Q1$.

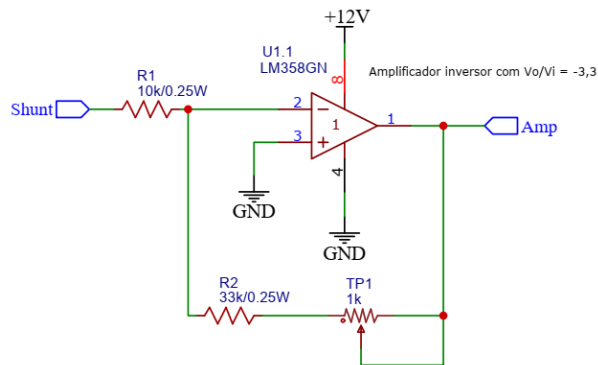


Fonte: O autor (2023).

fluenciando na alimentação dos LEDs, a tensão medida na *label Shunt* também é baixa, como pode ser compreendido na Equação 4.35. Logo, para uma leitura mais precisa na entrada analógica do microcontrolador essa tensão é amplificada pelo amplificador inversor ilustrada pela Figura 37. O ganho desse amplificador está apresentado na Equação 4.36. (FRANCO, 2015)

$$V_{Shunt} = R_{Shunt} \cdot I_S = -0,56V \quad (4.35)$$

Figura 37 – Circuito do amplificador inversor para resistor *shunt*.



Fonte: O autor (2023).

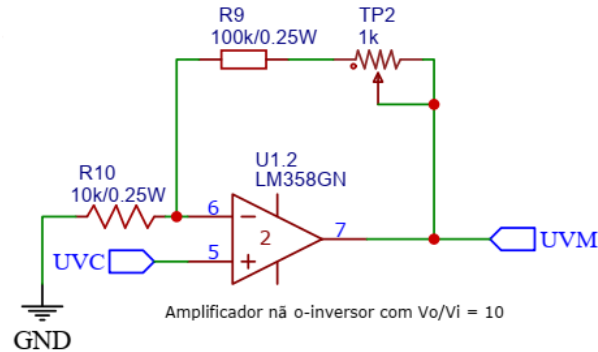
$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{-R_2}{R_1} = -3,3 \quad (4.36)$$

4.1.2.2 Radiação UV-C

O sensor de radiação UV utilizado fornece em sua saída uma tensão que varia de 0 a 1170 mV dependendo da intensidade da radiação captada. Para melhores leituras na entrada analógica do microcontrolador essa tensão é amplificada pelo amplificador não-inversor ilustrada

pela Figura 38. O ganho desse amplificador está apresentado na Equação 4.37. (EKT Katrangi Bros., 2019) (FRANCO, 2015)

Figura 38 – Circuito do amplificador não-inversor para o sensor de radiação UV.



Fonte: O autor (2023).

$$\frac{V_O}{V_I} = 1 + \frac{R_9}{R_{10}} = 11 \quad (4.37)$$

4.1.3 Dispositivos de segurança e demais entradas e saídas

As subseções seguintes apresentam os detalhes e os modelos dos sensores utilizados e explicações da escolha das demais entradas e saídas utilizadas, como botões e sinais luminosos.

4.1.3.1 Sensor de presença

A presença de pessoas no interior da cabine do elevador é detectada por um sensor de presença modelo HC-SR501. Este sensor é do tipo piroelétrico e funciona da maneira que foi explicada na Seção 2.4.2. Como pode ser observado na Figura 39, ele é um módulo que permite o ajuste do alcance de detecção de movimentos de até 7 metros dentro de uma faixa de 110°. Também inclui a opção de ajustes no tempo que a saída permanece acionada após a detecção e se o acionamento será simples ou repetitivo. Quando o movimento é detectado o pino de saída recebe nível lógico alto e nível lógico baixo quando não é detectado movimento. Esse sinal é então processado por uma entrada digital do microcontrolador. (Utmel ELelectronics, 2021)

4.1.3.2 Sensor de radiação UV

A radiação UV-C emitida pela lâmpada é medida por um sensor de radiação UV modelo UVM-30A. Este sensor funciona da maneira que foi explicada na Seção 2.4.1. Ele mede comprimentos de onda na faixa de 200 a 370 nm, logo ele é capaz de medir a radiação dos LEDs UV-C que emitem um comprimento de onda de 275 nm. O sinal de saída é fornecido em forma de uma tensão linear que varia conforme a intensidade da radiação UV incidente. Esse sinal entra no amplificador não-inversor para então ser processado por uma entrada analógica

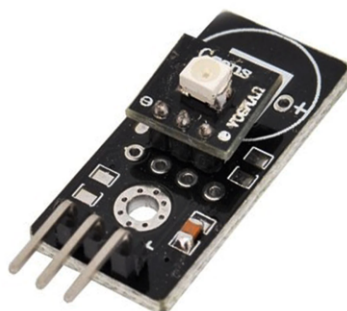
Figura 39 – Sensor de presença modelo HC-SR501.



Fonte: Adaptado de (Utmel Electronics, 2021).

do microcontrolador. A Figura 40 apresenta o modelo de sensor em questão. (EKT Katrangi Bros., 2019)

Figura 40 – Sensor de radiação UV modelo UVM-30A.



Fonte: Adaptado de (EKT Katrangi Bros., 2019).

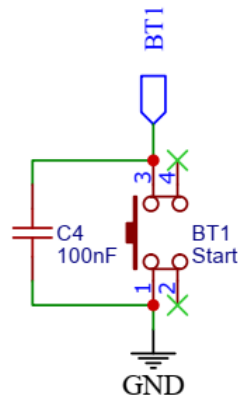
4.1.3.3 Chave fim de curso

Para confirmação do fechamento da porta do elevador utiliza-se uma chave fim de curso com contato NA com características elétricas máxima de 5 A/250 V. Seu funcionamento dá-se da maneira que foi explicada na Seção 4.1.3.3. Ela está conectada a uma entrada digital com resistor de *pull up* interno do microcontrolador. Assim, quando ela está fechada é lido nível lógico baixo e enquanto ela está aberta é lido nível lógico alto.

4.1.3.4 Botão para início de sistema

É utilizada uma chave táctil com contato NA que quando acionada uma vez permite o início da desinfecção. Para evitar acionamentos acidentais ocasionados por ruídos, está conectada em paralelo a ela o capacitor $C4$ atuando como *debounce*. Como pode ser visto na Figura 41. Assim como a chave fim de curso, ela está conectada a uma entrada digital com resistor de *pull up* interno do microcontrolador.

Figura 41 – Botão para início de sistema.

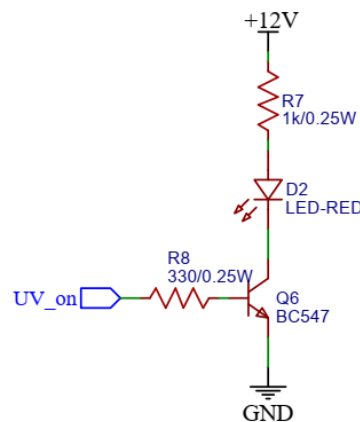


Fonte: O autor (2023).

4.1.3.5 Luz indicativa de estado do sistema

A sinalização que informa qual é o processo atual do sistema é realizada por um LED vermelho. Como pode ser observado na Figura 42 quando uma saída digital do microcontrolador fornecer nível lógico alto, o transistor $Q6$ é polarizado então o LED acende.

Figura 42 – Luz indicativa de estado do sistema.



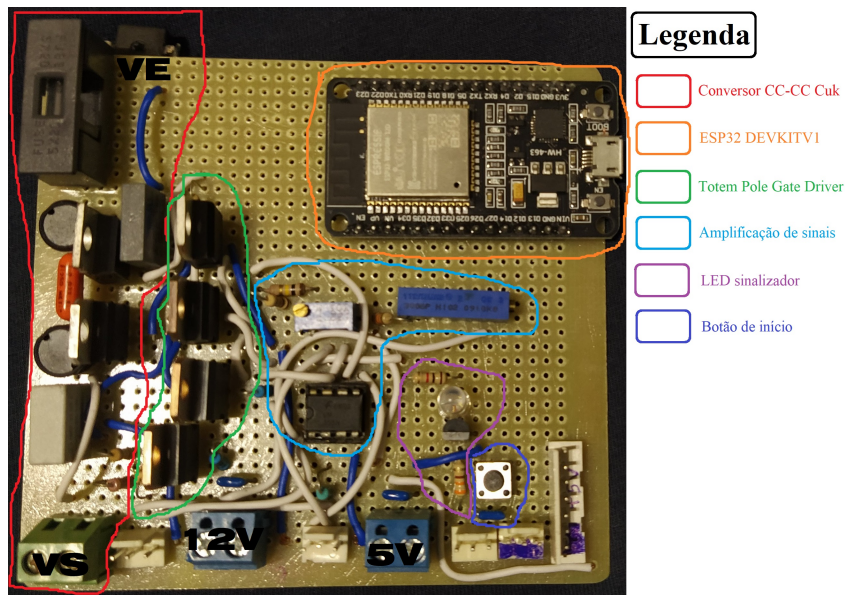
Fonte: O autor (2023).

4.2 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O projeto da PCI foi feito utilizando o *software* EasyEDA. Foram utilizados componentes *Pin Through Hole* (PTH) pela maior facilidade em adquiri-los. O Apêndice C apresenta imagens do roteamento do lado TOP e BOTTOM, bem como o modelo 3D simulado da PCI com os componentes.

Devido ao custo elevado para confecção de poucas unidades da PCI projetada, foi confeccionado numa placa furada padrão o protótipo do sistema desenvolvido. A Figura 43 apresenta a placa eletrônica com a respectiva anotação de alguns dos circuitos descritos na Seção 4.1.

Figura 43 – Placa eletrônica confeccionada como protótipo.

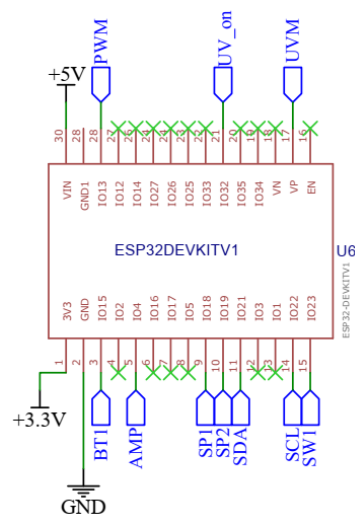


Fonte: O autor (2023).

4.3 PROCESSAMENTO E CONTROLE

O processamento e controle do sistema implementado é realizado pelo microcontrolador ESP32 DEVKITV1 pelas razões explicadas na Seção 3.5. A Figura 44 demonstra o esquema eletrônico do microcontrolador que é alimentado por uma fonte de tensão externa de 5 V/2 A.

Figura 44 – Esquema do microcontrolador ESP32 DEVKITV1.



Fonte: O autor (2023).

De acordo com Kathi *et al.* (2018) o modelo de pequenos sinais em malha aberta para um conversor CC/CC Ćuk possui a função de transferência apresentada na Equação 4.38. Por motivos de implementação, a aproximação de todos os elementos parasitas r_{LE} , r_{LS} , r_C e r_{CS} será igual a zero.

$$\frac{v_s(s)}{v_e(s)} = d' R_S \frac{B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}{K_4 s^4 + K_3 s^3 + K_2 s^2 + K_1 s + K_0} \quad (4.38)$$

Onde, $d' = 1 - d$,

$$B_0 = -d,$$

$$B_1 = C(r_{LE} - dr_C) - r_{CS}C_S,$$

$$B_2 = C[r_{CS}C_S(r_{LE} - dr_C) + L_E],$$

$$B_3 = r_{CS}L_E C C_S,$$

$$K_0 = d'^2 R_S + dr_{LE},$$

$$K_1 = (d'^2 R_S + dr_C)(r_C C + r_{CS}C_S) + dL_E + r_{LE}[C(2R_S + r_{LS}) + dR_S(C_S - C)],$$

$$K_2 = C C_S \{ R_S r_{CS} [(1 + d')r_{LE} + d'^2 r_C] + (R_S + r_{CS}) [d \frac{L_E}{C} + r_{LE}(r_{LS} + dr_C)] \},$$

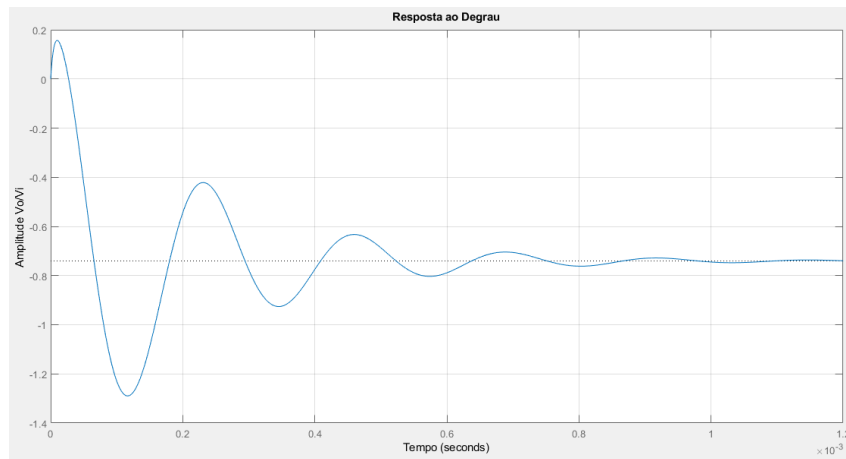
$$K_3 = L_E C C_S \left\{ (1 + d') R_S r_{CS} + (R_S + r_{CS}) \left[r_{LE} \frac{L_S}{L_E} + dr_C + r_{LS} \right] + \frac{L_S}{C_S} \right\} e$$

$K_4 = L_E L_S C C_S (R_S + r_{CS})$. Que resulta na Equação 4.39 apresentada abaixo.

$$\frac{v_s(s)}{v_e(s)} = \frac{3,1686 \cdot 10^{-8} s^2 - 86,9263}{7,2897 \cdot 10^{-13} s^3 + 1,5795 \cdot 10^{-7} s^2 + 0,0020 s + 117,3659} \quad (4.39)$$

Para analisar o comportamento do sistema foi plotado o gráfico da resposta temporal ao degrau unitário, apresentado pela Figura 45. Também, a fim de avaliar a resposta em frequência do sistema, foi plotado o diagrama de Bode que pode ser observado na Figura 46.

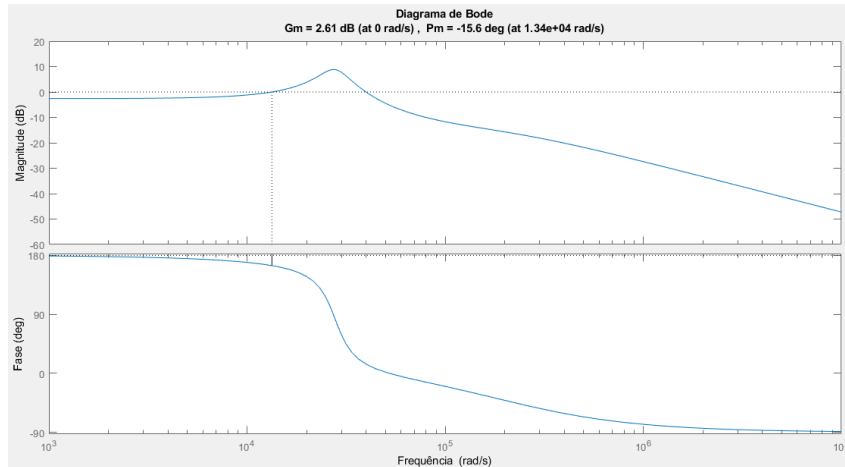
Figura 45 – Resposta do sistema ao degrau unitário.



Fonte: O autor (2023).

De acordo com Ogata (2010), para este modelo de sistema que apresenta a resposta da Figura 45, utiliza-se o segundo método de sintonia de controladores PID desenvolvida por Ziegler e Nichols. Este método possui regras baseadas no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} . Observando a Figura 46, a margem de ganho MG é de 2,61 dB, enquanto que a frequência

Figura 46 – Diagrama de Bode do sistema.



Fonte: O autor (2023).

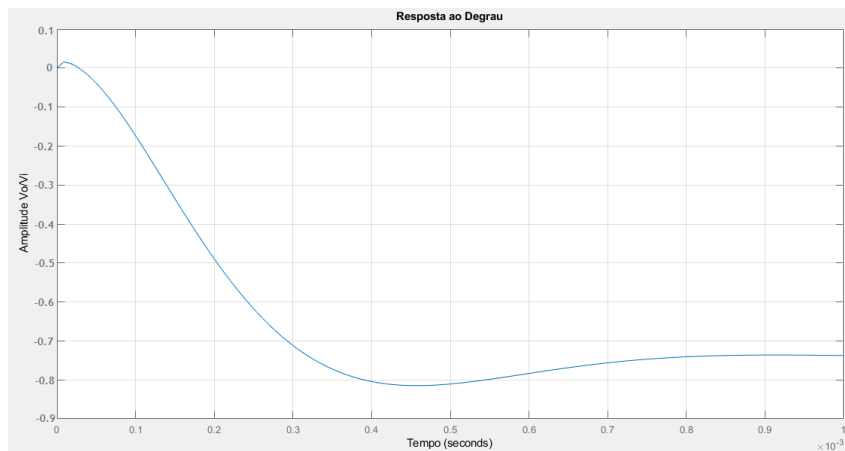
de cruzamento de fase ou frequência natural ω_n é de 0 rad/s. Sendo K_{cr} a margem de ganho em valor absoluto, calcula-se seu valor com a Equação 4.40. Enquanto que P_{cr} assume um valor que tende ao infinito. Logo, o controlador deve ser do tipo P, ou seja, apenas proporcional. Dessa maneira, de acordo com a Equação 4.41, obtêm-se o ganho do compensador $K_p = 0,6752$.

$$MG = 20 \log K_{cr} \Rightarrow K_{cr} = 1,3505 \quad (4.40)$$

$$K_p = 0,5 K_{cr} \quad (4.41)$$

A resposta temporal do sistema, após a inclusão do compensado, pode ser visualizada na Figura 47.

Figura 47 – Resposta do sistema ao degrau unitário com atuação do compensador P.



Fonte: O autor (2023).

É possível observar que com a atuação do compensador, o sistema não apresentou mais oscilação inicial assim como reduziu o valor de sobressinal. E também, não apresentou um erro

significativo em regime permanente, mantendo V_E/V_S em -0,74, sendo que o sinal negativo representa a polaridade da tensão de saída inversa a da tensão de entrada, característica intrínseca ao conversor CC/CC Ćuk. Assim, o compensador calculado foi considerado satisfatório para a aplicação.

4.4 SIMULAÇÕES DO *HARDWARE*

Esta seção apresenta as formas de onda em regime permanente das grandezas de tensão e corrente, com a finalidade de validar o funcionamento do *hardware* com base no dimensionamento dos componentes presente nas seções anteriores. A maioria das simulações do *hardware* foram realizadas por meio da ferramenta de simulação do *software* PSIM, apenas a simulação do circuito *gate driver* foi realizada na ferramenta de simulação do *software* Proteus.

Inicialmente, foram simuladas as formas de onda na saída do conversor Ćuk que podem ser visualizadas na Figura 48. Observa-se que os valores ficaram dentro dos limites de variação estabelecidos sendo que V_S atingiu um valor médio de 35,61 V e I_S de 100,15 mA, resultando numa potência de 3,57 W.

A simulação da corrente nos indutores L_E e L_S foi realizada simultaneamente e podem ser visualizadas na Figura 49. Concluindo as simulações dos elementos passivos, a Figura 50 apresenta a forma de onda de tensão sobre o capacitor C .

Os elementos ativos apresentam formas de onda semelhantes às que foram explanadas na Seção 4.1.1.1, as formas de onda no transistor $Q1$ são apresentadas na Figura 51, enquanto que as formas de onda no diodo $D1$ são apresentadas na Figura 52.

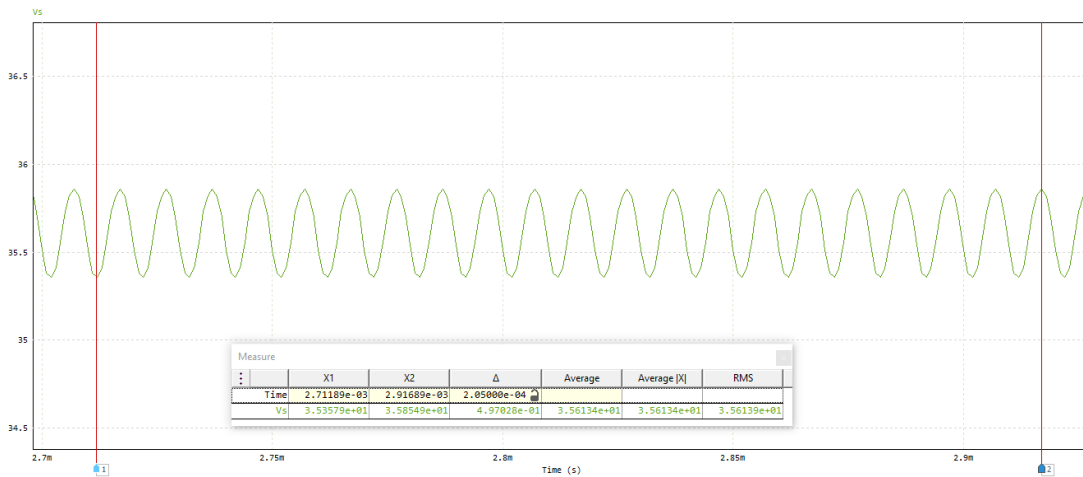
O amplificador inversor do resistor *shunt* apresentou resultado satisfatório em sua saída como pode ser observado na Figura 53.

Por sua vez, o circuito *gate driver* apresentou uma leve distorção na forma de onda de saída devido a frequência de 100 kHz, no entanto, manteve o mesmo *duty cycle* da entrada. Na Figura 54 pode-se observar a forma de onda de entrada de 3,3 V em amarelo e a de saída de 12 V em azul.

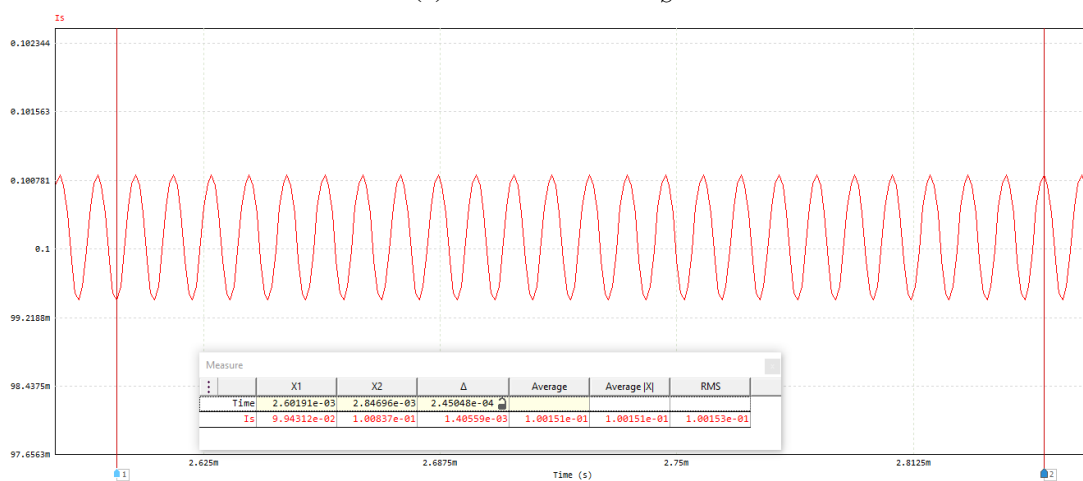
4.5 ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO *FIRMWARE*

O *firmware* responsável pelo controle do sistema implementado foi desenvolvido em linguagem C no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, o qual integra o editor de texto e o compilador para o microcontrolador ESP32 DEVKITV1.

Um modelo de máquina de estados finita foi utilizado para se basear no desenvolvimento da lógica de funcionamento do sistema e a Figura 55 apresenta o fluxograma simplificado do comportamento do *firmware*.



(a) Tensão de saída V_S .

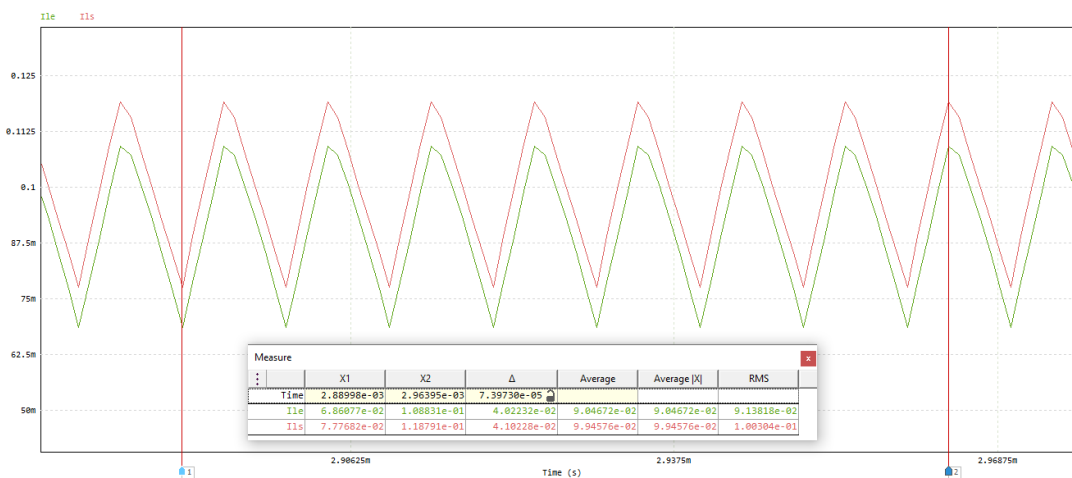


(b) Corrente de saída I_S .

Figura 48 – Formas de onda na saída do conversor Ćuk.

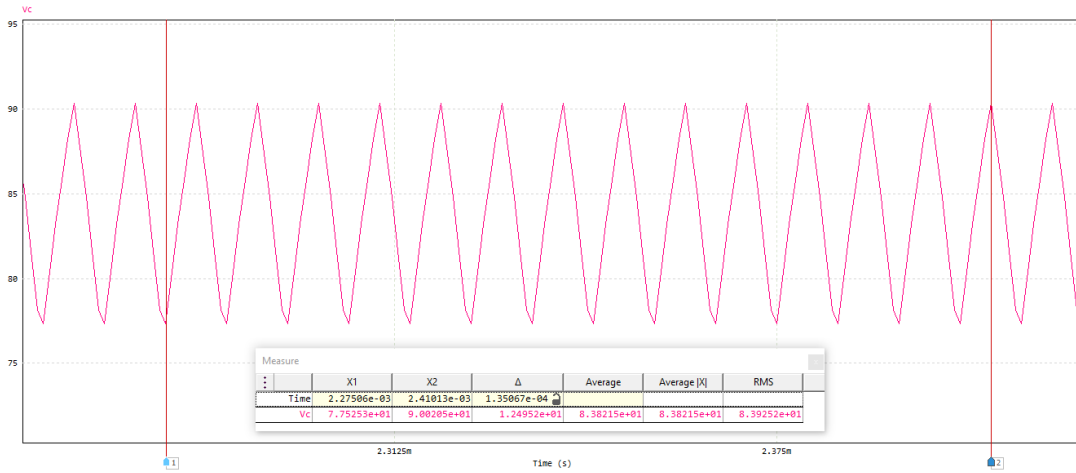
Fonte: O autor (2023).

Figura 49 – Forma de onda da corrente nos indutores L_E e L_S .

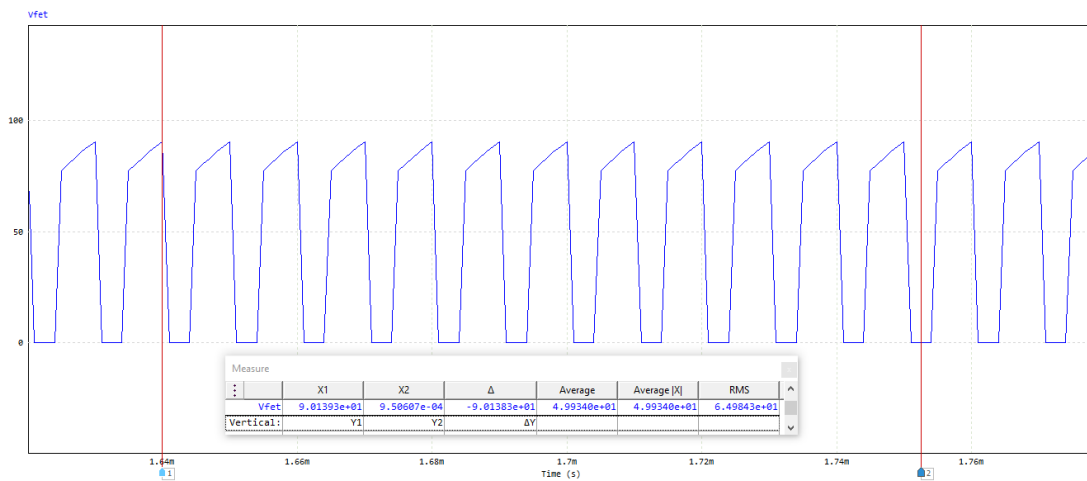


Fonte: O autor (2023).

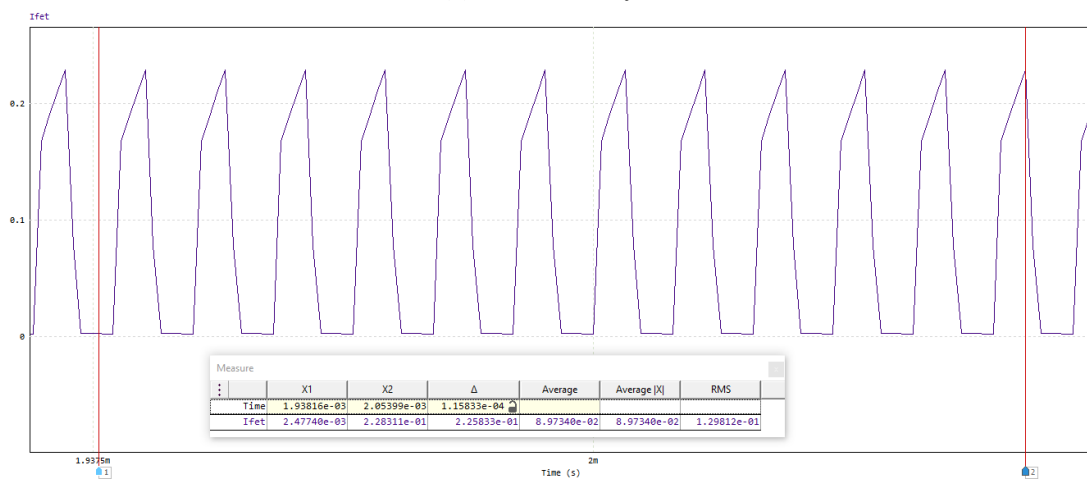
Figura 50 – Forma de onda da tensão no capacitor C .



Fonte: O autor (2023).



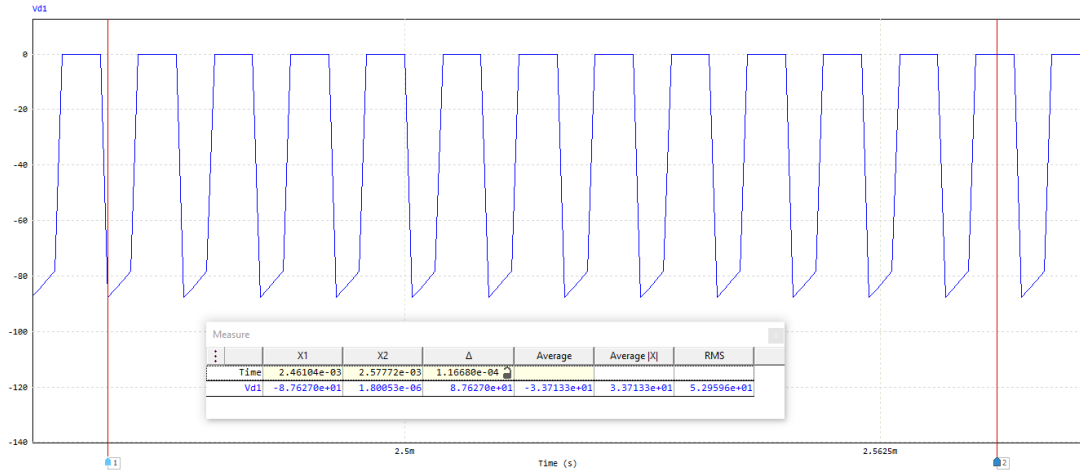
(a) Tensão em $Q1$.



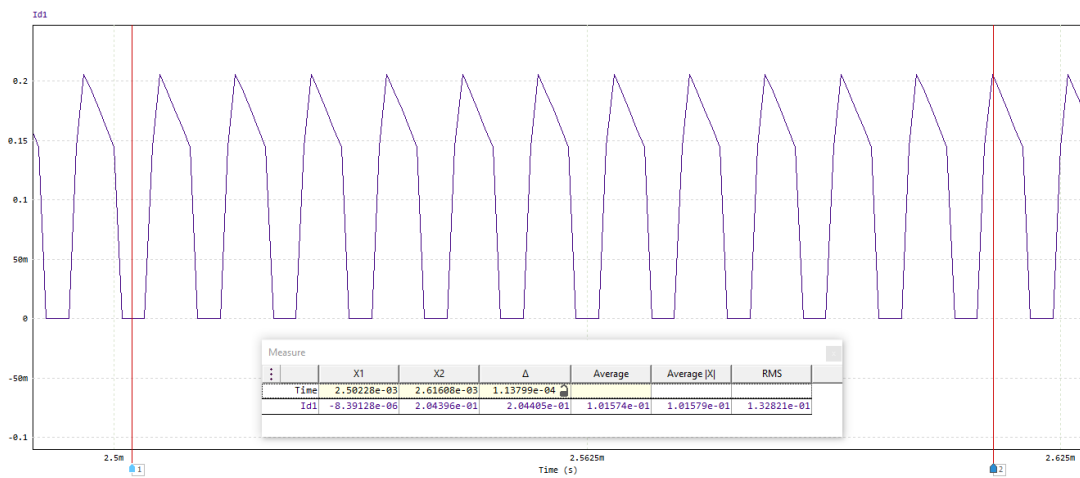
(b) Corrente em $Q1$.

Figura 51 – Formas de onda no transistor $Q1$.

Fonte: O autor (2023).



(a) Tensão em $D1$.

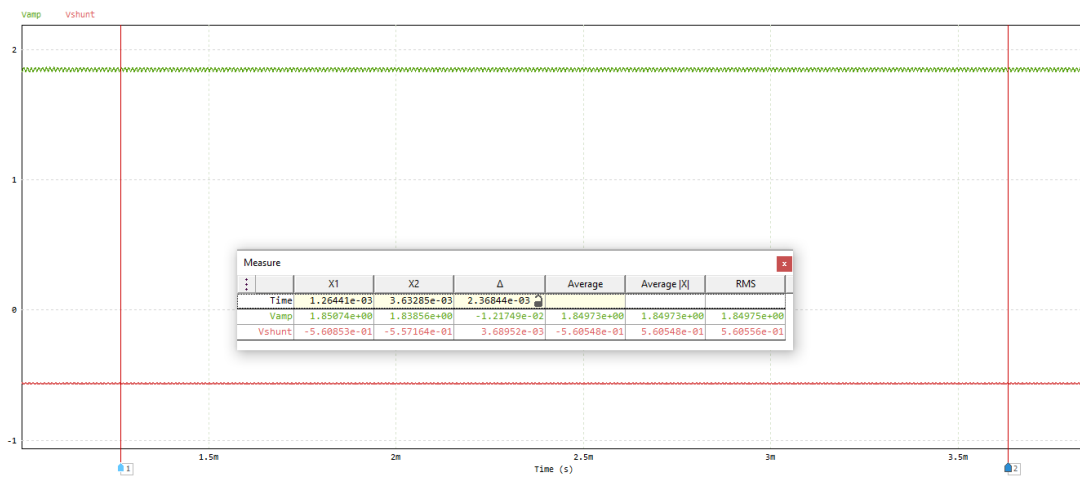


(b) Corrente em $D1$.

Figura 52 – Formas de onda no diodo $D1$.

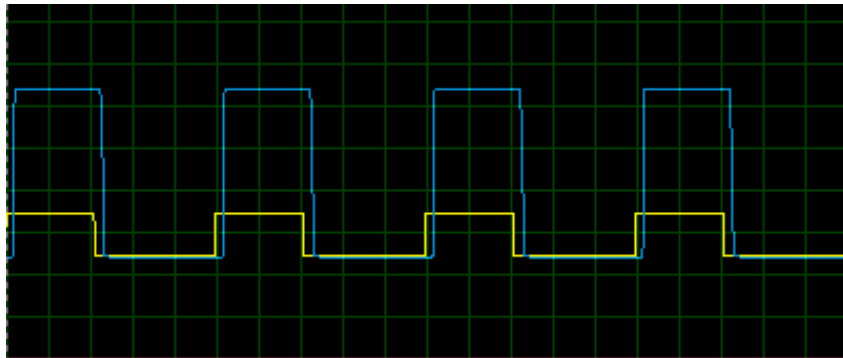
Fonte: O autor (2023).

Figura 53 – Formas de onda da tensão na entrada e na saída do amplificador inversor do resistor *shunt*.



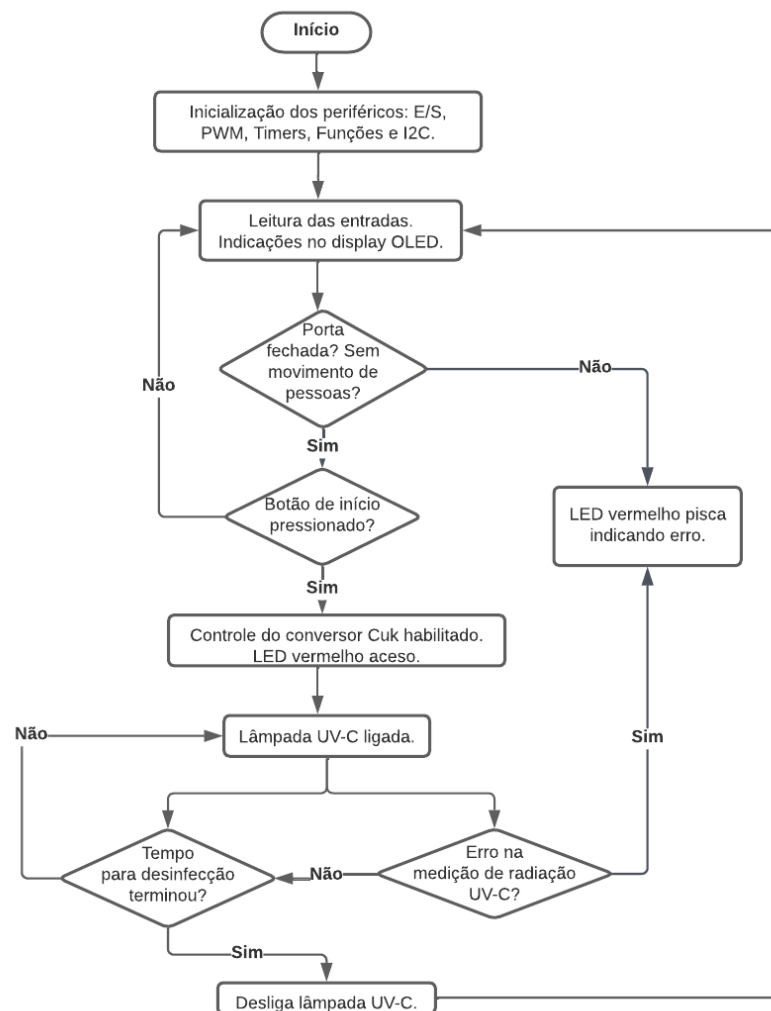
Fonte: O autor (2023).

Figura 54 – Formas de onda da tensão na entrada e na saída do circuito *gate driver*.



Fonte: O autor (2023).

Figura 55 – Fluxograma de comportamento do *firmware*.



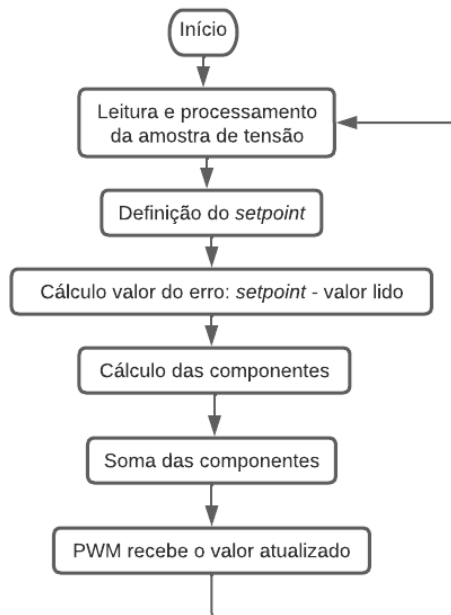
Fonte: O autor (2023).

Para que o conversor opere adequadamente, é medida a corrente de saída através do nó do resistor *shunt*. Quando I_S é 100 mA, a tensão neste nó é de -0,56 V. Essa amostra de tensão é

então enviada ao amplificador inversor com ganho de -3,3. Portanto, o microcontrolador lê em sua entrada analógica a amostra de tensão de 1,85 V, que representa um *duty cycle* de 0,4255, que é definido como o *setpoint*. Qualquer variação nessa amostra de tensão é lida e processada pelo compensador P, logo ocorre o aumento ou decremento do *duty cycle* para que ela retorne ao valor de *setpoint*. O fluxograma da Figura 56 ilustra este procedimento do compensador.

A implementação do *duty cycle* foi elaborada como uma saída PWM do microcontrolador. O ESP32 possui *clock* de 80 MHz. Para o PWM com frequência de 100 kHz foi escolhida uma resolução de 8 bits, ou seja, pode-se variar o *duty cycle* numa faixa de 0 a 255. A fim de obter o *setpoint* desejado é realizada uma interpolação com a leitura da amostra de tensão, estabelecendo então o valor de 108, que equivale ao *duty cycle* de 0,4255 necessário para a correta operação do conversor.

Figura 56 – Fluxograma para implementação digital do compensador P.



Fonte: O autor (2023).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

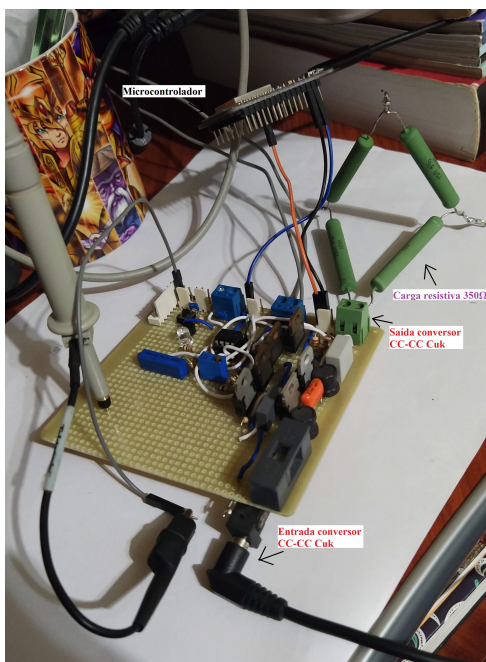
Através das análises qualitativas e quantitativas preliminares é possível obter os valores máximos e mínimos de todos os componentes eletrônicos necessários para a implementação do sistema. Então, pela simulação em *softwares* garante-se a correta operação do sistema, pois potenciais erros puderam ser eliminados nessa etapa.

5 RESULTADOS

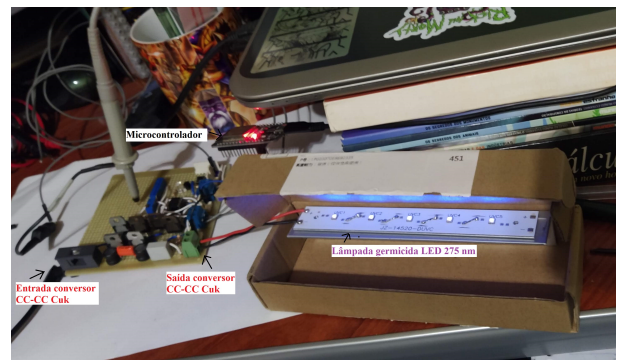
Com o objetivo de validar os resultados obtidos por meio das simulações da Seção 4.4, foi realizada a aquisição das formas de onda e grandezas elétricas com o uso dos seguintes equipamentos para testes:

- a) Osciloscópio Agilent Technologies DSO1052B; e
- b) Multímetro digital Minipa ET-1002.

Inicialmente, foi utilizada uma carga puramente resistiva de $350\ \Omega$, valor equivalente a série de LEDs UV-C, para validação dos níveis de entrada e saída do conversor. Posteriormente, foi feita a conexão da série de LEDs UV-C. A Figura 57 apresenta a montagem para os testes das duas situações. Em ambos os casos foram obtidos praticamente os mesmos sinais. Logo, os níveis e formas de ondas apresentados nas seções seguintes foram coletados com a série de LEDs UV-C conectada na saída do conversor $\hat{C}uk$.



(a) Carga resistiva.



(b) Série de LEDs UV-C.

Figura 57 – Montagem das duas situações utilizadas nos testes.

Fonte: O autor (2023).

5.1 TESTE DO CONVERSOR $\hat{C}uk$

Com base no método utilizado por Hu *et al.* (2014) foram adquiridas cinco medições intervaladas por dois segundos para cada uma das grandezas elétricas inerentes ao conversor em regime permanente. A partir delas foi calculada uma média aritmética simples com a

Equação 5.1 e então foi calculado o erro percentual em relação aos valores calculados na Seção 4.1.1.2 através da Equação 5.2. O resultado dos testes está exposto na Tabela 6.

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i \quad (5.1)$$

$$e(\%) = \frac{\bar{x} - x_{calculado}}{x_{calculado}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Tabela 6 – Medições realizadas com o multímetro.

| Medição | V_S (V) | I_S (mA) | V_{shunt} (mV) | V_{amp} (V) |
|---------|-----------|------------|------------------|---------------|
| 1 | -35,6 | 101,4 | -566 | 1,89 |
| 2 | -35,8 | 101,1 | -572 | 1,82 |
| 3 | -35,4 | 100,7 | -561 | 1,86 |
| 4 | -35,6 | 101,2 | -564 | 1,84 |
| 5 | -35,5 | 100,9 | -575 | 1,91 |
| Média | -35,58 | 101,06 | -567,60 | 1,86 |
| Erro | 0,0562% | 1,0600% | 1,3571% | 0,7568% |

Fonte: O autor (2023).

No conector VE foi aplicada a tensão de 48 V fornecida por uma fonte de alimentação PFC, assim como nos conectores dedicados as tensões auxiliares de 5 V e 12 V. Nas subseções a seguir estão apresentadas as imagens e comentários referentes às medições adquiridas.

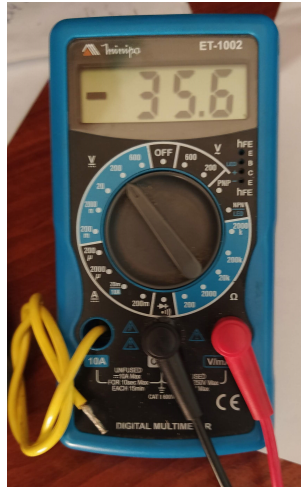
5.1.1 Tensão de saída

A tensão de saída V_S sobre a carga R_S calculada é de 35,56 V. Primeiramente, as medições foram realizadas com o multímetro na escala de 200 V, como ilustra a Figura 58. Em seguida, foi realizada a aquisição da sua forma de onda com o osciloscópio que pode ser visualizada na Figura 59. A forma de onda apresentou pouca ondulação devido a alta capacitância de C_S . E as tensões medidas pelos dois equipamentos estão próximas uma da outra em questão de valor, confirmando o valor calculado de V_S .

5.1.2 Corrente de saída

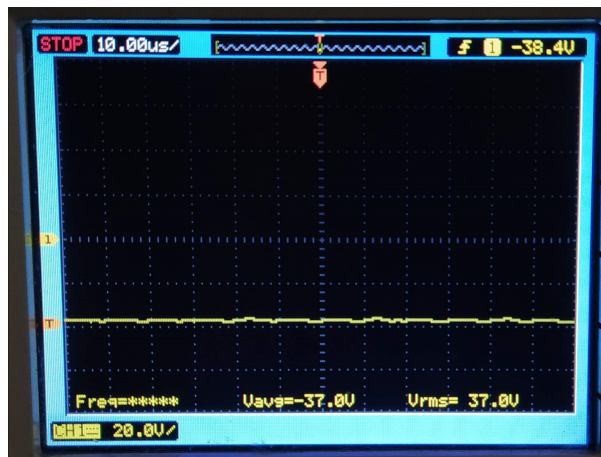
A corrente de saída I_S circulando na carga R_S calculada é de 100 mA. Primeiramente, as medições foram realizadas com o multímetro na escala de 200 mA, como ilustra a Figura 58. Conforme pode-se observar, I_S manteve-se muito próxima do ideal, com uma média de 101,06 mA, e sofrendo pouca variação ao longo do tempo. Tais resultados são satisfatórios para que a intensidade da radiação emitida pelos LEDs UV-C mantenha-se constante.

Figura 58 – Medição de V_S com o multímetro.



Fonte: O autor (2023).

Figura 59 – Medição de V_S com o osciloscópio.



Fonte: O autor (2023).

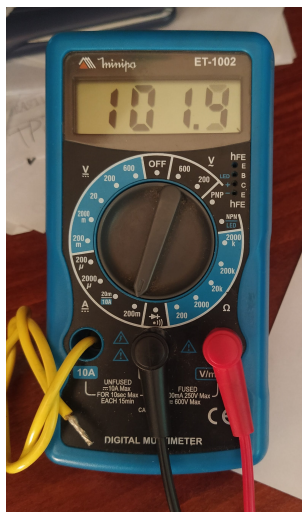
5.1.3 Tensão no resistor de *shunt*

A tensão V_{shunt} no nó referente ao resistor de *shunt* calculada é de -560 mV. Primeiramente, as medições foram realizadas com o multímetro na escala de 2000 mV, como ilustra a Figura 61a. Em seguida, foram realizadas as medições da tensão V_{amp} na saída do amplificador-inversor, agora com o multímetro na escala de 20 V, como ilustra a Figura 61b. A tensão V_{amp} calculada é de 1,85 V.

Com uma média de -567,60 mV na entrada do amplificador-inversor e uma média de 1,86 V na saída do mesmo, a amostra de tensão responsável pelo funcionamento correto do sistema em malha fechada comprovou o valor de I_S lido, pois sabendo-se que a resistência de R_{shunt} é de $5,6 \Omega$, de acordo com a Lei de Ohm

$$V_{shunt} = -5,6\Omega \cdot 101,06mA = -565,94mV$$

Figura 60 – Medição de I_S com o multímetro.

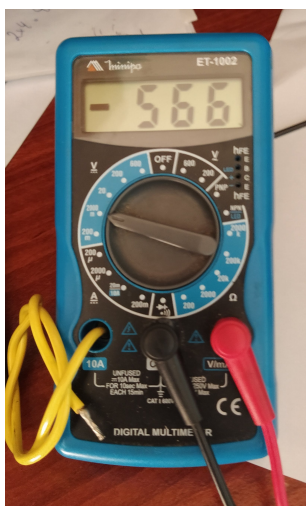


Fonte: O autor (2023).

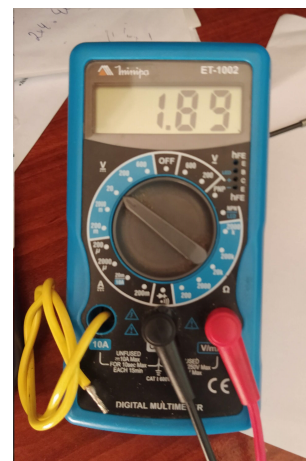
e sendo o ganho do amplificador-inveror de $-3,3$ resulta em

$$V_{amp} = (-565,94mV) \cdot (-3,3) = 1,87V.$$

A Figura 62 apresenta as formas de onda de V_{shunt} e V_{amp} adquiridas pelo osciloscópio, respectivamente. Aliadas aos valores de tensão de -586 mV e $1,78$ V lidos pelo osciloscópio, os testes realizados validam aos valores calculados e simulados.



(a) Medição de V_{shunt} .



(b) Medição de V_{amp} .

Figura 61 – Tensões no resistor de *shunt* medidas com o multímetro.

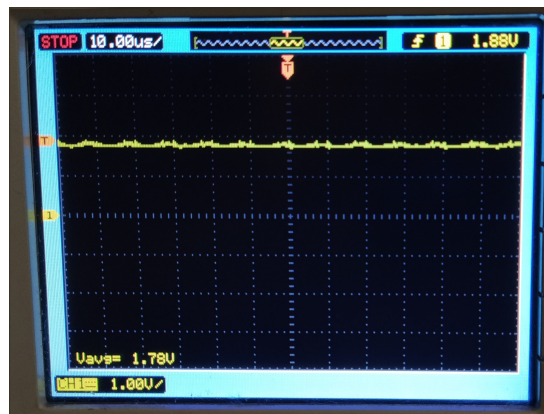
Fonte: O autor (2023).

5.1.4 Tensão no capacitor

A tensão V_C calculada para o capacitor de entrada C é de $83,55$ V. Conforme a forma de onda apresentada pela Figura 63, a tensão média medida foi de $76,1$ V, sendo que a diferença



(a) Medição de V_{shunt} .



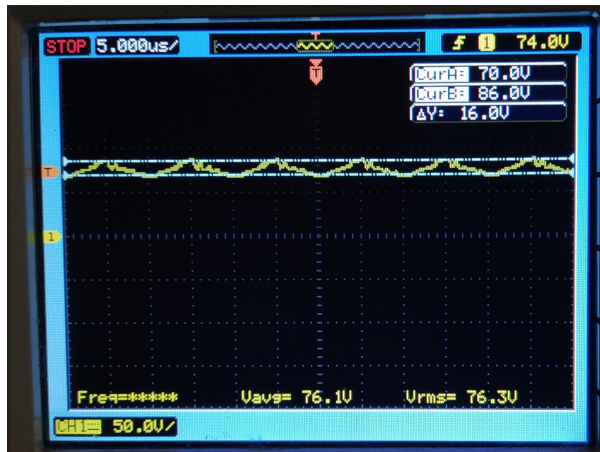
(b) Medição de V_{amp} .

Figura 62 – Tensões no resistor de *shunt* medidas com o osciloscópio.

Fonte: O autor (2023).

da ondulação de tensão existente foi de 16 V, que representam 21% da tensão medida. Nota-se que este valor ultrapassou a ondulação de tensão estipulada de 15%, pois a capacitância de C é menor que a calculada e possui tolerância de 10%, variando assim de 29,7 nF a 36,3 nF. Mesmo com a ondulação de tensão maior, o correto funcionamento do conversor foi mantido.

Figura 63 – Medição de V_C com o osciloscópio.



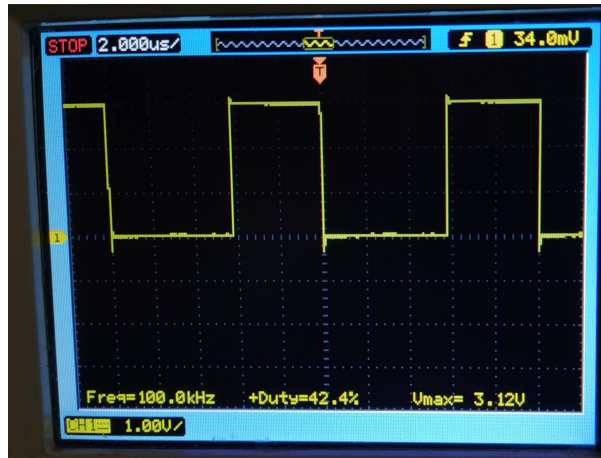
Fonte: O autor (2023).

5.1.5 Gate Driver

O sinal PWM enviado pelo microcontrolador foi definido com uma frequência de 100 kHz e *duty cycle* de 42,55%. A Figura 64 apresenta a medição obtida desse sinal com o osciloscópio, confirmando a frequência e *duty cycle*.

Após o sinal PWM passar pelo circuito *gate driver*, explicado na Seção 4.1.1.5, idealmente, deveria ser obtido um sinal igual, mas devido a atrasos no chaveamento dos transistores e a alta frequência, a forma de onda da Figura 65, medida no terminal *gate* de $Q1$ com o os-

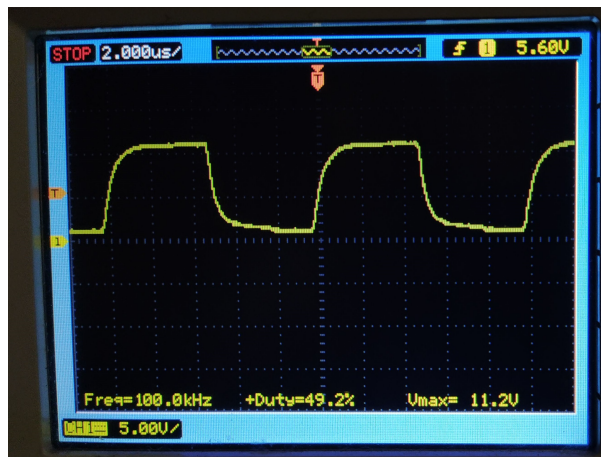
Figura 64 – Medição do sinal PWM com o osciloscópio.



Fonte: O autor (2023).

osciloscópio, apresenta distorções. Contudo, o sinal obtido manteve a mesma frequência e foi amplificado na tensão necessária para acionar $Q1$.

Figura 65 – Medição do sinal no terminal *gate* de $Q1$ com o osciloscópio.



Fonte: O autor (2023).

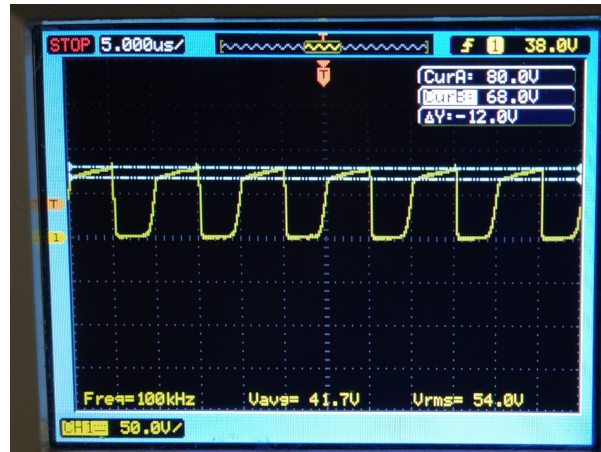
5.1.6 Tensão no transistor MOSFET

De acordo com a Equação 4.21 e a Equação 4.22, a forma de onda da Figura 66 mostra a tensão máxima de aproximadamente 80 V, valor abaixo do limite de $Q1$. Logo, o sinal lido no terminal *drain* do transistor apresenta o chaveamento esperado.

5.1.7 Tensão no diodo

Os valores de tensão máxima e mínima em $D1$ calculados são os mesmos de $Q1$, porém com polaridade contrária. Comprovam-se os cálculos e simulações através da forma de onda da

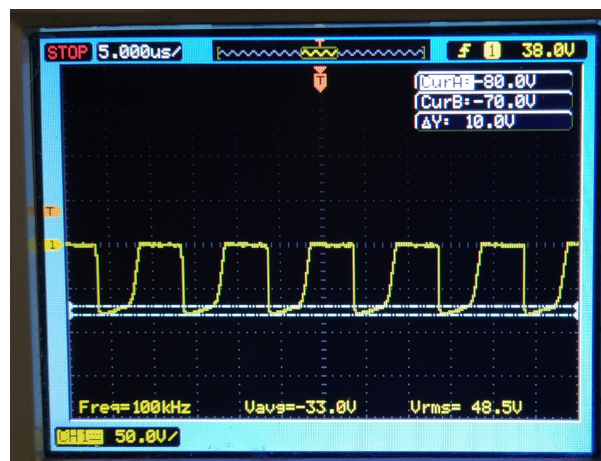
Figura 66 – Medição do sinal no terminal *drain* de *Q1* com o osciloscópio.



Fonte: O autor (2023).

Figura 67. A tensão máxima de aproximadamente -80 V é um valor abaixo do limite de *D1*. Assim, o sinal lido no ânodo do diodo apresenta o chaveamento esperado.

Figura 67 – Medição do sinal no ânodo de *D1* com o osciloscópio.



Fonte: O autor (2023).

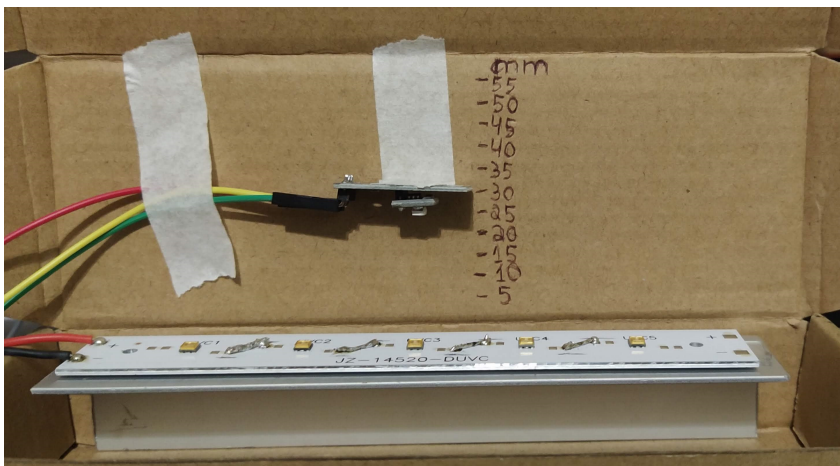
5.2 TESTE DE IRRADIAÇÃO UV-C

De modo a comprovar a irradiância da lâmpada germicida LED implementada, foi elaborado um teste com o sensor de radiação UV posicionado a certas distâncias de um LED UV-C, como ilustra a Figura 68. Com o auxílio do microcontrolador foram adquiridas cinco medições para sete distâncias, onde cada uma foi obtida com um intervalo de um segundo. Iniciaram-se as medições na distância de 5 mm finalizando na distância de 35 mm, pois a essa distância a irradiação lida já era nula. A Tabela 7 apresenta as medições obtidas com a média calculada com a Equação 5.1. A partir da média, foi relacionado o índice UV¹ equivalente a cada tensão

¹ O índice UV foi desenvolvido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, a Organização Meteorológica Mundial e a Comissão Internacional de Proteção contra

lida na saída do sensor de radiação UV. Para então, converter o índice UV em irradiação, em mW/cm^2 , sendo que o índice UV igual a 1 equivale a $0,25 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

Figura 68 – Estrutura elaborada para o teste de irradiação UV-C.



Fonte: O autor (2023).

Tabela 7 – Resultados dos testes de irradiação.

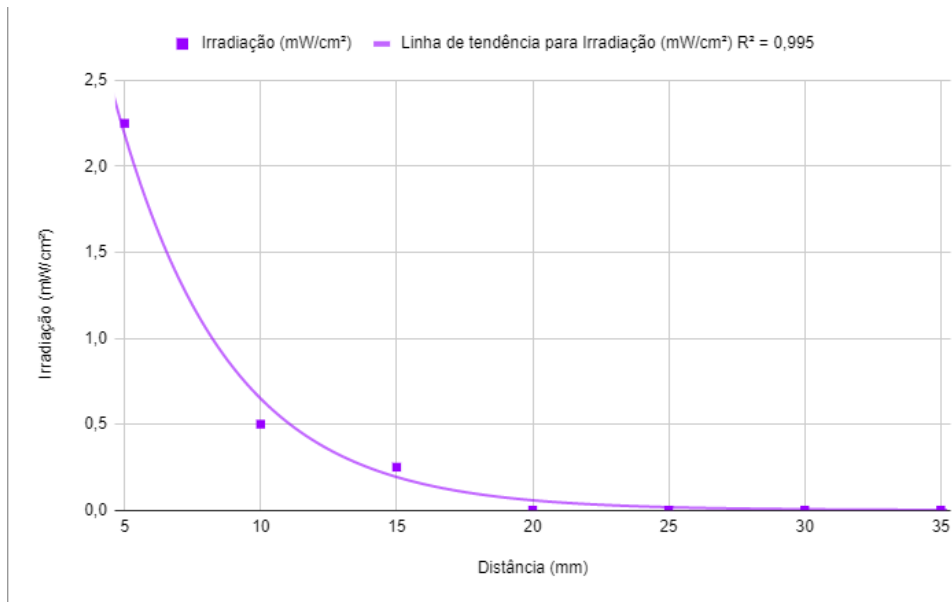
| Distância (mm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--|-------|-------|------|------|-----|-----|----|
| Tensão (mV) | | | | | | | |
| 1 | 895 | 232 | 64 | 28 | 8 | 1 | 0 |
| 2 | 924 | 233 | 65 | 21 | 8 | 3 | 0 |
| 3 | 940 | 236 | 68 | 24 | 10 | 1 | 0 |
| 4 | 955 | 241 | 66 | 23 | 8 | 2 | 0 |
| 5 | 967 | 239 | 68 | 22 | 12 | 1 | 0 |
| Média (mV) | 936,2 | 236,2 | 66,2 | 23,6 | 9,2 | 1,6 | 0 |
| Índice UV | 9 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Irradiação (mW/cm^2) | 2,25 | 0,5 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: O autor (2023).

A partir dos dados obtidos foi plotado o gráfico de dispersão e a curva de regressão exponencial que podem ser visualizados na Figura 69. O valor calculado para R^2 indica que o modelo explica 99,5% da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. Além disso, pode-se observar que devido ao método do índice UV não ser tão preciso, algumas medições adquiridas tornaram-se nulas quando convertidas para irradiação. Entretanto, a curva modelada expressa a taxa de decaimento exponencial da irradiação em função da distância.

Radiação Não Ionizante. Ele é uma importante relação que orienta a população para os riscos da exposição excessiva à radiação UV e alerta para a necessidade de adoção de medidas de proteção. O índice UV varia de 0 a 11, sendo que quanto mais próximos de 0 forem os valores, menor é intensidade e quanto mais próximos de 11, mais extrema é a intensidade da radiação UV. (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2022)

Figura 69 – Gráfico do teste de irradiação UV-C.



Fonte: O autor (2023).

5.3 TESTE PRÁTICO NUMA CABINE DE ELEVADOR

Para a implementação do sistema de desinfecção numa cabine de elevador, primeiramente todo o sistema foi montado e testado em laboratório com o auxílio do monitor serial do *software* de programação. A Figura 70 mostra a montagem do sistema para os primeiros testes. Após a certificação da correta operação de todo o sistema, foi realizada sua implementação numa cabine de elevador do Hospital Geral de Caxias do Sul. A cabine da Figura 71 está situada no 1º andar do prédio conhecido como UNACON e foi escolhida por haver outra cabine disponível ao lado, possibilitando assim a realização dos testes.

Figura 70 – Teste em laboratório do sistema de desinfecção.



Fonte: O autor (2023).

Figura 71 – Cabine do elevador utilizado para teste.

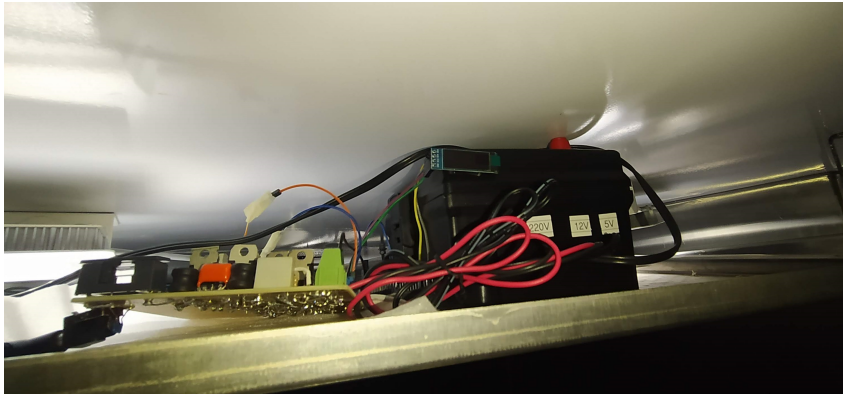


Fonte: O autor (2023).

Primeiramente foram organizadas as fontes de alimentação e a placa eletrônica acima das chapas que formam o teto da cabine como pode ser observado na Figura 72. A partir deste ponto, foram sendo dispostos os dispositivos de segurança pelo interior da cabine conforme as figuras do Apêndice D. A chave fim de curso da Figura 76a foi fixada de modo a ser acionada quando a porta do elevador estiver totalmente fechada. Havendo dois sensores de presença fixados, o sensor da Figura 76b permaneceu logo acima da porta enquanto que o sensor da Figura 76c foi centralizado no teto da cabine.

Finalmente, a lâmpada germicida LED foi fixada na área onde estão os botões de seleção de andar e logo abaixo foi fixado o sensor de radiação UV-C, como ilustra a Figura 73. Havendo então a organização de todas as partes, foram realizados os testes dos dispositivos de segurança e da desinfecção da área abaixo da lâmpada, aproximando o sensor de radiação da lâmpada de modo similar ao executado no Seção 5.2, e verificando-se então a irradiação medida. Como esperado, quão mais próxima a lâmpada estiver da superfície mais rápida será a desinfecção devido a maior radiação incidente. Esperava-se que seriam necessários 87 segundos de radiação para a inativação dos patógenos na superfície, conforme estipulado no Seção 3.1. Porém, com o valor de irradiância E_e de 2,25 mW/cm² medido a uma distância de 5 mm, conforme a Equação 2.1 obtêm-se o tempo mínimo de 89 segundos com a série de cinco LEDs emitindo a

Figura 72 – Fontes de alimentação e placa eletrônica dentro da cabine.

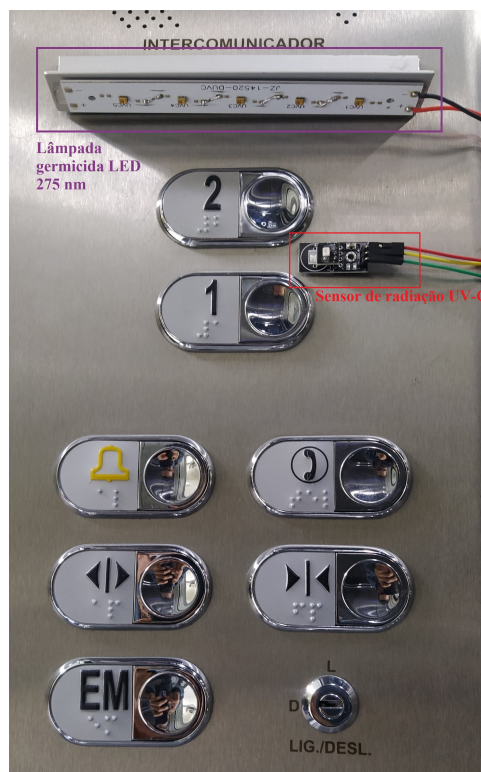


Fonte: O autor (2023).

irradiância total E_{eTotal} de 11,25 mW/cm².

De modo geral, conclui-se que o sistema de desinfecção funcionou adequadamente, ativando a lâmpada germicida quando permitido e solicitado e então desativando-a quando algum dos dispositivos de segurança era acionado ou quando o tempo de desinfecção havia terminado. É importante ressaltar que nenhum dos testes envolveu pessoas de fora do projeto para que não houvesse a exposição delas à radiação UV-C.

Figura 73 – Lâmpada germicida LED e sensor de radiação UV-C.



Fonte: O autor (2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a preocupação crescente por patógenos infecciosos, principalmente o vírus do COVID-19, a desinfecção de superfícies com radiação UV-C é uma das soluções mais eficazes através do desenvolvimento de um sistema de iluminação controlado e monitorado. De acordo com a revisão bibliográfica realizada no Capítulo 2, principalmente em fontes estrangeiras, foram comparados diversas pesquisas e assim foram definidas as melhores características para o desenvolvimento deste trabalho.

O modelo de LED UV-C com comprimento de onda de 275 nm foi o que apresentou maior capacidade de desinfecção. A partir de um estudo sobre os conversores CC/CC, foi escolhida a topologia \dot{C} uk, ideal devido a sua saída com característica de corrente contínua, para o controle da corrente I_f de 100 mA para uma série de cinco LEDs. Dessa maneira garantiu-se um nível de irradiação constante da lâmpada germicida LED.

Foram apresentadas as análises qualitativas e quantitativas para o conversor \dot{C} uk, assim como simulações e modelagem em pequenos sinais através de ferramentas computacionais. Estas ações permitiram a percepção de erros e o desenvolvimento do compensador responsável pelo controle em malha fechada. Devido as características do microcontrolador ESP32 DEV-KITV1, sua utilização possibilitou a implementação eficaz e mais simplificada do *firmware* e controle de todo o sistema.

Os testes realizados no Capítulo 5 forneceram dados suficientes para comprovar os cálculos e simulações. Apenas algumas medidas apresentaram erros maiores devido aos parâmetros intrínsecos dos componentes utilizados, como seus valores de tolerância. Uma PCI foi elaborada, a qual não pode ser adquirida de forma real devido a custos. Logo, um protótipo foi construído, o qual possibilitou validar o funcionamento do sistema de forma prática em uma cabine de elevador, verificando assim a atuação dos dispositivos de segurança. Devido aos riscos associados a exposição da pele pela radiação UV-C esse teste não foi permitido ao público. Quanto aos testes de irradiação, a lâmpada germicida LED apresentou êxito, verificando-se que ela é capaz de inativar os patógenos em cerca de 89 segundos a uma distância de 5 mm da superfície. Portanto, os objetivos propostos no trabalho foram alcançados e acredita-se que se o sistema fosse instalado de maneira permanente haveria uma redução na taxa de infecção das pessoas que utilizam elevadores diariamente, principalmente os funcionários da área da saúde.

Em trabalhos futuros sugere-se a utilização de LEDs UV-C de maior potência ótica que possibilitariam a desinfecção das superfícies em menos tempo ou a uma distância maior, tais LEDs necessitariam o desenvolvimento de conversores de maior potência e eficiência. Também, por se tratar de um ambiente fechado, pode ser desenvolvido um sistema de recirculação do ar no interior da cabine, fazendo com que esse ar passe por uma lâmpada germicida LED e seja

descontaminado.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas: Quem somos.** Brasil: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.abnt.org.br/institucional/sobre>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

AL-GHARABLI, S. *et al.* Engineering of a highly efficient Xe²⁺-excilamp (xenon excimer lamp, $\lambda_{max} = 172$ nm, $\eta = 40\%$) and qualitative comparison to a low-pressure mercury lamp (lp-hg, $\lambda = 185/254$ nm) for water purification. **Chemosphere**, v. 144, p. 811–815, 2016.

ANTUNES, F.; LEÃO, R.; SAMPAIO, R. **Harmônicos em Sistemas Elétricos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 376 p.

ANVISA. **NOTA TÉCNICA Nº 82/2020/SEI/COSAN/GHCOS/DIRE3/ANVISA: Uso de luz ultravioleta (uv) para desinfecção de ambientes públicos e hospitalares.** Brasil, 2020. 9 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/arquivos-noticias-anvisa/114json-file-1>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

_____. **NOTA TÉCNICA Nº 32/2021/SEI/COSAN/GHCOS/DIRE3/ANVISA: Orientações sobre avaliação de eficácia e segurança dos equipamentos emissores de luz ultravioleta (uv) com ação desinfetante.** Brasil, 2021. 9 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/saneantes/notas-tecnicas/nota-tecnica-32_2021-guia-uv.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2022.

_____. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária: Institucional.** Brasil: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/acessoainformacao/institucional>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13994: Elevadores de passageiros - elevadores para transporte de pessoa portadora de deficiência.** Rio de Janeiro, 2000. 15 p.

_____. **NBR 13994: Elevadores elétricos e hidráulicos - elevadores de carga, monta-cargas e elevadores de maca - requisitos de segurança para construção e instalação.** Rio de Janeiro, 2013. 18 p.

BAGNATO, V. **Esterilização de ambientes com luz ultravioleta: como funciona?** Brasil, 2022. Disponível em: <<https://summitsaude.estadao.com.br/tecnologia/esterilizacao-de-ambientes-com-luz-ultravioleta-como-funciona/>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas - Vol. 1.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 493 p.

_____. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas - Vol. 2.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 493 p.

BALOGH, T. S. *et al.* **Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção.** [S.l.]: An Bras Dermatol, 2011.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência - Projetos de fontes chaveadas.** 3. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2001. 332 p.

CCI. **Processamento de Artigos e Superfícies em Estabelecimentos de Saúde**. Brasília, 1994.

CIE. Posicionamento da cie sobre o uso de radiação ultravioleta (uv) para lidar com o risco de transmissão do covid-19. p. 8, 05 2020.

CIUGUDEANU, C.; BEU, D.; BUZDUGAN, M. Sterilightvent - hybrid uv lighting decontamination device. **2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)**, v. 11, n. 22, p. 1–5, 2021.

COMISSÃO INTERNACIONAL DE ELETROTÉCNICA. **EN IEC 61000-3-2:2019**: Compatibilidade eletromagnética: Limites para emissões de distorção harmônica de corrente (equipamentos com corrente de entrada ≤ 16 a por fase). Europa, 2019. 7 p.

CORONAVÍRUS BRASIL. **Painel de casos de doença pelo coronavírus 2019 (COVID-19) no Brasil pelo Ministério da Saúde**. Brasil, 2022. Disponível em: <<https://covid.saude.gov.br/>>. Acesso em: 27 mar. 2022.

DOREMALEN, N. van *et al.* Aerosol and surface stability of sars-cov-2 as compared with sars-cov-1. **N Engl J Med.**, v. 382, n. 1, p. 1564–1567, 2020.

EKT Katrangi Bros. **Arduino Sensor Ultra Violet**: Model: Uvm -30a. 1. ed. China: EKT Katrangi Bros., 2019. 1 p.

Espressif Systems. **ESP32 Series Datasheet**. 3.5. ed. China: Espressif Systems, 2021. 64 p.

FDA. **UV Lights and Lamps: Ultraviolet-C Radiation, Disinfection, and Coronavirus**. EUA, 2021, tradução nossa. Disponível em: <<https://www.fda.gov/medical-devices/coronavirus-covid-19-and-medical-devices/uv-lights-and-lamps-ultraviolet-c-radiation-disinfection-and-coronavirus>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 3. ed. New York: Springer-Verlag, 2004. 589 p.

FRANCO, S. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 715 p.

GAGO-CALDERÓN, A.; OREJÓN-SÁNCHEZ, R. D.; HERMOSO-ORZÁEZ, M. J. Dc network indoor and outdoor led lighting. **Light-Emitting Diode - An Outlook On the Empirical Features and Its Recent Technological Advancements**, 2018. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/59803>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

GREEN, A. *et al.* The efficacy of uvc leds and low pressure mercury lamps for the reduction of escherichia coli o157:h7 and listeria monocytogenes on produce. **Innovative food science & emerging technologies**, v. 64, n. 8, p. 102410, 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Vol. 4 - Óptica e Física Moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. 400 p.

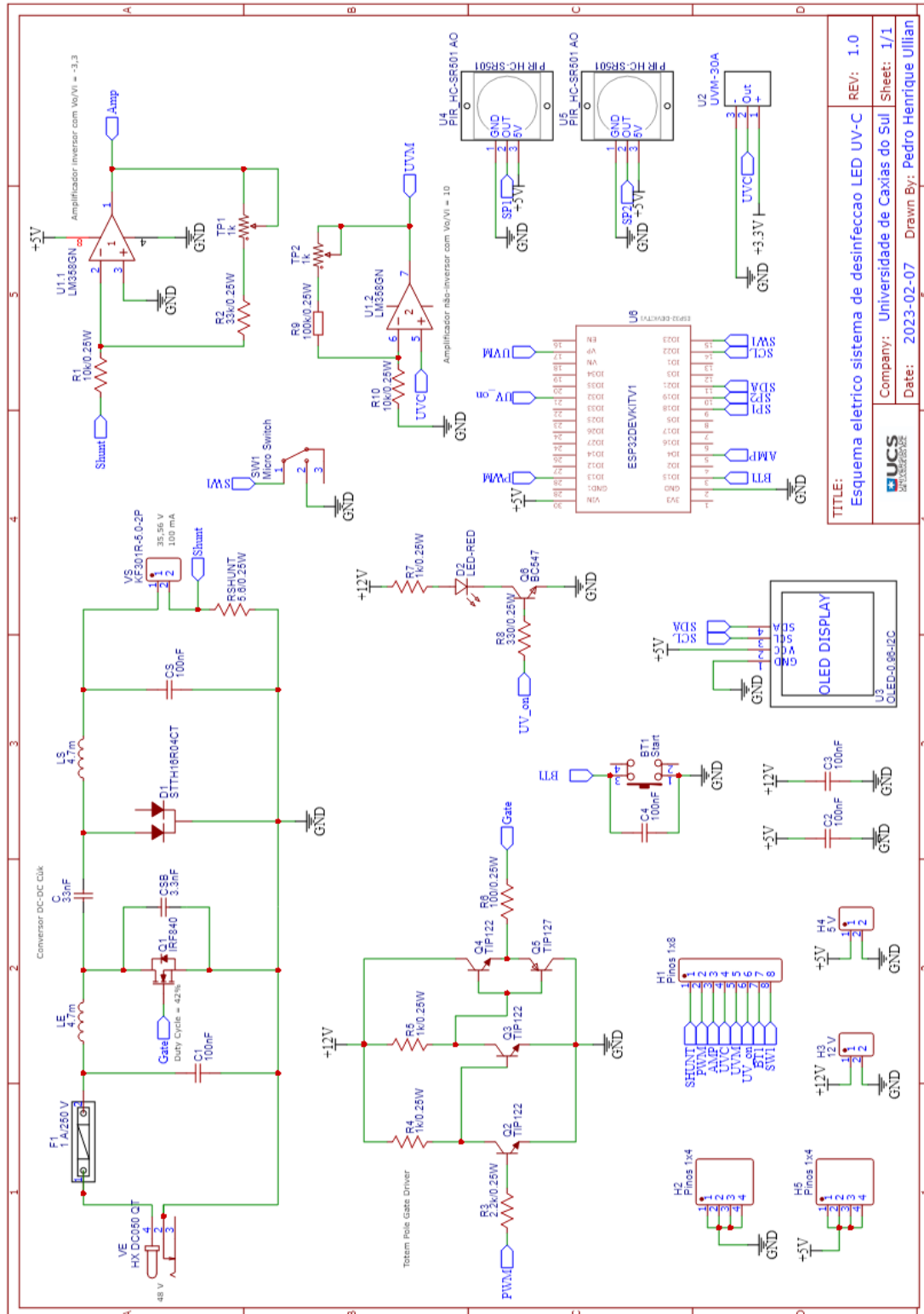
HOCKBERGER, P. The discovery of the damaging effect of sunlight on bacteria. **Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology**, v. 58, p. 185–91, 12 2000.

- HSU, T.-C. *et al.* Perspectives on uvc led: Its progress and application. **Photonics**, v. 8, n. 6, p. 196, 2021.
- HU, G. *et al.* Constant current control of dc electronic load based on boost topology. **Elektronika Ir Elektrotehnika**, v. 20, p. 36–39, 2014.
- IES. **IES Committee Report: Germicidal Ultraviolet (GUV) – Frequently Asked Questions**. EUA, 2020. Disponível em: <<https://media.ies.org/docs/standards/IES-CR-2-20-V1-6d.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- JUAREZ-LEON, F. A. *et al.* Design and implementation of a germicidal uvc-led lamp. **IEEE Access**, v. 8, p. 196951–196962, 2020.
- Júnior, L. F. **Resultados da atividade antiviral contra SARS-CoV-2 induzida pelo protótipo do equipamento UVsurface da empresa BioLambda, Científica e Comercial Ltda.** São Paulo: ICB-USP, 2020. 5 p.
- KATHI, L. *et al.* Open-loop small-signal modeling of cuk dc-dc converter in ccm by circuit-averaging technique. **2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)**, p. 1–6, 2018.
- KOUTCHMA, T.; GREEN, A.; POPOVIĆ, V. Uv light-emitting diodes: The upcoming solution for enhanced food safety. **Food Safety Magazine.**, 2018.
- LAGUNAS-SOLAR, M. Food technologies: Pulsed ultraviolet radiation processing. **Photochemistry and photobiology**, v. 3, p. 225–238, 2014.
- LEMES, N. P. **A CAMADA DE OZÔNIO**. São José dos Campos-SP: Laboratório de Ozônio do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2014. 21 p.
- LIANG, J.-J. *et al.* The effectiveness of far-ultraviolet (uvc) light prototype devices with different wavelengths on disinfecting sars-cov-2. **Appl. Sci.**, v. 11, n. 22, p. 10661, 2021.
- MATAFONOVA, G. *et al.* Efficiency of krcl excilamp (222 nm) for inactivation of bacteria in suspension. **Lett Appl Microbiol**, v. 47, n. 6, p. 508–513, 2008.
- MAZZAROPPI, M. Sensores de movimento e presença. **Eng. Elétrica. Rio de Janeiro**, 2007.
- MCDERMOTT, S. L.; WALSH, J. E.; HOWARD, R. G. A comparison of the emission characteristics of uv-leds and fluorescent lamps for polymerisation applications. **Optics & Laser Technology**, v. 40, p. 487–493, 2008.
- NARLA, S. *et al.* The importance of the minimum dosage necessary for uvc decontamination of n95 respirators during the covid-19 pandemic. **Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine**, v. 36, abr. 2020.
- Nobel Prize. **Niels Ryberg Finsen – Nobel Lecture**. 2021. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1903/finsen/facts/>>. Acesso em: 26 mar 2022.
- NYANGARESI, P. O. *et al.* Comparison of the performance of pulsed and continuous uvc-led irradiation in the inactivation of bacteria. **Water Research**, v. 157, p. 218–227, 2019.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2010. 822 p.

- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Histórico da pandemia de COVID-19**. Brasil, 2022. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/covid19/historico-da-pandemia-covid-19>>. Acesso em: 27 mar. 2022.
- PASCHOTTA, R. **Excimer Lamps**. 2020. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/excimer_lamps.html>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- PAVIA, M. *et al.* The effect of ultraviolet-c technology on viral infection incidence in a pediatric long-term care facility. **American Journal of Infection Control**, v. 46, n. 6, p. 720–722, 2018.
- PENIDO, E. C. C.; TRINDADE, R. S. **Microcontroladores**. 1. ed. Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2013. 80 p.
- RASHID, M. H. **POWER ELECTRONICS HANDBOOK**. 1. ed. California: Academic Press, 2001, tradução nossa. 892 p.
- _____. **Eletrônica de Potência - Dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2014. 884 p.
- Sala da Elétrica. **O que é chave fim de curso e onde usar**. Brasil: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.saladaeletrica.com.br/chave-fim-de-curso/>>. Acesso em: 01 mai. 2022.
- SCHAEFER, R. *et al.* Pulsed uv lamp performance and comparison with uv mercury lamps. **Journal of environmental engineering and science**, v. 6, n. 3, p. 303–310, 2007.
- SIMÕES, H. M. C. **DETECTOR DE PRESENÇA COM SENSOR PIR HC-SR501**. Brasil, 2018. Disponível em: <<https://blog.moduloeletronica.com.br/detector-de-presenca-com-sensor-pir-hc-sr501/>>. Acesso em: 02 mai. 2022.
- Utmel EElectronics. **HC-SR501 PIR Motion Sensor: Datasheet, pinout and specifications**. 1. ed. China: Utmel EElectronics, 2021. 2 p.
- UV, M. **Deep UV LED Application Market- Sterilization, Purification, and Water Treatment Markets**. Taiwan, 2020. Disponível em: <<https://media.ies.org/docs/standards/IES-CR-2-20-V1-6d.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- WINDER, S. **Power Supplies for LED Driving**. 2. ed. United Kingdom: Elsevier, 2016. 320 p.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Radiation::** Uso de luz ultravioleta (uv) para desinfecção de ambientes públicos e hospitalares. 2022. 1 p. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-\(uv\)-index#:~:text=As%20part%20of%20an%20international,on%20Non%2DIonizing%20Radiation%20Protection.](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-the-ultraviolet-(uv)-index#:~:text=As%20part%20of%20an%20international,on%20Non%2DIonizing%20Radiation%20Protection.)> Acesso em: 30 mai. 2023.
- WU, S. *et al.* Environmental contamination by sars-cov-2 in a designated hospital for coronavirus disease. **Am J Infect Control**, v. 48, n. 1, p. 910–914, 2020.
- YAMANO, N. *et al.* Long-term effects of 222-nm ultraviolet radiation c sterilizing lamps on mice susceptible to ultraviolet radiation. **Photochemistry and photobiology**, v. 96, n. 4, p. 853–860, 2020.
- ZHURAVLEVA, J. A.; NESTERKINA, N. P.; KUZNETSOV, E. A. Development of a special purpose led ultraviolet lamp in a t8 flask. **Vestnik of MSTU**, v. 23, n. 4, p. 319–325, 2020.

APÊNDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO

Figura 74 – Esquema eletrônico completo.



| | | |
|--|--|---------------------------------|
| TITLE: Esquema electrico sistema de desinfeccao LED UV-C | | REV: 1.0 |
| Company: Universidade de Caxias do Sul | | Sheet: 1/1 |
| Date: 2023-02-07 | | Drawn By: Pedro Henrique Ullian |

Fonte: O autor (2023).

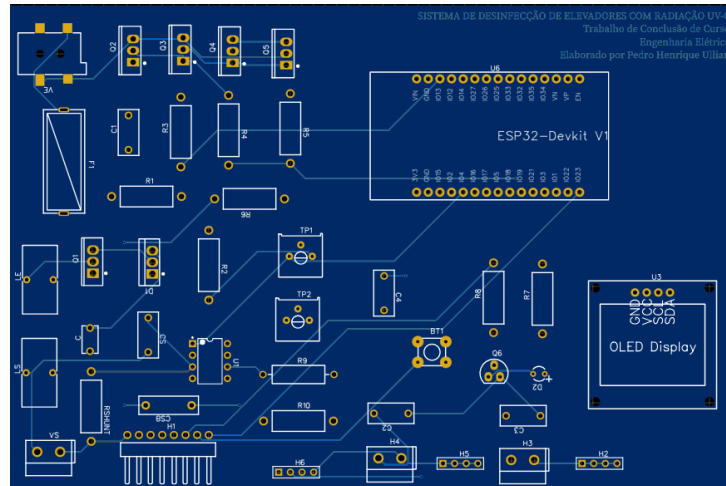
APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES

Quadro 6 – Lista de componentes eletrônicos e demais peças.

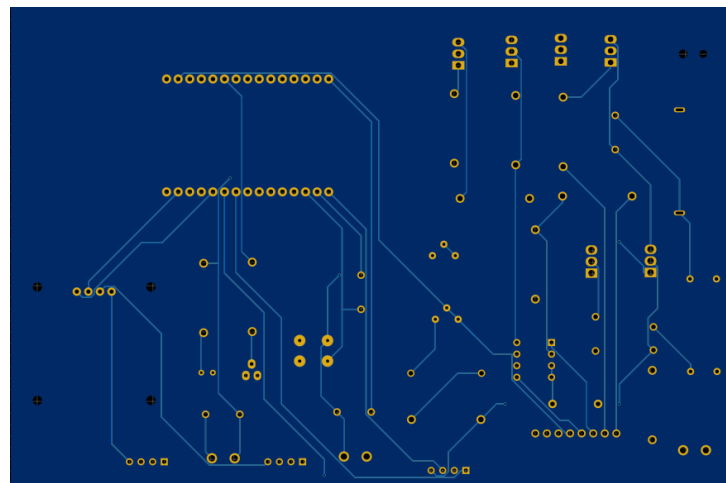
| Prefixo | Descrição | Especificação | Quantidade |
|----------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
| BT1 | Push Button | Chave táctil 6x6x5mm | 1 |
| C | Capacitor Poliéster | 33nF/250 V | 1 |
| C1, C2, C3, C4 | Capacitor Poliéster | 100 nF/63 V | 4 |
| CS | Capacitor Poliéster | 100nF/250 V | 1 |
| Csb | Capacitor MKP Snubber | 3,3 nF/250 V | 1 |
| D1 | Diodo Shottky | STTH16R04CT | 1 |
| D2 | LED | Vermelho 5mm | 1 |
| F1 | Fusível de Vidro 5x20mm | 0,5 A/250 V | 1 |
| LE, LS | Indutor 8mm | 4,7 mH/200mA | 2 |
| Q1 | Transistor MOSFET | IRF840 | 1 |
| Q2, Q3, Q4 | TJB Darlington NPN | TIP122 | 3 |
| Q5 | TJB Darlington PNP | TIP127 | 1 |
| Q6 | TJB NPN | BC547 | 1 |
| R1, R10 | Resistor AmpOp | 10 k Ω /0,25 W | 2 |
| R2 | Resistor AmpOp | 33 k Ω /0,25 W | 1 |
| R3 | Resistor | 2,2 k Ω /0,25 W | 1 |
| R4, R5, R7 | Resistor | 1 k Ω / 0,25 W | 3 |
| R6 | Resistor | 100 Ω / 0,25 W | 1 |
| R8 | Resistor | 330 Ω / 0,25 W | 1 |
| R9 | Resistor AmpOp | 100 k Ω /0,25 W | 1 |
| RL | LED UV-C 275 nm | 7 V/100mA | 5 |
| Rshunt | Resistor Shunt | 5,6 Ω /0,25 W | 1 |
| SW1 | Chave fim de curso | 5A/250 V | 1 |
| TP1, TP2 | Trimpot AmpOp | 1ck Ω | 2 |
| U1 | Ampificador Operacional | LM358 | 1 |
| U2 | Sensor de Radiação UV-C | UVM-30A | 1 |
| U3 | OLED Display | OLED 0,96" | 1 |
| U4, U5 | Sensor de presença | HC-SR501 | 2 |
| U6 | Microcontrolador | ESP32 Devkit V1 | 1 |
| V1 | Fonte de alimentação PFC | 48 V/ 15 W | 1 |
| V2 | Fonte de alimentação PFC | 12 V | 1 |
| V3 | Fonte de alimentação PFC | 5 V | 1 |
| VE (48 V) | Conector HX DC050 QT | | 1 |
| VS | Conector KF301R-5.0-2P | | 1 |

Fonte: O autor (2023).

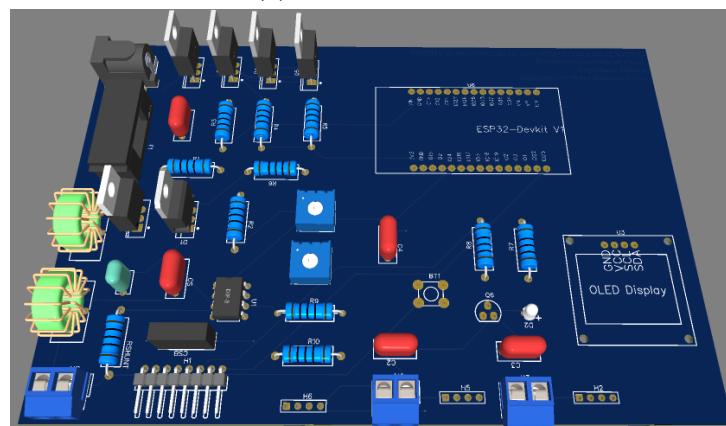
APÊNDICE C – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO



(a) Lado TOP.



(b) Lado BOTTOM.

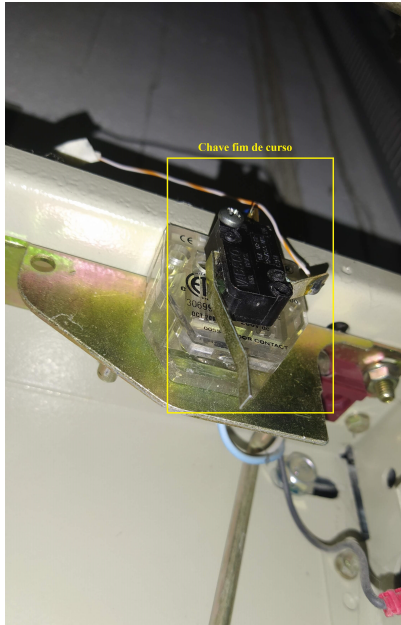


(c) Modelo 3D.

Figura 75 – Roteamento da PCI.

Fonte: O autor (2023).

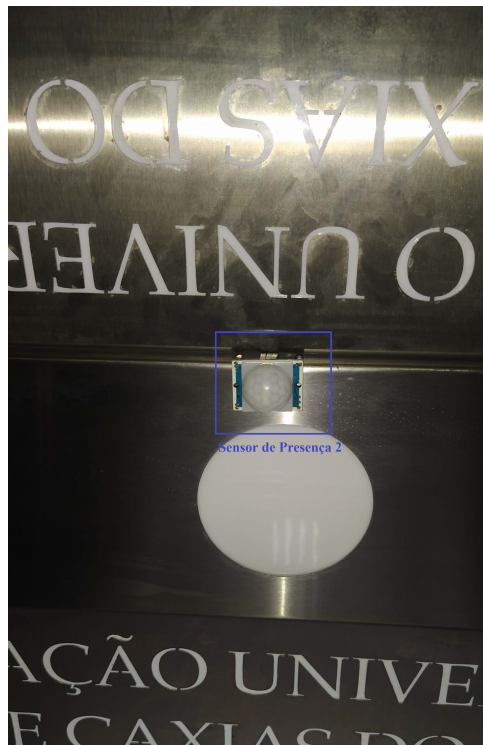
APÊNDICE D – DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA NO INTERIOR DA CABINE DO ELEVADOR.



(a) Chave fim de curso.



(b) Sensor de presença 1.



(c) Sensor de presença 2.

Figura 76 – Dispositivos de segurança do sistema.

Fonte: O autor (2023).

ANEXO A – PARTE DO DATASHEET DO LED UV-C ESCOLHIDO

Figura 77 – Datasheet do LED UV-C da fabricante *LucBei*.

Technical Data Sheet--UV LEDs

1. Features:

- ◆ High Light Output Power;
- ◆ Long Operation Life and Low Light Decay;
- ◆ Environmental Protection, Energy Saving and High Reliability;
- ◆ Durable, Shock-proof, Easy to design and Easy to Apply in Different Fields or Different Occasions;

2. Applications :

- ◆ Disinfection;
- ◆ Air and Water Purification;
- ◆ UV Detection and Communication Technology;
- ◆ Food Processing and Preservation, Food and Beverage Packaging, Fresh Storage, etc.;
- ◆ Health Care, Dermatological Treatment, etc.;

3. Electro-Optical Characteristics @Tc=22°C

| Items | Symbol | Condition | Min. | Typ.I | Max. | Unit |
|---------------------|--------|-----------|------|-------|------|------|
| Forward Voltage | Vf1 | If=100mA | 5 | — | 8 | V |
| | Vf3 | If=10uA | 3 | — | — | V |
| Reverse Current | Ir | Vr =-5V | — | — | 1.0 | μA |
| Reverse Voltage | Vr | Ir=-10μA | 10 | — | — | V |
| Radiated Power | Φe | If=100mA | 7 | — | 10 | mW |
| Peak Wavelength | WLP | If=100mA | 265 | — | 315 | nm |
| Spectrum Half Width | HW | If=100mA | 8 | — | 14 | nm |

- 1) These values are measured by the Jason optical spectrum analyzer within the following tolerances.
--Forward Voltage (Vf): ±0.2V; peak wavelength (λp):±3nm; Radiant Flux (Φe):±10%
- 2) Although all LEDs are tested by Jason Semiconductor's equipment. Some values may vary slightly depending on the conditions of the test equipment.
- 3) UV LEDs are static-sensitive products. Please pay attention to static electricity during transportation and use;

4. Absolute Maximum Ratings

| Items | Symbol | Condition | Rating | Unit |
|-----------------------------|--------|------------------|---------|------|
| Forward Current | If | Ta = 22°C | ≤100 | mA |
| Reverse Voltage | Vr | Ta=22°C | ≤10 | V |
| Working Temperature | T | — | -30-60 | °C |
| Storage Temperature | Tstg | Sealed Package | -10-40 | °C |
| Welding Maximum Temperature | T | Reflow Soldering | 170-180 | °C |

- 1) Operating the LED beyond the listed maximum ratings may affect device reliability and cause permanent damage;
- 2) The light attenuation of the LED lamp will increase and the operation life will be shortened as the injection current increases and the temperature rises;
- 3) The LEDs are not designed to be driven in reverse bias.

Fonte: *LucBei* (2018).

ANEXO B – TESTE DE ESPECTRO DO LED UV-C ESCOLHIDO

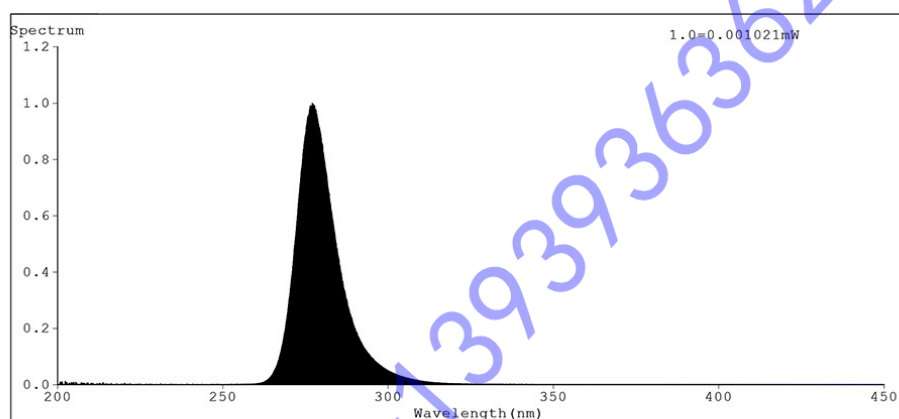
Figura 78 – Pico de emissão do comprimento de onda do do LED UV-C da fabricante *LucBei*.

EVERFINE

EVERFINE HAAS-2000 Test Report

2 Of 2

Spectrum Test Report



Peak WL:Lp=277.1nm HWL:Lhd=12.6nm

Photo Parameters:

Peak WL:Lp=277.1nm HWL:Lhd=12.6nm Fe = 15.081 mW

EUVC= 8.146mW EUVB= 4.4895mW EUVA= 7.2144e-005mW [weighting]

E_UVC= 8.6938mW E_UVB= 6.2763mW E_UVA= 0.11003mW

Electrical parameters:

V = 6.896 V I = 0.1000 A P = 689.8 mW PF = 1.000

IR = 0.0uA @5V

Status: Integral T = 1000 ms Ip = 30814 (47%)

Test Type: Fast Test; Delicacy = High; Tecool: ON

Model:JS-35AE
Tester:
Temperature:25.0Deg
Manufactory:

Number:1*100mA
Date:2020-05-20
Humidity:50%
Remarks:1

Fonte: *LucBei* (2018).